

## WECHSELWIRKUNGEN RUNDER DÜSENFREISTRAHLEN MIT EBENEN WÄNDEN BEI VERSCHIEDENEN AUFTREFFWINKELN

F. Hüttmann<sup>1</sup>, A. Leder<sup>1</sup>, M. Michael<sup>1</sup>, D. Majohr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik  
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

<sup>2</sup> Volkswagen AG, Nutzfahrzeuge  
Postfach 210580, 30405 Hannover

### Abstrakt

Die Ausbreitung eines runden Düsenfreistrahls bei verschiedenen Auftreffwinkeln auf eine ebene Wand wird in einem großen Wasserbecken experimentell untersucht. Die Wechselwirkungen zwischen Freistrahls und Wand werden bei den unterschiedlichen Konfigurationen anhand des mit einer tauchbaren 3D-LDA-Sonde gemessenen Strömungsfeldes charakterisiert. Das radiale Ausbreitungsverhalten sowie der Volumenstrom über die Strahlquerschnitte stehen dabei im Mittelpunkt der Auswertung.

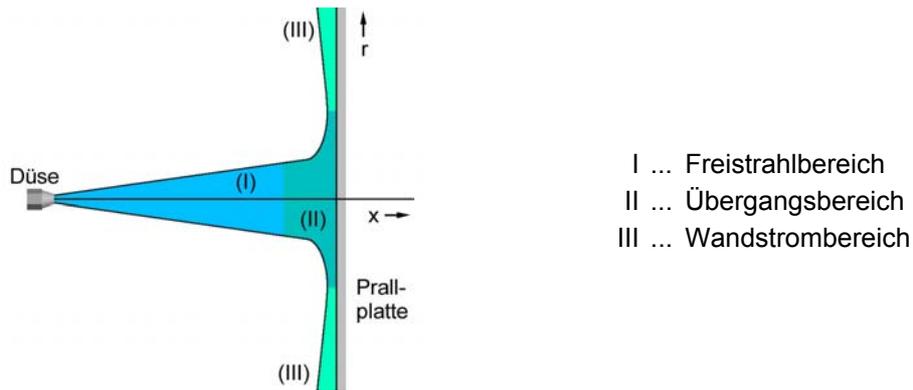
### 1 Einleitung

Ein Anwendungsfall des turbulenten Freistrahls ist der Einsatz in technologischen Prozessen in der Automobilindustrie zum Reinigen von Automobilkarossen. In den Reinigungsbädern ergeben sich jedoch aufgrund scheinbar unkontrollierbarer Partikeldepositionen auf den Karosserieoberflächen Schwierigkeiten hinsichtlich der Lackierqualität. Für die Abreinigung dieser Partikel von der Oberfläche ist eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit des Fluides erforderlich, welche u. a. durch den gezielten Einsatz von Düsenfreistrahlen erzeugt werden kann. Die Kenntnis des Ausbreitungsverhaltens von Freistrahlen und die Untersuchung der Wechselwirkungen mit ebenen Wänden ermöglicht die Optimierung und Dimensionierung technologischer Prozesse und Anlagen. Somit trägt das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Freistrahls und ebener Wand zur Sicherung der Qualität der Produkte und Verfahren sowie auch zur Einsparung von Energie während der Prozesse bei.

### 2 Grundlegende Betrachtungen

Im Allgemeinen wird ein runder Düsenfreistrahls als drallfrei und vollkommen turbulent betrachtet, dem der konstante statische Druck der Umgebung aufgeprägt ist. Die maximale Geschwindigkeit ist auf der Strahlachse zu finden. Der Impulsaustausch an den Strahlrändern bewirkt einen Entrainmentprozess, d. h. aus der Umgebung wird Fluid in den Freistrahls transportiert. Ein Düsenfreistrahls lässt sich in ein Nah- und Fernfeld unterteilen, wobei das Fernfeld durch einfache empirische Ansätze analytisch beschrieben werden kann [5], [7].

## 7.2

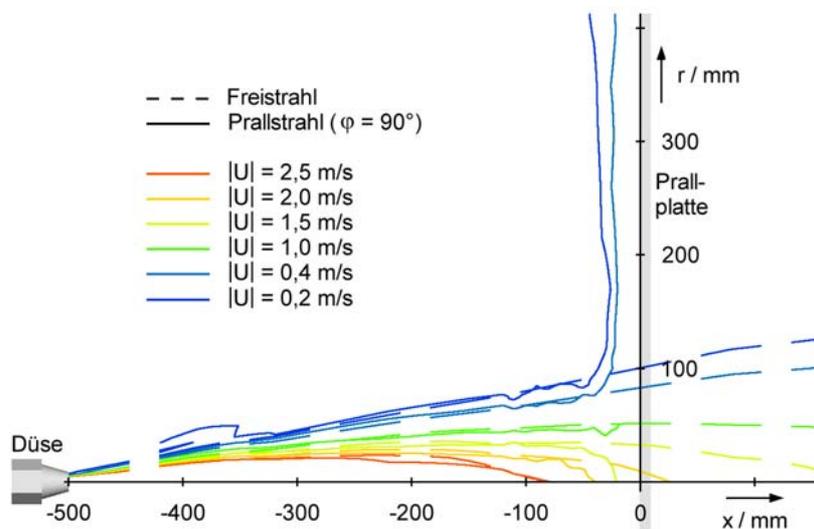


**Abb. 1:** Schematische Darstellung des auf eine ebene Wand (Prallplatte) treffenden Freistrahles

Das Geschwindigkeitsfeld eines Prallstrahls, also eines auf eine ebene Wand treffenden Düsenfreistrahls, kann in drei Bereiche unterteilt werden (vgl. Abb. 1). Im Freistrahلبereich (I), der sich im Bereich von der Düse und bis ca.  $10d$  vor der Prallplatte befindet, ist die Strömung identisch mit dem eines sich ungehindert ausbreitenden Freistrahls (vgl. Abb. 2). Im anschließenden Übergangsbereich (II) bildet sich eine Staupunktströmung aus. Die Strömungsgeschwindigkeit in  $x$ -Richtung sinkt mit der Annäherung an die Prallplatte kontinuierlich ab und unmittelbar vor der ebenen Wand wird der Strahl radial umgelenkt. Im Wandstrombereich (III) ist der Übergang von der axialen zur radialen Strömung abgeschlossen und die Strömung verläuft tangential zur ebenen Wand. Dabei bildet sich eine Wandgrenzschicht aus [5], [7].

### 3 Versuchsbeschreibung

Die experimentellen Untersuchungen am runden Düsenfreistrahл finden im Rundlaufkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik an der Universität Rostock statt. Hier stehen ein großes Wasserbecken (Volumen  $860 \text{ m}^3$ ) und ein Laser-Doppler-Anemometer (LDA) mit einer tauchbaren Sonde zur Verfügung [6], womit eine störungsfreie Ausbreitung des Freistrahls realisiert werden kann. Eine frequenzgesteuerte Kreiselpumpe dient zum Einstellen der für den Volumenstrom  $\dot{V}_0$  notwendigen Druckdifferenz  $\Delta p$  am Düsenaustritt. Die Druckdifferenz  $\Delta p$  und der Volumenstrom  $\dot{V}_0$  werden mit geeigneten Messgeräten kontrolliert. Mit der tauchbaren 3D-LDA-Sonde wird das räumliche Strömungsfeld im und um den Düsen-



**Abb. 2:** Vergleich zwischen Freistrahл und Prallstrahl (Düse:  $d = 10 \text{ mm}$ ;  $\Delta p = 1,5 \text{ bar}$ ;  $\varphi = 90^\circ$ )

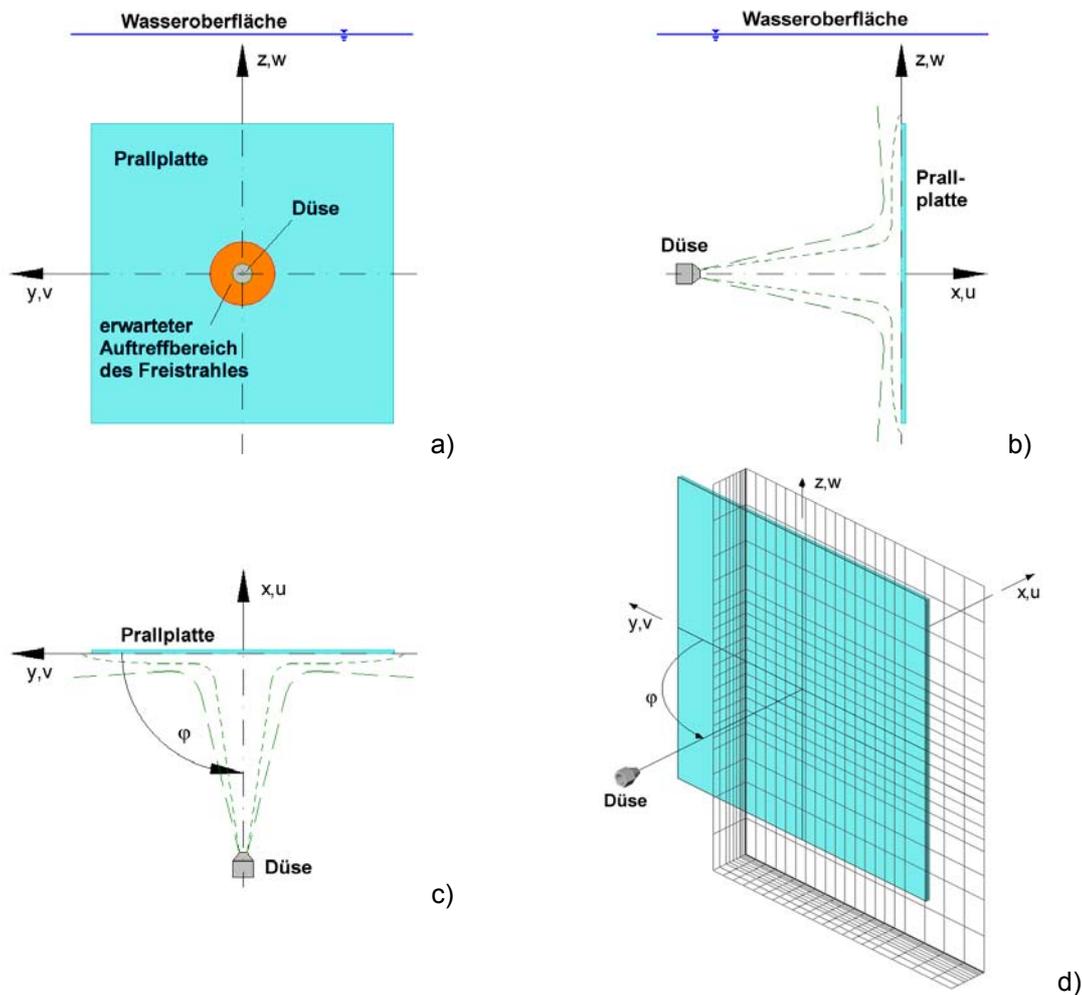
**Tab. 1:** Konfigurationen zur Untersuchung von Frei- und Prallstrahlen

Durchmesser	Druckdifferenz	Austrittsgeschwindigkeit	Volumenstrom	Prallstrahlwinkel
d	$\Delta p = p_A - p_0$	$U_{\max,0} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$	$\dot{V}_0 = U_{\max,0} \frac{\pi}{4} d^2$	$\varphi$
10 mm	1,5 bar	17,3 m/s	4,90 m <sup>3</sup> /h	30°, 60°, 90°

freistrahle sowie dessen Wechselwirkung mit einer ebenen Wand bei unterschiedlichen Konfigurationen vermessen (vgl. Tab. 1). Die ebene Wand wird auch als Prallplatte bezeichnet und ist quadratisch mit einer Seitenlänge  $L = 750$  mm. Der Abstand  $l = 500$  mm zwischen Düsenaustrittsöffnung und dem Schnittpunkt der Strahlachse mit der Prallplatte ist immer gleich.

Den Messungen wird ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Zentrum der Prallplatte zugrunde gelegt. Die x-Achse steht senkrecht auf der ebenen Wand, die y-Achse verläuft tangential in horizontaler Richtung und die z-Achse in vertikaler Richtung. Der x-Achse ist die Komponente  $u$ , der y-Achse die Komponente  $v$  und der z-Achse die Komponente  $w$  des Geschwindigkeitsvektors  $U$  zugeordnet. Der Auftreffwinkel  $\varphi$  beschreibt den Winkel in der x-y-Ebene zwischen der ebenen Platte (y-Achse) und der Strahlachse des Freistrahles. Im Fall des Auftreffwinkels  $\varphi = 90^\circ$  fällt die x-Achse mit der Strahlachse zusammen (vgl. Abb. 3).

Für die Messungen des Geschwindigkeitsfeldes vor der Prallplatte sind sehr große Mess-

**Abb. 3:** Definition des Koordinatensystems und des Messgitters

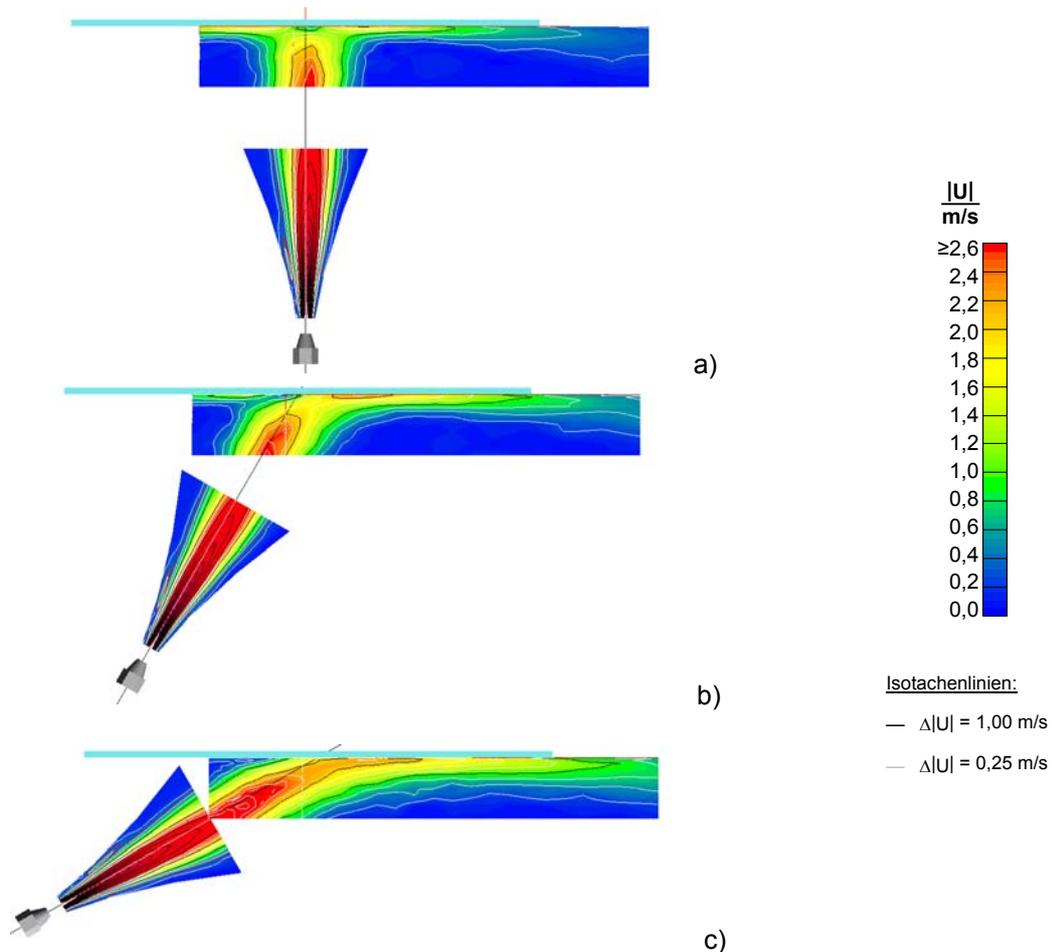
a) y-z-Ebene, b) x-z-Ebene, c) x-y-Ebene und d) Messgitter für die LDA-Messungen

# 7.4

gitter erforderlich, da die Strömung an der Platte quer zur Strömungsrichtung abgelenkt wird. Um eine ausreichend hohe räumliche Auflösung zu erhalten, ohne aber die Dauer der Messungen stark auszudehnen, wird der Gitterabstand vom Strahlzentrum nach außen vergrößert. Mit jeweils 21 Punkten in y- und in z-Richtung entsteht in jeder Ebene parallel zur Prallplatte ein Messgitter von insgesamt 441 Messpunkten. Unter voller Ausnutzung der automatischen Verfahrenswege des Positioniersystems der tauchbaren LDA-Sonde ergibt sich eine Ausdehnung der Messebenen von 720 mm in y-Richtung und 960 mm in z-Richtung. Die zwölf Messebenen werden in einem Bereich von  $x = -1$  mm bis  $x = -100$  mm vor der Prallplatte angeordnet, so dass das Messgitter die Umlenkung des Düsenfreistrahles im Übergangsbereich abdeckt. Die Abstände zwischen den Messebenen vergrößern sich mit zunehmender Entfernung von der ebenen Wand (vgl. Abb. 3 d). Damit ist eine Darstellung des Strömungsfeldes vor der Prallplatte durch dreidimensionale Isoflächen des Geschwindigkeitsvektors und der Turbulenzgrößen möglich.

## 4 Ergebnisse

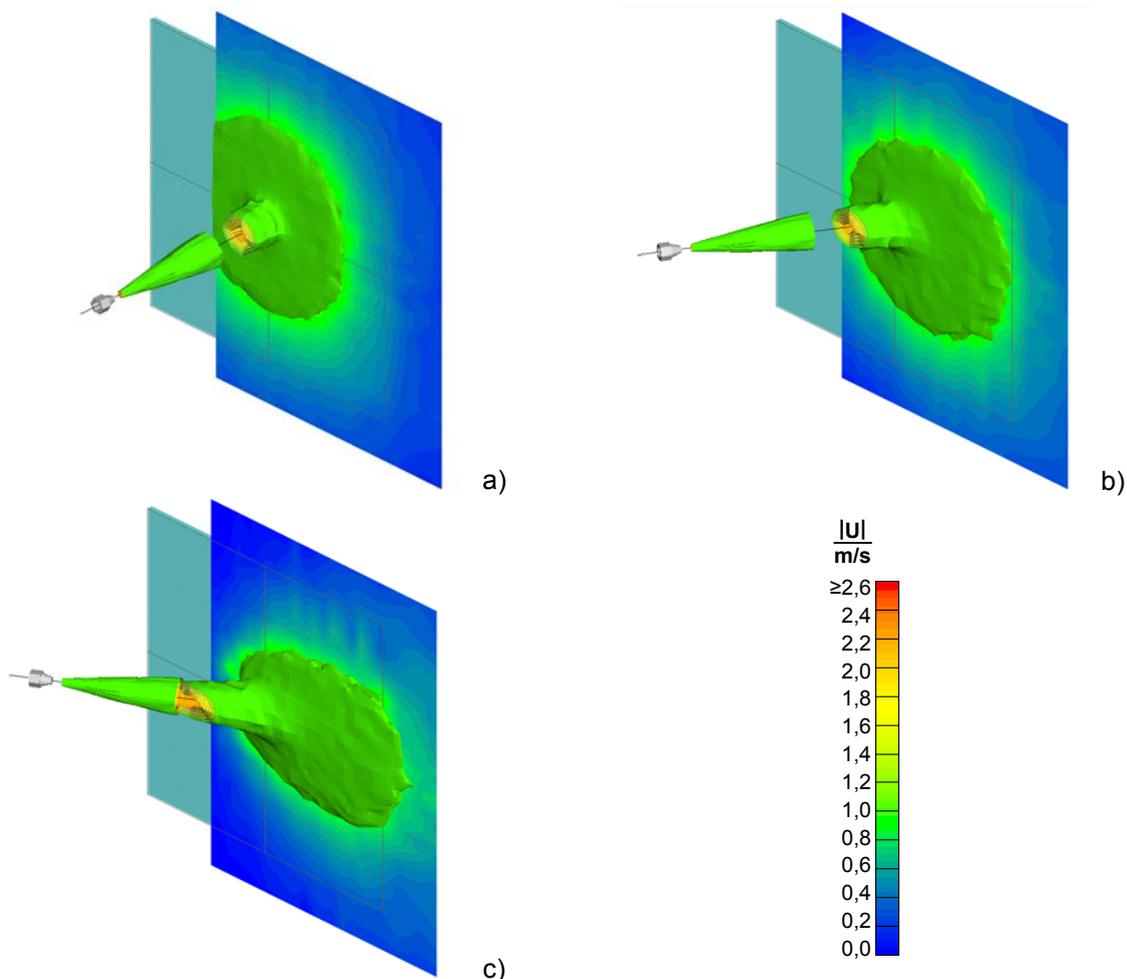
Unabhängig vom Auftreffwinkel  $\varphi$  des Düsenfreistrahles auf die ebene Wand sind der Freistrahلبereich, der Übergangsbereich und der Wandstrombereich in den Messergebnissen wiederzufinden (vgl. Abb. 4). Der Freistrahلبereich, in dem sich die Rückwirkungen der ebenen Wand im Geschwindigkeits- und Turbulenzfeld nicht bemerkbar machen, endet winkelunabhängig im Bereich von ca.  $10 d$  vor der Prallplatte.



**Abb. 4:** Zeitlich gemittelttes Geschwindigkeitsfeld eines auf eine ebene Wand treffenden Freistrahles  
a)  $\varphi = 90^\circ$ ; b)  $\varphi = 60^\circ$  und c)  $\varphi = 30^\circ$ ;

Dagegen zeigen der Übergangsbereich und der Wandstrombereich deutliche Abhängigkeiten vom Auftreffwinkel  $\varphi$  des Düsenfreistrahles auf die ebene Wand. Bei einem Auftreffwinkel  $\varphi = 90^\circ$  bildet sich im Übergangsbereich eine axialsymmetrische Staupunktströmung aus. Die Strömungsgeschwindigkeit in Strahlrichtung sinkt mit der Annäherung an die Prallplatte kontinuierlich ab und unmittelbar vor der ebenen Wand wird der Strahl radial umgelenkt. Der Auftreffpunkt des Freistrahles auf die Prallplatte fällt mit dem Schnittpunkt der Strahlachse mit der ebenen Wand zusammen (vgl. Abb. 4 a). Mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  verändert sich das Umlenkungsverhalten an der ebenen Platte. Je flacher der Düsenfreistrahls auf die ebene Wand trifft, desto weniger wird das Fluid des Freistrahls in die Richtung tangential zur Platte umgelenkt, aus welcher der Freistrahls kommt. Ab einem Grenzwinkel  $\varphi_{\text{limit}}$  zwischen  $60^\circ$  und  $30^\circ$  erfolgt keine Umlenkung entgegen der Freistrahlsrichtung. Durch Wechselwirkungen zwischen aufgeweitetem Prallstrahl und ebener Wand verlagert sich mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  der Auftreffpunkt des Strahles auf der Prallplatte in negative y-Richtung (vgl. Abb. 4).

Im Wandstrombereich ist der Übergang von der axialen zur tangentialen Strömung abgeschlossen. Entlang der Prallplatte bildet sich eine Wandgrenzschicht aus, welche am Ende der Platte bei  $y = -375 \text{ mm}$  eine Dicke  $\delta_1 \approx 15 \text{ mm}$  erreicht (vgl. Abb. 4). Die dreidimensionalen Isotachenflächen  $|U|$  besitzen eine diskusartige Form. Beim senkrechten Auftreffen des Freistrahles auf die Wand ( $\varphi = 90^\circ$ ) ist dieser Diskus kreisförmig und nimmt mit abnehmendem Auftreffwinkel  $\varphi$  die Gestalt einer immer flacher werdenden Ellipse an (vgl. Abb. 5).



**Abb. 5:** Vergleich der zeitlich gemittelten Isotachenfläche  $|U| = 1,00 \text{ m/s}$   
a)  $\varphi = 90^\circ$ ; b)  $\varphi = 60^\circ$  und c)  $\varphi = 30^\circ$ ;

## 7.6

In allen untersuchten Fällen schmiegt sich die Prallstrahlströmung an die Plattenfläche an. Eine Reflexion des Freistrahls an der Plattenoberfläche, vergleichbar mit der Reflexion eines Lichtstrahles an einem Spiegel, ist nicht festzustellen (vgl. Abb. 4, 5). Bei schräg auf die Platte treffenden Freistrahlen ( $\varphi = 60^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ) geht die Axialsymmetrie im Übergangs- und Wandstrombereich in eine Symmetrie bezüglich der x-y-Ebene über, in welcher der Auftreffwinkel  $\varphi$  liegt.

### 5 Ausblick

Zur weiteren Analyse der Wechselwirkungen zwischen ebener Wand und Düsenfreistrahls werden bei weiteren Auftreffwinkeln  $\varphi$  des Düsenfreistrahls auf die ebene Wand Geschwindigkeits- und Turbulenzfelder vermessen. Diese Datenbasis bildet die Grundlage für die Validierung von geplanten Parameterstudien mittels numerischer Simulation.

### Literatur

- [1] Albring, W.; Angewandte Strömungsmechanik; Akademie-Verlag, Berlin, 1990
- [2] Eck, B.; Technische Strömungslehre, Bd. 1, Bd. 2; Springer-Verlag, Berlin, 1988/1991
- [3] Leder, A.: Abgelöste Strömungen, Physikalische Grundlagen; Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1992.
- [4] Maurel S.; Sollicc, C.: A turbulent plane jet impinging nearby and from a flat plate; Experiments in Fluids, vol. 31, pp. 687-696, 2001.
- [5] Michael, M.: Experimentelle Untersuchung von Strömungsstrukturen an schräg auf eine ebene Platte treffenden Düsenfreistrahlen; Studienarbeit, Universität Rostock, 2007.
- [6] Richter, F.; Leder, A.: Tauchbare LDA-Schleppsonde für hydrodynamische Untersuchungen; in: Merzkirch, W.; Peters, F.; Ruck, B.; Dopheide, D.; Leder, A. (Hrsg.) 'Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik' - 6. Fachtagung der GALA e.V. 1998, Shaker Verlag, Aachen, S. 3.1 - 3.6, 1998.
- [7] Richter, F.; Leder, A.: Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden; in: Dopheide, D.; Müller, H.; Strunck, V.; Ruck, B.; Leder, A. (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006, PTB Braunschweig, S. 13.1-13.6, 2006.
- [8] Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie; Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [9] Tani, I.; Komatsu, Y.: Impingement of a round jet on a flat surface; 11th Int. Congr. of Applied Mechanics, Munich, pp. 672-676, 1967.