Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”

8. – 10. September 2009, Erlangen

Experimentelle Charakterisierung der von Tauchmotorrührwerken erzeugten Drallstrahlen

Experimental Characterisation of unconfined swirling jets

M. Sieg, F. Hüttmann, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

Freistrahl, verdrallt, Laser-Doppler-Anemometrie, Propeller , Rührwerk, Unterwasser-LDA.
Swirling Jet, Propeller, Laser Doppler Anemometry, Agitator, Subaqueous LDA Probe.

Zusammenfassung

Vorgestellt werden Daten, die mit Hilfe eines 3C-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) mit tauchbarer Sonde [1] an verdrallten Freistrahlen gewonnen wurden. Die Erzeugung der Freistrahlen erfolgte durch unterschiedliche Tauchmotorrührwerke. Aus diesen Daten werden Ergebnisse gewonnen, die diese Unterwasser-Drallstrahlen charakterisieren und in einen Ähnlichkeitsansatz zur allgemeinen Beschreibung von Propellerfreistrahlen münden sollen.

Einleitung

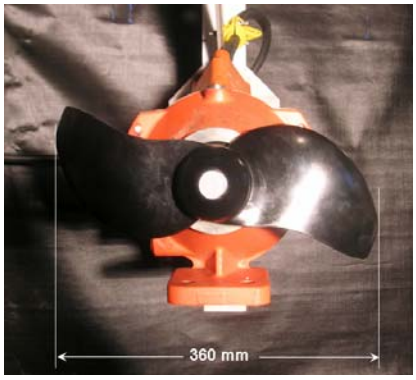
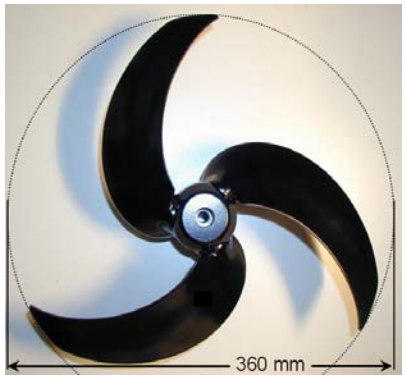
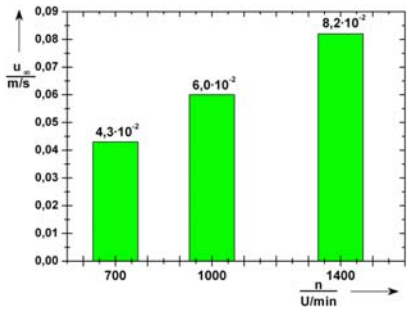
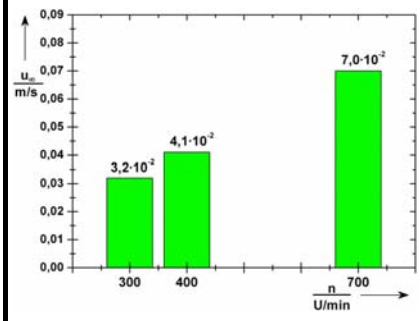
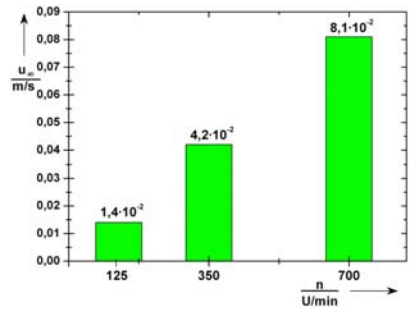
Propellerfreistrahlen finden seit langem vielfältige Anwendungen – von der Antriebstechnik [5] über Reinigungsprozesse in Tauchbädern [3], [4] bis hin zu Mischungs- und Rührvorgängen. Die analytische Beschreibung der Wirkung von Propellern ist oft aufwendig und liefert nicht immer eine exakte Übereinstimmung mit den Messwerten. Aufgrund der immer höheren Anforderungen an Tauchmotorrührwerke besteht der Bedarf, detaillierte Kenntnisse über die Strömungsverhältnisse und das Ausbreitungsverhalten der von ihnen erzeugten Propellerfreistrahlen zu erlangen.

Untersuchungsobjekte dieses Projektes sind moderne Rührwerkspropeller, die im Bereich der Abwassertechnik eingesetzt werden. Diese Rührwerke besitzen bei der sicheren, umweltgerechten Behandlung großer Abwassermengen in Klärwerken eine Schlüsselrolle. Einerseits darf es nicht durch mangelnde Fluidbewegung und einer damit verbundenen unzureichenden Durchmischung zu einem Absterben der Biologie in den Klärbecken und damit zu einem kostspieligen Störfall – evtl. sogar mit der Notausleitung unbehandelter Abwässer in die Umwelt – kommen. Andererseits sollen die im Dauerbetrieb laufenden Rührwerke möglichst energieeffizient arbeiten. Weiterhin ist zu vermeiden, dass die für den Klärprozess nützlichen Mikroorganismen durch zu hohe Schubspannungen beeinträchtigt werden.

Ziel der Untersuchungen ist es, einen Ähnlichkeitsansatz für die Ausbreitung verdrallter Freistrahlen zu gewinnen. Mit diesem soll es unter Eingabe weniger Parameter möglich werden, die Strömungsverhältnisse vollständig und realitätsnah wiederzugeben und den Einsatz der Propellerrührwerke zu optimieren. In diesem Projekt wird das Strömungsfeld von Tauchmotorrührwerken mit verschiedenen Propellergeometrien und bei mehreren Drehzahlen räumlich hochaufgelöst erfasst.

Eine exakte Einhaltung der Propellerdrehzahl ist Voraussetzung für reproduzierbare Messergebnisse und wird durch die Ansteuerung des Propellermotors durch den Frequenzumrichter *SEW Movitrac 07* gewährleistet. Der im Wasser auftretende Schlupf zwischen Propeller und elektrischem Drehfeld wird durch eine in Vorversuchen ermittelte Drehzahlkennlinie kompensiert.

Tab. 2: Versuchsparameter und Grundströmung im Versuchsbecken

Rührwerk 1		Rührwerk 2		Rührwerk 3	
					
D/m:	0,36 (original: 0,36)	*D*/m:	0,36 (original: 0,90)	*D*/m:	0,36 (original: 2,10)
Flügelanzahl:	2	Flügelanzahl:	2	Flügelanzahl:	3
Drehzahl/min^{-1}:	700, 1000, 1400	Drehzahl/min^{-1}:	300, 400, 700	Drehzahl/min^{-1}:	125, 350, 700
Messgitter:	kartesisch	Messgitter:	kartesisch	Messgitter:	kartesisch
maximale Ausdehnung:		maximale Ausdehnung:		maximale Ausdehnung:	
ΔX/mm:	3.384	ΔX/mm:	3.240	ΔX/mm:	3.240
ΔY/mm:	684	ΔY/mm:	684	ΔY/mm:	702
ΔZ/mm:	1.116	ΔZ/mm:	1.080	ΔZ/mm:	1.080
Messpunkte *N*:	18.664	Messpunkte *N*:	10.080	Messpunkte *N*:	10.080
					
(a) Rührwerk 1:		(b) Rührwerk 2:		(c) Rührwerk 3:	

$\frac{n}{U/min}$	700	1000	1400	$\frac{n}{U/min}$	300	400	700	$\frac{n}{U/min}$	125	350	700
$\frac{u_\infty}{u_{max.}}$	**1,9%**	**1,9%**	**1,9%**	$\frac{u_\infty}{u_{max.}}$	**1,9%**	**1,9%**	**1,7%**	$\frac{u_\infty}{u_{max.}}$	**1,6%**	**1,8%**	**1,6%**
$\frac{u_\infty}{u_0}$	**3,0%**	**3,5%**	**3,2%**	$\frac{u_\infty}{u_0}$	**3,6%**	**3,4%**	**3,7%**	$\frac{u_\infty}{u_0}$	**14,0%**	**4,7%**	**7,4%**

mittlere Geschwindigkeit: $u_m = \frac{\dot{V}}{A}$ (7)

Als charakteristische Größen für Kennzahlen und für die normierte Darstellung werden der Strahlquerschnitt A_0, die mittlere Geschwindigkeit u_0, der Volumenstrom $\dot{V}_0$, der Impulsstrom $\dot{I}_0$ und der Drehimpulsstrom $\dot{L}_0$ der Messebene x = 0*D* definiert.

Bezugsgeschwindigkeit: $u_{MAX.} = u_{max.}(x=0D)$ (8)

Bezugsgeschwindigkeit: $u_0 = u_m(x=0D)$ (9)

Bezugsquerschnitt: $A_0 = A(x=0D)$ (10)

Bezugsvolumenstrom: $\dot{V}_0 = \dot{V}(x=0D)$ (11)

Propellerschub: $\dot{I}_0 = \dot{I}_x(x=0D)$ (12)

Propellerdrall: $\dot{L}_0 = \dot{L}_x(x=0D)$ (13)

Mit der Bezugsgeschwindigkeit u_0, dem Propellerdurchmesser *D* und der kinematischen Viskosität des Fluids lässt sich die Reynolds-Zahl *Re* bilden, welche den Strömungszustand des verdrallten Freistrahls beschreibt. Aus dem Impulsstrom und dem Drehimpulsstrom ergibt sich die dimensionslose Drallzahl *S*.

Reynolds-Zahl: $Re = \frac{u \cdot D}{\nu}$ (14)

Drallzahl: $S = \frac{\dot{L}}{\dot{I} \cdot D}$ (15)

Ein weiterer Parameter zur Beschreibung des Freistrahls ist die Entrainmentrate *E*, die das Anwachsen des Volumenstroms mit zunehmender Lauflänge des Freistrahls durch an den Strahlrändern mitgerissenes Fluid kennzeichnet.

Entrainmentrate: $E = \frac{\dot{V}(x/D) - \dot{V}_0}{\dot{V}_0}$ (16)

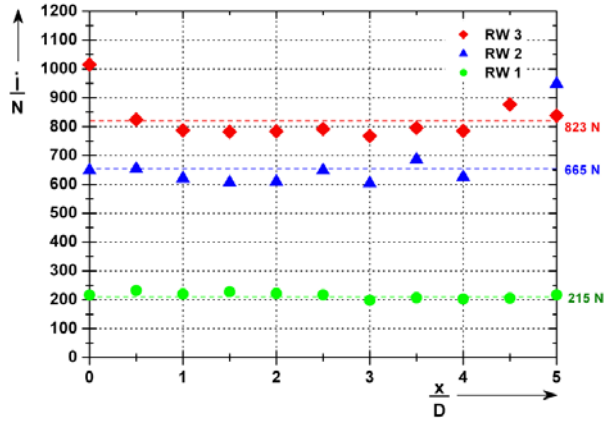
Ergebnisse

Die durchgeführten Messungen stellen Parametervariationen dar. Im ersten Abschnitt werden die einzelnen Rührwerke bei einer einheitlichen Drehzahl durch die Werte der maximalen und mittleren Strömungsgeschwindigkeit $u_{max.}$ bzw. u_m sowie verschiedene integrale Größen charakterisiert: Der Strahlradius r_1, der Ausbreitungswinkel α, der Volumenstrom $\dot{V}$, die Entrainment-Rate *E*, sowie der Axialimpulsstrom $\dot{I}$, der Drehimpulsstrom $\dot{L}$ und die Drallzahl *S*. Im zweiten Abschnitt erfolgt eine Gegenüberstellung bei gleichem Schub.

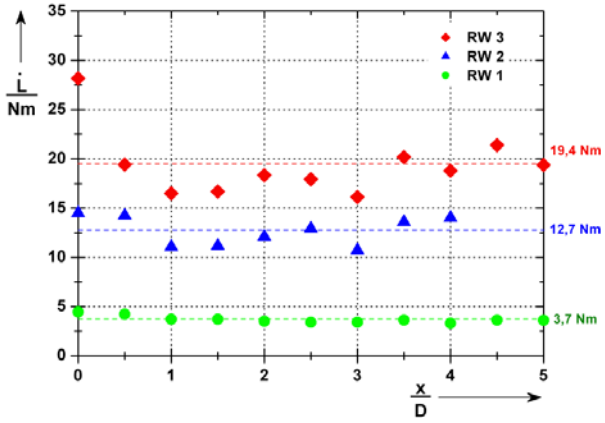
Vergleich der Freistrahlkenngrößen bei identischer Drehzahl

Alle Rührwerke zeigen deutliche Unterschiede in der Maximalgeschwindigkeit $u_{max.}$, mit abnehmender Tendenz bei größer werdendem Abstand zum Propeller (Abb. 2 a).

Das dreiflügelige Rührwerk RW 3 weist die höchsten Werte auf. Bei den Propellern mit zwei Flügeln erreicht RW 2 größere Maximalgeschwindigkeiten als RW 1. Die Maximalgeschwindigkeit $u_{max.}$ wächst linear mit der Propellerdrehzahl, Abb. 2 b verdeutlicht dies.



(a) Gemittelter Axialimpulsstrom



(b) Gemittelter Drehimpulsstrom

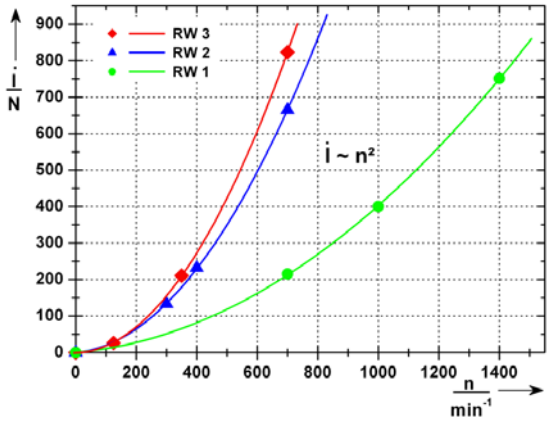
Abb. 4: Vergleich der Impulsströme der drei Rührwerke bei n = 700 min^{-1}

Drehimpulsstrom zeigen über die untersuchte Freistrahllänge (x/D = 0,0 bis 5,0) keine Abnahme durch Dissipation (Abb. 4). Da der Impulsstrom nach Gleichung 5 berechnet wird, ist zu erwarten, dass $\dot{I}$ quadratisch von den Strömungsgeschwindigkeiten und damit von den Drehzahlen abhängt. Die gemittelten und über n aufgetragenen $\dot{I}$-Werte bestätigen dies (Abb. 5 a). Nach Abb. 5 b nimmt auch der Drehimpulsstrom quadratisch mit der Drehzahl zu. Da in Gleichung 6 das Produkt aus Axialgeschwindigkeit u und den tangentialen Komponenten v und w eingeht, ist – bei gegebener linearen Drehzahlabhängigkeit von u – anzunehmen, dass auch die Tangentialgeschwindigkeit einen linearen Zusammenhang mit der Drehzahl n aufweist.

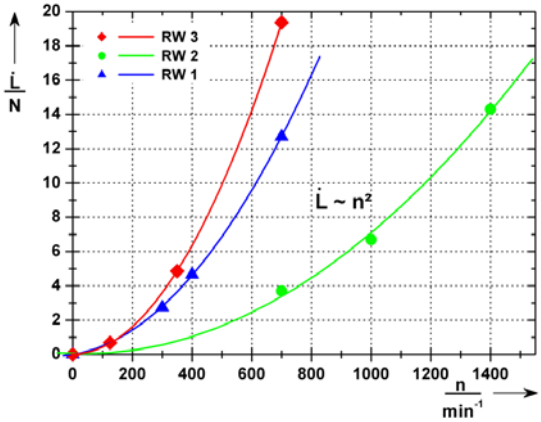
Die Drallzahlen liegen dicht bei einem gemeinsamen Mittelwert von S = (5,5 ±0,9)·10^{-2}, die genauen Werte können der Tab. 3 entnommen werden. Eine Aussage über die Abhängigkeit von der Propellergeometrie kann bei dieser geringen Abweichung nicht getroffen werden.

Die ermittelten normierten radialen Geschwindigkeitsprofile zeigen das charakteristische Verhalten des verdrallten Propellerfreistrahls: Kurz hinter dem Propeller einen von großen Gradienten gezeichneten Verlauf, der in der Nähe des Strahlmittelpunktes die geringen Werte des Nabennachlaufes abbildet und Rückschlüsse auf die Flügelgeometrie zulässt. Die Ähnlichkeit der in Tab. 2 abgebildeten Propellerflügel von RW 2 und RW 3 findet sich auch in den Strahlprofilen wieder (Abb. 6 a).

Bei x/D=3 ist der Übergang zu einem gauß-förmigen Profil zu erkennen (Abb. 6 b), das im



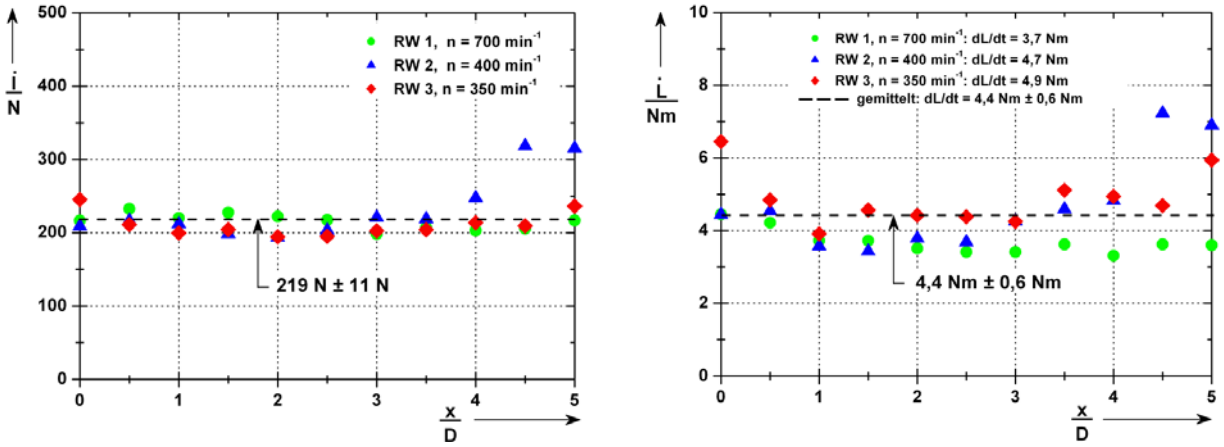
(a) Axialimpulsstrom



(b) Drehimpulsstrom

Abb. 5: Drehzahlabhängigkeit der Impulsströme von RW 1, RW 2 und RW 3

Freistrahlkenngrößen bei gleichem Schub

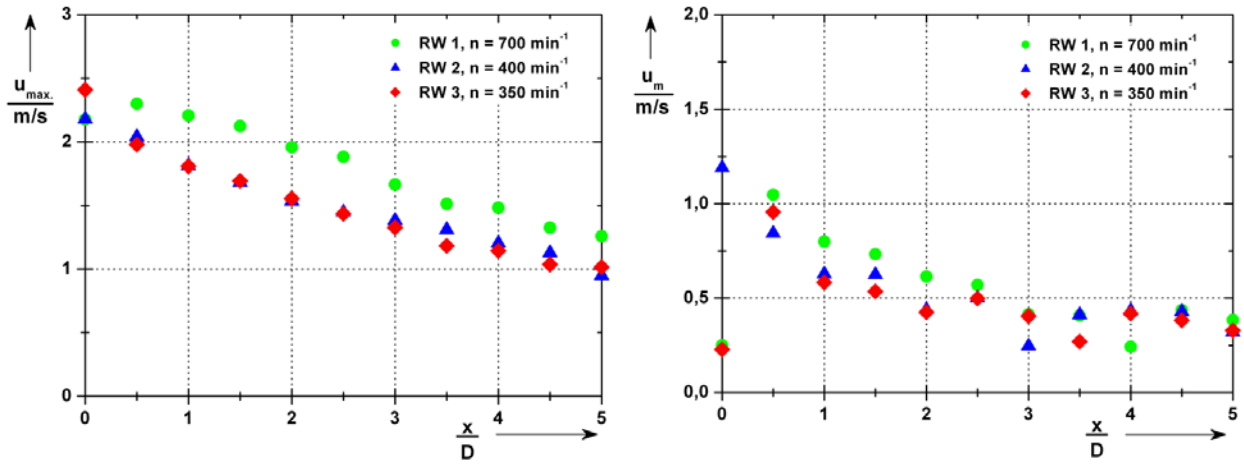


(a) Gemittelter Axialimpulsstrom (b) Gemittelter Drehimpulsstrom

Abb. 7: Vergleich der Impulsströme von RW 1, RW 2, RW 3 bei gleichem Schub $\dot{I} \approx 220$ N

Im Abschnitt 1 wurden die verschiedenen Rührwerke bei derselben Drehzahl einander gegenübergestellt. Eine weitere, praxisrelevante Möglichkeit bietet der Vergleich der Rührwerke bei identischem Schub. Ein zwischen den Rührwerken vergleichbarer Schub $\dot{I} \approx 220$ N wird erzeugt, wenn RW 1 mit 700 min^{-1}, RW 2 mit 400 min^{-1} und RW 3 mit 350 min^{-1} läuft (vgl. Tab. 3, 4). Die Impulsströme $\dot{I}$ (Schub) und $\dot{L}$ (Drall) sind in Abb. 7 ausgewertet.

Im dargestellten Bereich von x/D = 0,0 bis 5,0 zeigen sie keine Abnahme durch Dissipation. Die Werte des Axialimpulsstroms $\dot{I}$ sind bei den angegebenen Drehzahlen für die drei Rührwerke nahezu identisch, so dass $\dot{I}$ als konstante Größe die Grundlage für diesen Vergleich bilden kann. $\dot{L}$ zeigt beim Rührwerk RW 1 geringfügig kleinere Werte als RW 2 und RW 3. Dies schlägt sich in der Drallzahl S nieder, bei der RW 1 mit S = 0,048 unter dem RW 2 mit S = 0,055 liegt, und RW 3 mit S = 0,065 den höchsten Wert aufweist. Die auf zwei Nachkommastellen gerundeten Drallzahlen sind in Tab. 4 aufgeführt. Als Mittelwert ergibt sich für alle drei Rührwerke S = 0,056 ±15%.



(a) Maximum der u-Komponente im Freistrahl (b) Mittlere Geschwindigkeit u_m stromabwärts

Abb. 8: Vergleich der Axialgeschwindigkeiten von RW 1, RW 2 und RW 3, $\dot{I} \approx 220$ N

Für alle Rührwerke ergibt sich daraus der Winkel $\alpha = 13° \pm 1°$, unter Vernachlässigung der Messwerte an der Stelle $x/D = 0{,}0$. Dieser Winkel stimmt mit Literaturwerten eines runden, unverdrallten Freistrahls gut überein [10].

Tab. 4 stellt die ermittelten Größen der drei Rührwerke bei nahezu gleichem Impulsstrom $\dot{I}$ gegenüber. Die Werte für den Bezugsvolumenstrom ergeben sich für $x/D = 0{,}0$ direkt aus den in Abb. 9 aufgetragenen Messdaten. Die angegebenen Entrainmentraten resultieren daraus.

Literatur

[1] Hüttmann, F.; Leder, A.; Michael, M.; Majohr, D.: „Wechselwirkungen runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden bei verschiedenen Auftreffwinkeln“ in: A. Leder, M. Brede, F. Hüttmann, B. Ruck, D. Dopheide (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 15. Fachtagung der GALA e.V. [2007], Uni Rostock, S. 7.1 – 7.6

[2] Kümmel, W.: „Technische Strömungsmechanik“ [2007], S. 255

[3] Leder, A.; Richter, F.; Maisch, S.: “Experimentelle Analyse der Ausbreitungscharakteristik eines Düsenfreistrahl mittels Laser-Doppler Anemometrie”, eine Studie im Auftrage der Daimler-Chrysler AG/Verfahrensentwicklung Sindelfingen, lsm-Forschungsbericht, [2002]

[4] Leder, A.; Richter, F.: “Experimentelle Untersuchungen zur Reinigungswirkung eines Düsenprallstrahles sowie eines schräg auf eine Platte treffenden Düsenfreistrahles” Studie im Auftrag der Volkswagen AG/Hannover, lsm-Forschungsbericht, [2006]

[5] Oebius, H. (TU Berlin): „Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen“, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 82 [2000], S. 7-22

[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., Aachen [1998], S. 3.1 – 3.6.

[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. 13.1-13.7

[8] Ruck, B.: “Laser-Doppler-Anemometrie”, AT-Fachverlag, Stuttgart [1987], S. 113

[9] Sieg, M.; Hüttmann, F.; Leder, A.: „LDA-Untersuchungen an einem verdrallten Freistrahl“ in: Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 16. Fachtagung der GALA e.V., Karlsruhe [2008], S. 23.1-23.8

[10] Surek, D.; Stempin, S.: “Angewandte Strömungsmechanik” [2007], S. 126