

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

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

Zusammenfassung

Vorgelegt 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.

Versuchsaufbau mit tauchbarem LDA-System

Die experimentellen Untersuchungen werden im Strömungslabor des Lehrstuhls Strömungsmechanik an der Universität Rostock durchgeführt. Dort steht ein kreisringförmiger Rundlaufkanal mit einem Volumen von ca. 800 m³ Wasser als hinreichend großes Versuchsbecken zur Verfügung [7]. Zur berührungslosen Messung lokaler Geschwindigkeitsvektoren kommt ein dreikanaliges Laser-Doppler-Anemometer (LDA) zum Einsatz [8], dessen tauchbare, strömungsgünstig geformte Sonde mit automatischen Traversiereinrichtungen in einem kartesischen Koordinatensystem genau positioniert wird [6], [9].

Koordinatensystem und Versuchsparameter

Das zu untersuchende Tauchmotorrührwerk befindet sich in einer Tiefe von ca. 0,9 m unter der Wasseroberfläche mittig im Versuchsbecken. Die Achse des vom Rührwerk erzeugten Freistrahls steht senkrecht auf einem Radiusstrahl des Beckens, so dass sich der Freistrahls auf einer Lauflänge von ca. 7 m frei entwickeln kann. Auf der Nabenspitze des Propellers befindet sich der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems, wobei die Strahlachse mit dessen x-Achse und der Richtung der Hauptströmungskomponente u zusammen fällt. Die positive z-Achse sowie die zugeordnete Querkomponente w des Geschwindigkeitsvektors zeigen nach oben in Richtung der Wasseroberfläche. Daraus ergibt sich die Richtung der y-Achse und deren Geschwindigkeitskomponente v (Abb. 1).

Die Abmessungen des kartesischen Messgitters wurden unter Berücksichtigung des erwarteten Freistrahlausbreitungsverhaltens so gewählt, dass der Freistrahls mit hoher Auflösung in Messebenen $x = \text{const.}$ erfasst wird. Bei einem geringen Strahldurchmesser unmittelbar hinter dem Rührwerk konzentrieren sich die Punkte des Messgitters auf einen kleinen Querschnitt. Stromabwärts nimmt der Strahldurchmesser zu, und es wird mit derselben Anzahl von Gitterpunkten eine in y- und z-Richtung ausgedehntere Messebene abgedeckt. Die Messebenen $x = \text{const.}$ werden bei der Auswertung auf äquidistante, gleichgroße Gitter interpoliert.

Tab. 2 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter der Messreihen an den Rührwerken. Das zweiflügelige Tauchmotorrührwerk 1 (RW 1) mit dem Propellerdurchmesser $D = 0,36$ m wurde im Originalmaßstab bei den Drehzahlen $n = 700$ U/min, 1.000 U/min und 1.400 U/min untersucht. Das Rührwerk 2 (RW 2) wurde von $D = 0,90$ m auf 0,36 m skaliert und bei den Drehzahlen $n = 300$ U/min, 400 U/min und 700 U/min untersucht. Als drittes kam das Rührwerk 3 (RW 3) mit drei Propellerblättern bei den Drehzahlen $n = 125$ U/min, 350 U/min und 700 U/min zum Einsatz. Sein Propeller wurde von ursprünglich $D = 2,10$ m auf 0,36 m verkleinert. Somit besitzen die verwendeten Propeller einen identischen Durchmesser.

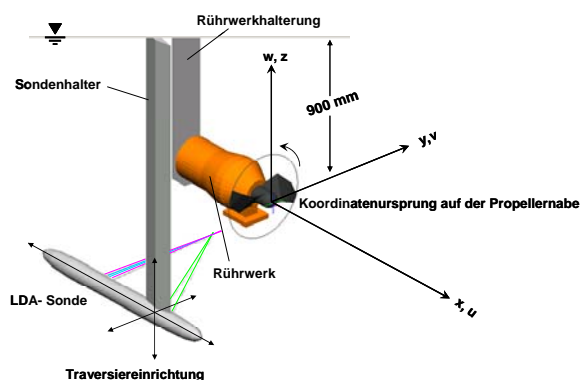


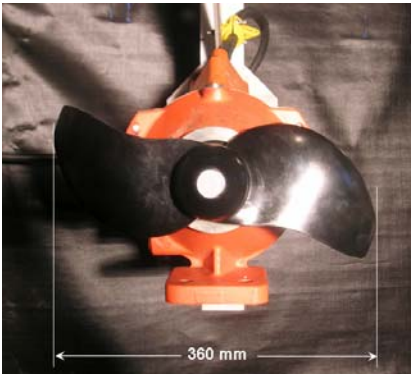

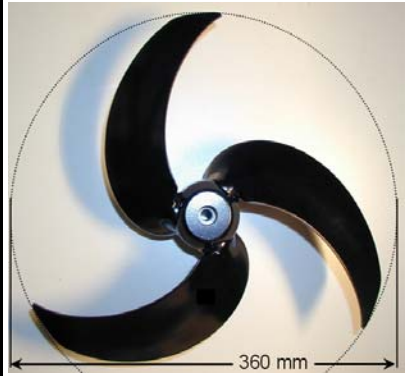
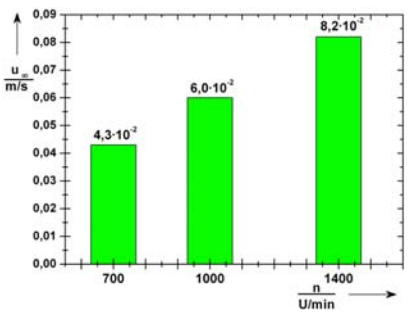
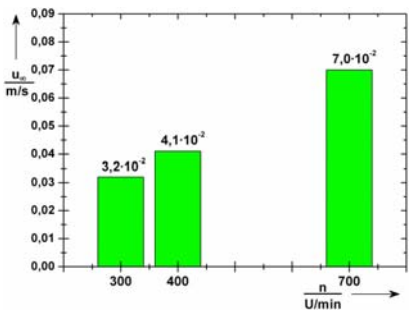
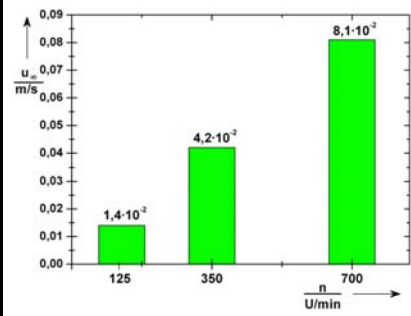
Abb. 1: Definition des Koordinatensystems

Tab. 1: Fluideigenschaften

Medium:		Wasser
Dichte:	ρ/kgm^{-3}	998,59
kin. Viskosität:	$\nu/\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$1,05422 \cdot 10^{-6}$
dyn. Viskosität	$\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$1,05237 \cdot 10^{-3}$

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:			
$\Delta X/\text{mm}:$	3.384			$\Delta X/\text{mm}:$	3.240			$\Delta X/\text{mm}:$	3.240		
$\Delta Y/\text{mm}:$	684			$\Delta Y/\text{mm}:$	684			$\Delta Y/\text{mm}:$	702		
$\Delta Z/\text{mm}:$	1.116			$\Delta Z/\text{mm}:$	1.080			$\Delta Z/\text{mm}:$	1.080		
Messpunkte $N:$	18.664			Messpunkte $N:$	10.080			Messpunkte $N:$	10.080		
											
(a) Rührwerk 1:				(b) Rührwerk 2:				(c) Rührwerk 3:			
$\frac{n}{U/\text{min}}$	700	1000	1400	$\frac{n}{U/\text{min}}$	300	400	700	$\frac{n}{U/\text{min}}$	125	350	700
$\frac{u_\infty}{u_{\text{max}}}$	1,9%	1,9%	1,9%	$\frac{u_\infty}{u_{\text{max}}}$	1,9%	1,9%	1,7%	$\frac{u_\infty}{u_{\text{max}}}$	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%

Der Freistrahл breitet sich im ringförmigen Becken des Rundlaufkanals ungestört aus, bis er auf die Außenwand trifft und dort umgelenkt wird. Durch den gesamten Impulseintrag des Propellerfreistrahls wird das Fluid im Versuchsbecken mit der Zeit in Bewegung versetzt, dies äußert sich in einer Grundströmung u_{∞} , die von den Messwerten subtrahiert wird. Zur Bestimmung der Grundströmung u_{∞} wurden Messungen außerhalb des Freistrahls während des Betriebes durchgeführt (Tab. 2). Anfahrmessungen ergaben, dass die Rührwerke vor Beginn einer neuen Messung etwa eine halbe Stunde laufen müssen, bis sich im Becken ein quasistationärer Zustand der Grundströmung eingestellt hat.

Auswertung

Die Auswertung aller gemessenen Größen des Strömungs- und Turbulenzfeldes erfolgt entsprechend den Versuchsbedingungen zeitlich gemittelt. Für die Bestimmung der Strahlgeometrie sowie die Festlegung der Grenzen für die Auswertung der integralen Größen wird in jeder Messebene $x = \text{const.}$ die Strahlgrenze r_1 mit dem mittleren Radius der Isotachenlinie der axialen Geschwindigkeitskomponente $u = 1\% u_{\text{max}}$ definiert. Analog zur Strahlgrenze wird der Bezugsradius r_{50} , welcher unter anderem zur normierten Darstellung der Strahlprofile dient, über den mittleren Radius der Isotachenlinie $u = 50\% u_{\text{max}}$ festgelegt.

$$\text{Strahlgrenze:} \quad r_1 = r|_{u=1\%u_{\text{max}}} \quad (1)$$

$$\text{Bezugsradius:} \quad r_{50} = r|_{u=50\%u_{\text{max}}} \quad (2)$$

Die Auswertung der Geometrie des Propellerfreistrahls umfasst neben der Strahlgrenze die Bestimmung des Strahlquerschnittes A und des Strahlmittelpunktes $\{y_M, z_M\}$ in einzelnen Messebenen $x = \text{const.}$ sowie die Ermittlung des Strahlausbreitungswinkels α . Der Durchmesser d des Freistrahls bzw. sein Querschnitt A gehen wesentlich in die integrativen Größen ein. Für die Auswertung der einzelnen Messebenen wurde ein *MATLAB*-Algorithmus programmiert, der iterativ aus der Streuung der Geschwindigkeitsprofile den Strahlmittelpunkt bestimmt und anschließend alle weiteren Berechnungen durchführt.

$$\text{Strahlquerschnitt:} \quad A = 2\pi \int_0^{r_1} r \, dr \quad (3)$$

Über die Strahlquerschnitte A der Messebenen $x = \text{const.}$ wird mittels Integration der Volumenstrom \dot{V} , der Impulsstrom \dot{i} und der Drehimpulsstrom \dot{L} ermittelt. Auf Grund der Axialsymmetrie des Freistrahls ergeben sich in den Messebenen $x = \text{const.}$ die Komponenten in y - bzw. z -Richtung des Impulsstroms \dot{i} sowie des Drehimpulsstroms \dot{L} zu Null. Die über den Strahlquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit u_m ergibt sich aus dem Verhältnis von Volumenstrom \dot{V} zum Strahlquerschnitt A der jeweiligen Messebene $x = \text{const.}$

$$\text{Volumenstrom:} \quad \dot{V} = 2\pi \int_0^{r_1} u(r) r \, dr \quad (4)$$

$$\text{Impulsstrom:} \quad \dot{\mathbf{i}} = \begin{Bmatrix} \dot{i}_x \\ \dot{i}_y \\ \dot{i}_z \end{Bmatrix} = 2\pi\rho \cdot \int_0^{r_1} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{u} \cdot r \, dr \quad (5)$$

$$\text{Drehimpulsstrom (Drall):} \quad \dot{L}_x = 2\pi\rho \cdot \int_r (y \cdot w - z \cdot v) \cdot \mathbf{u} \cdot r \, dr \quad (6)$$

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

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 $x = 0D$ definiert.

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

$$\text{Bezugsgeschwindigkeit: } u_0 = u_m(x=0D) \quad (9)$$

$$\text{Bezugsquerschnitt: } A_0 = A(x=0D) \quad (10)$$

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

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

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

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 .

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

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

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.

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

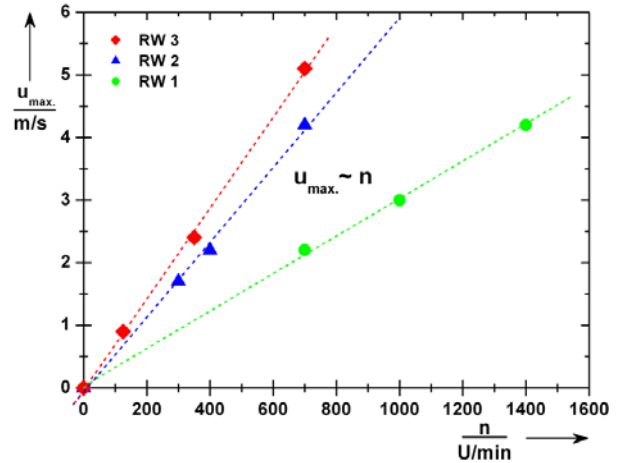
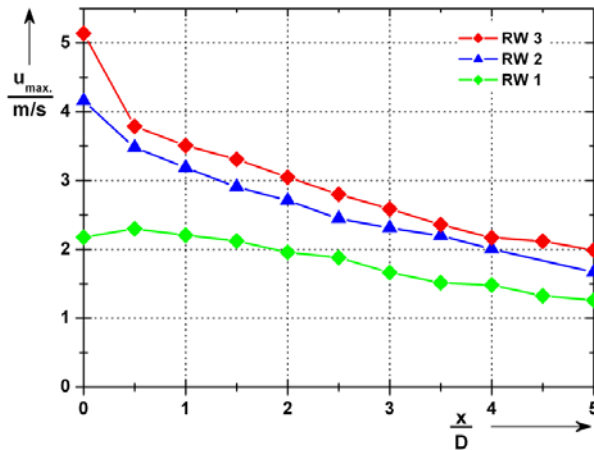
Ergebnisse

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 $u_{\text{max.}}$ 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 erfolgte eine Gegenüberstellung bei gleichem Schub.

Vergleich der Freistrahlenkenngrößen bei identischer Drehzahl

Alle Rührwerke zeigen deutliche Unterschiede in der Maximalgeschwindigkeit $u_{\text{max.}}$, 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 $u_{\text{max.}}$ wächst linear mit der Propellerdrehzahl, Abb. 2 b verdeutlicht dies.



(a) Maximum der u -Komponente im Freistrah

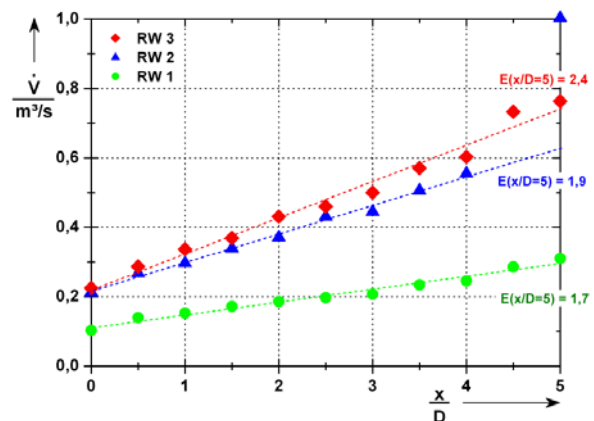
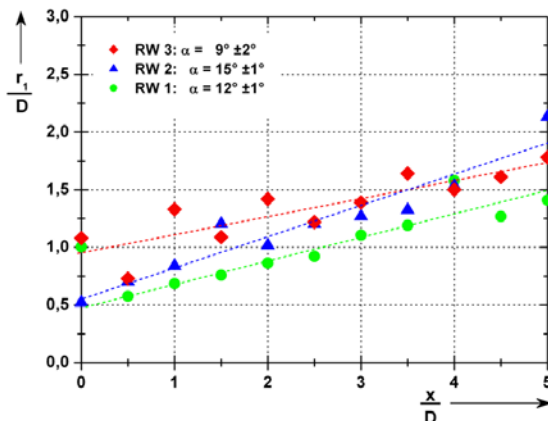
(b) Drehzahlabhängigkeit in der Ebene $x/D=0$

Abb. 2: Vergleich der Maximalgeschwindigkeit von RW 1, RW 2 und RW 3, $n = 700 \text{ min}^{-1}$

Bei den normierten, in Abb. 3 a dargestellten Strahlradien zeigt das Rührwerk RW 1 tendenziell geringere Werte als die übrigen, deren Werte nicht signifikant voneinander abweichen. Die auf die Strahlachse bezogenen Ausbreitungswinkel α werden durch Interpolation ermittelt. Beim Rührwerk RW A beträgt $\alpha = 12^\circ$, RW 3 liegt mit $\alpha = 9^\circ$ um 25% darüber, RW 2 mit $\alpha = 15^\circ$ um 25% darüber. Als Mittelwert für alle drei Rührwerke ergibt sich $\alpha = 12^\circ \pm 3^\circ$, was mit dem eines runden, unverdrallten Freistrahls übereinstimmt [10].

Das Rührwerk RW 1 transportiert bei gleicher Drehzahl n das geringste Fluidvolumen. Bei RW 2 und RW 3 wurde unmittelbar hinter dem Propeller, d. h. bei $x/D=0$, der im Vergleich zu RW 1 doppelte Volumenstrom \dot{V} gemessen. Die Freistrahlen vergrößern erwartungsgemäß ihren Volumenstrom mit zunehmendem Abstand vom Propeller (in Abb. 3 b). Dieses Entrainment E fällt beim zweiflügeligen RW 1 am geringsten aus, während das ebenfalls zweiflügelige RW 2 aufgrund seiner anderen Propellergeometrie einen größeren Wert aufweist. RW 3 mit drei Flügeln erreicht das größte Entrainment der untersuchten Rührwerke. Die Zahlen für E im Abstand $x/D=5$ sind in in Abb. 3 b eingetragen.

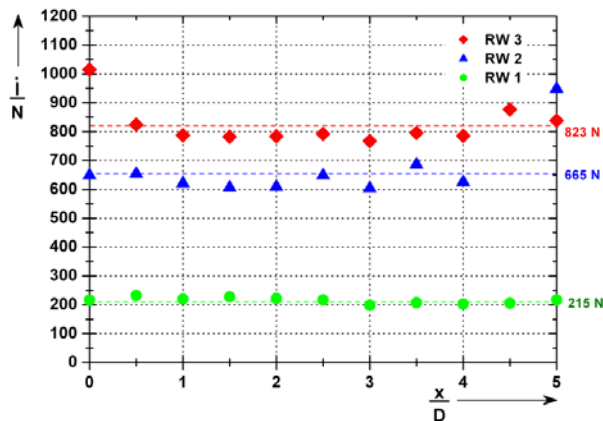
Bei den Impulsströmen \dot{I} (Schub) und \dot{L} (Drall) weist Rührwerk RW 3 die größten Werte auf, gefolgt von RW 2 und RW 1 (Abb. 4). Sowohl der Axialimpulsstrom als auch der



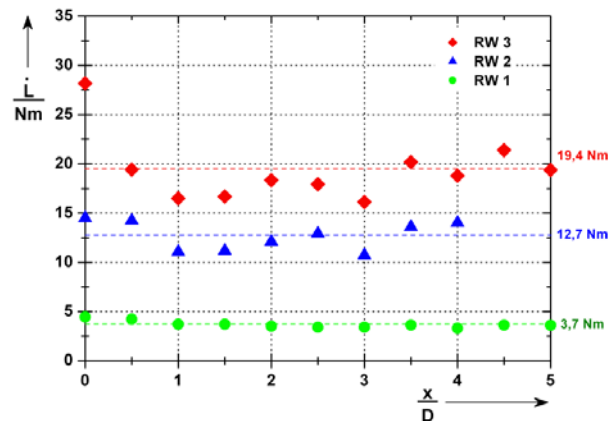
(a) Strahlaufweitung und resultierender Ausbreitungswinkel (bezogen auf Strahlachse)

(b) Volumenstromvergleich

Abb. 3: Strahlaufweitung und Volumenstrom von RW 1, RW 2 und RW 3, $n = 700 \text{ min}^{-1}$



(a) Gemittelter Axialimpulsstrom



(b) Gemittelter Drehimpulsstrom

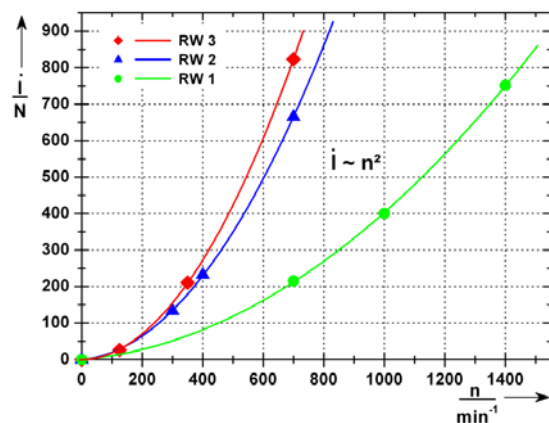
Abb. 4: Vergleich der Impulsströme der drei Rührwerke bei $n = 700 \text{ min}^{-1}$

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 linearer Drehzahlabhängigkeit von u – anzunehmen, dass auch die Tangentialgeschwindigkeit einen linearen Zusammenhang mit der Drehzahl n aufweist.

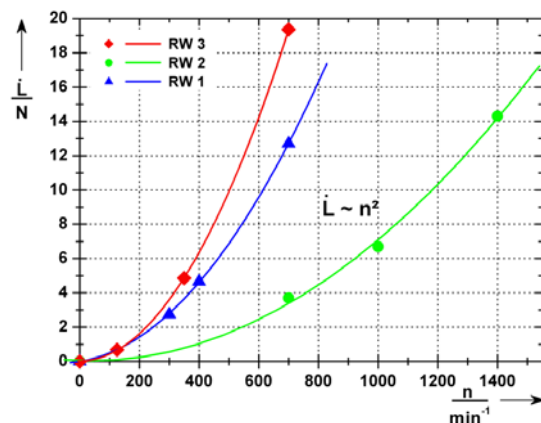
Die Drallzahlen liegen dicht bei einem gemeinsamen Mittelwert von $S = (5,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$, die genauen Werte können der Tab. 3 entnommen werden. Eine Aussage über die Abhängigkeit von der Propellergeometrie kann bei dieser geringen Abweichung nicht getroffen werden.

Die ermittelten normierten radialen Geschwindigkeitsprofile zeigen das charakteristische Verhalten des verdrehten 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

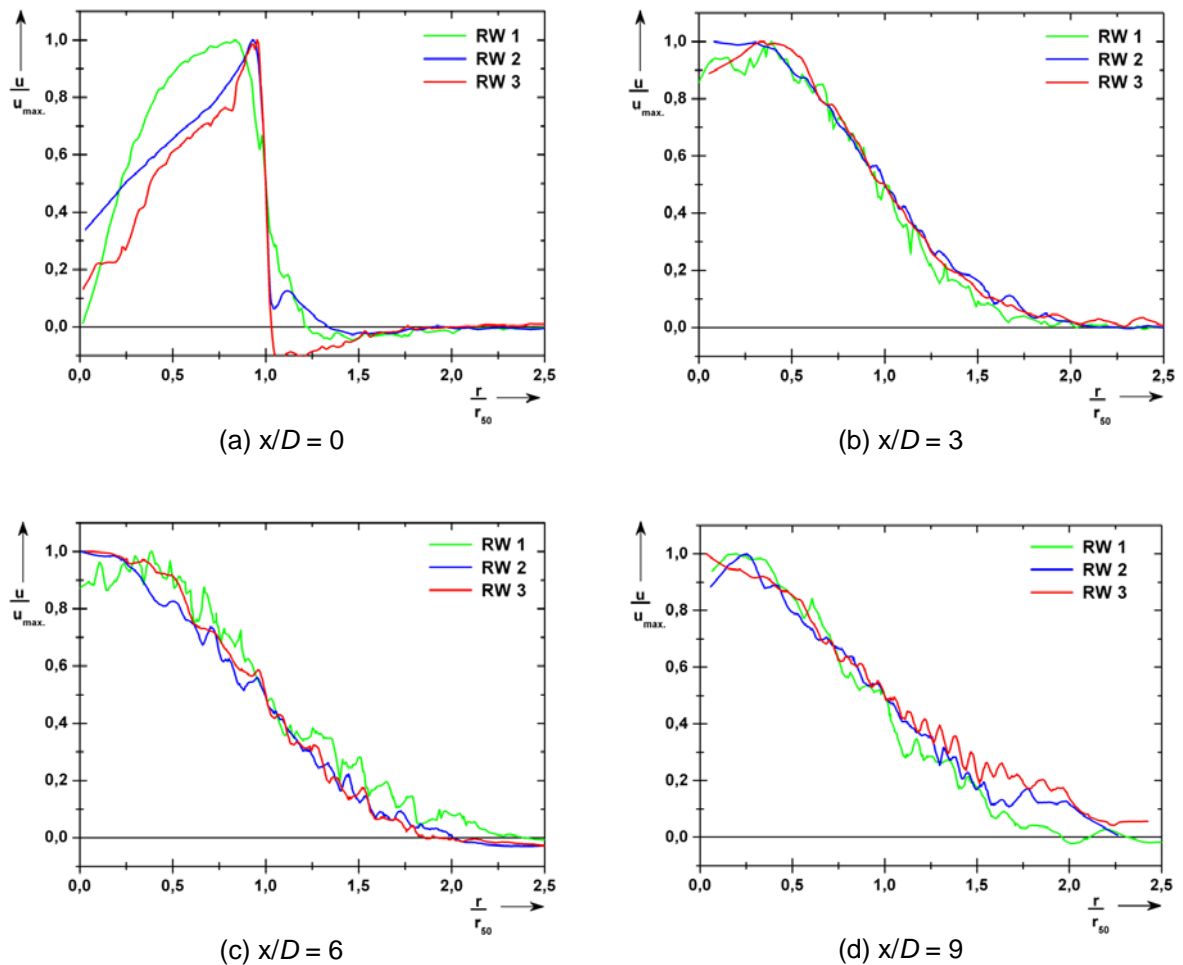


Abb. 6: Geschwindigkeitsprofile von RW 1, RW 2, RW 3, $n = 700 \text{ min}^{-1}$

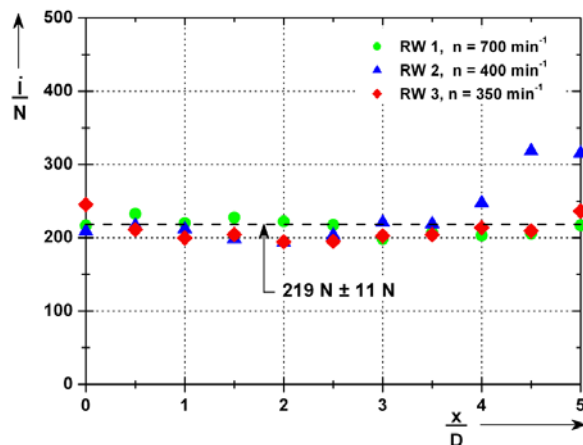
Fernfeld voll ausgeprägt ist (Abb. 6 c und d). Wie in [9] gezeigt wurde, liegen die normierten Strahlprofile ab $x/D > 3$ weitgehend übereinander, was einen Ähnlichkeitsansatz erfolgversprechend erscheinen lässt.

Tab. 3 stellt die ermittelten Größen der drei Rührwerke bei gleicher Drehzahl gegenüber.

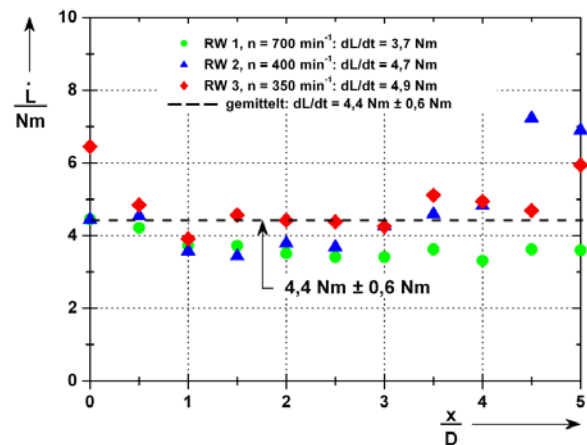
Tab. 3: Ergebnisübersicht Rührwerke bei gleicher Drehzahl

Rührwerk		RW 1	RW 2	RW 3
Drehzahl	$n / \text{U/min}$	700	700	700
max. Geschwindigkeit	$u_{max} / \text{m/s}$	2,3	4,2	5,1
Bezugsgeschwindigkeit	$u_0 / \text{m/s}$	1,4	1,9	1,1
Reynolds-Zahl	Re	$4,8 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$
Bezugsvolumenstrom	$\dot{V}_0 / \text{m}^3/\text{s}$	0,11	0,22	0,22
Entrainmentrate	$E_{x=5D}$	1,7	1,9	2,4
gemittelter Propellerschub	\dot{j} / N	215	665	823
gemittelter Drehimpulsstrom	\dot{L} / Nm	3,7	12,7	19,4
gemittelte Drallzahl	S	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$
Strahlausbreitungswinkel	$\alpha / 1^\circ$	$\approx 12 \pm 1$	$\approx 15 \pm 1$	$\approx 9 \pm 2$

Freistrahlenkenngrößen bei gleichem Schub



(a) Gemittelter Axialimpulsstrom

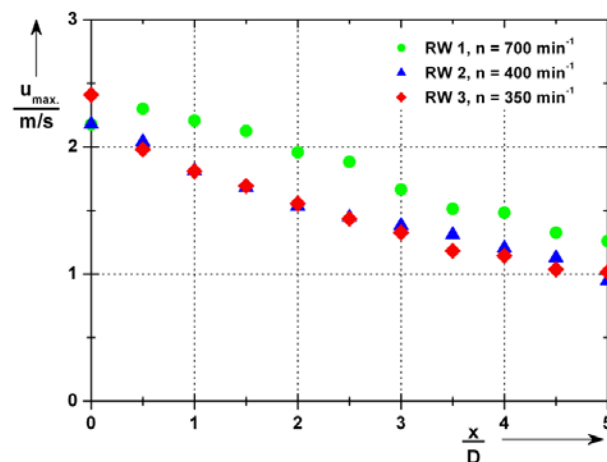


(b) Gemittelter Drehimpulsstrom

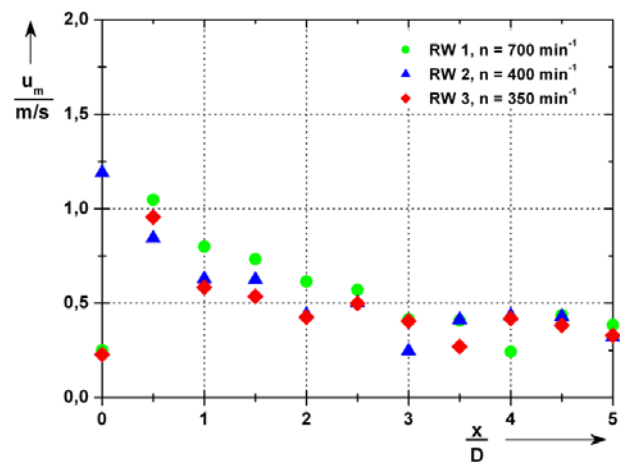
Abb. 7: Vergleich der Impulsströme von RW 1, RW 2, RW 3 bei gleichem Schub $\dot{i} \approx 220 \text{ N}$

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 $\dot{i} \approx 220 \text{ N}$ 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 $S = 0,056 \pm 15\%$.



(a) Maximum der u -Komponente im Freistrah



(b) Mittlere Geschwindigkeit u_m stromabwärts

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

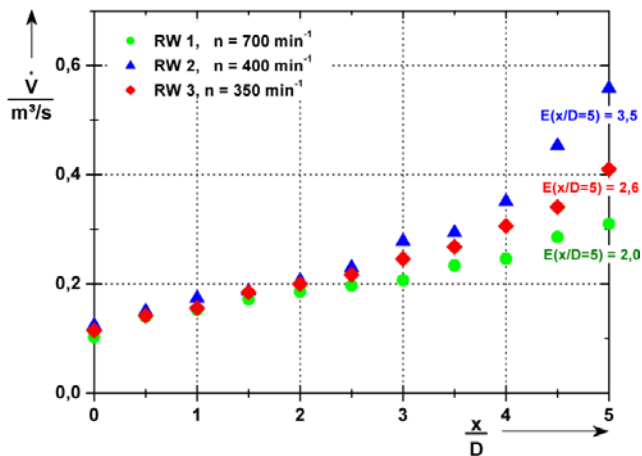


Abb. 9: Volumenstromvergleich bei $\dot{i} \approx 220 \text{ N}$

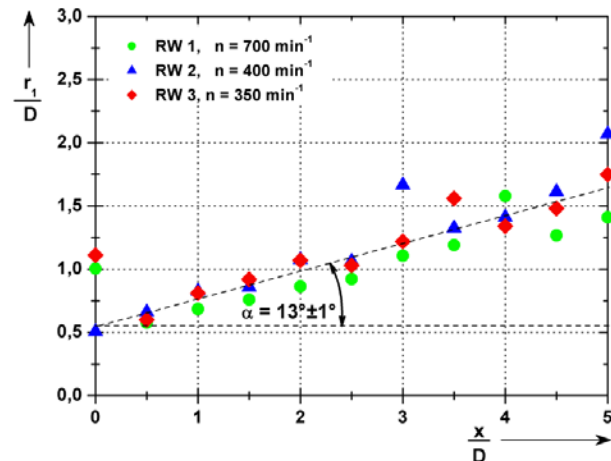


Abb. 10: Strahlaufweitung und resultierender Ausbreitungswinkel

Die Rührwerke RW 2 und RW 3 zeigen keine Unterschiede in der Maximalgeschwindigkeit u_{max} , wohingegen RW 1 durchweg höhere Werte aufweist (Abb. 8 a). Bei der über den Strahlquerschnitt gemittelten Geschwindigkeit u_m sind keine signifikanten Abweichungen der Rührwerke voneinander festzustellen (Abb. 8 b), abgesehen von den Werten bei $x/D = 0,0$, die aufgrund der schwierigeren Strahldurchmesserbestimmung unmittelbar hinter dem Propeller stärker streuen. Die Geschwindigkeiten vermindern sich stromabwärts, u_{max} an der Position $x/D = 5,0$ im Mittel auf 50%, u_m auf ca. 30%.

Bis $x/D = 2,0$ transportieren die Rührwerke bei gleichem Schub \dot{i} das gleiche Fluidvolumen. Bei zunehmendem Abstand vom Propeller zeigen sich Unterschiede, wobei RW 1 den geringsten und das ebenfalls zweiflügelige RW 2 den höchsten Volumenstrom \dot{V} der drei Rührwerke aufweist. Die Entrainmentraten E verhalten sich äquivalent: RW 1 besitzt mit $E = 2,0$ den geringsten Wert, RW 3 liegt mit $E = 2,6$ im mittleren Bereich, und RW 2 mit $E = 3,5$ schafft es, die größte Menge ruhenden Fluids mitzureissen. Diese Zahlen für E im Abstand $x/D = 5,0$ sind in Abb. 9 eingetragen.

Bei den in Abb. 10 dargestellten normierten Strahlradien zeigt das Rührwerk RW 1 tendenziell geringere Werte als die übrigen, deren Werte nicht signifikant voneinander abweichen. Die auf die Strahlachse bezogenen Ausbreitungswinkel α werden durch Regression ermittelt.

Tab. 4: Ergebnisübersicht Rührwerke bei gleichem Schub \dot{i}

Rührwerk		RW 1	RW 2	RW 3
gemittelter Propellerschub	\dot{i} / N	215	232	211
Drehzahl	$n / \text{U/min}$	700	400	350
max. Geschwindigkeit	$u_{max} / \text{m/s}$	2,3	2,2	2,4
Bezugsgeschwindigkeit	$u_0 / \text{m/s}$	1,4	1,2	0,9
Reynolds-Zahl	Re	$4,8 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$
Bezugsvolumenstrom	$\dot{V}_0 / \text{m}^3/\text{s}$	0,10	0,12	0,12
Entrainmentrate	$E_{x=5D}$	2,0	3,5	2,6
gemittelter Drehimpulsstrom	\dot{L} / Nm	3,7	4,7	4,9
gemittelte Drallzahl	S	0,05	0,06	0,06
Strahlausbreitungswinkel	$\alpha / 1^\circ$	13 ± 1		

Für alle Rührwerke ergibt sich daraus der Winkel $\alpha = 13^\circ \pm 1^\circ$, 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 Düsenfreistrahls mittels Laser-Doppler Anemometrie“, eine Studie im Auftrage der Daimler-Chrysler AG/Verfahrensentwicklung Sindelfingen, Ism-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, Ism-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 Freistrahls“ 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