

## LDA-UNTERSUCHUNGEN AN EINEM VERDRALLTEN FREISTRAHL

### LDA-MEASUREMENTS IN AN UNCONFINED SWIRLING JET

**M. Sieg, F. Hüttmann, A. Leder**

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

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

#### Zusammenfassung

Vorgelegt wird eine Versuchsanordnung, bei der mit Hilfe eines 3D-Unterwasser-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) Geschwindigkeitsfelder von Propellerfreistrahlen vermessen werden. Aus diesen Daten werden Ergebnisse gewonnen, die in einem Ähnlichkeitsansatz zur allgemeinen Beschreibung verdrallter Freistrahler formuliert werden sollen. Erste Ergebnisse werden präsentiert.

#### Einleitung

Propellerfreistrahler finden seit langem vielfältige Anwendungen – von der Antriebstechnik über Reinigungsprozesse in Tauchbädern 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. Daher werden sie bisher großzügig nach Erfahrungswerten ausgelegt. Es besteht der Bedarf, detaillierte Kenntnisse über die Strömungsverhältnisse und das Ausbreitungsverhalten eines Propellerfreistrahlers zu erlangen. Ziel der Untersuchungen ist es, einen Ähnlichkeitsansatz für die Ausbreitung eines verdrallten Freistrahlers zu gewinnen. Mit diesem soll es unter Eingabe weniger Parameter möglich werden, eine vollständige, realitätsnahe Wiedergabe der Strömungsverhältnisse zu erreichen und Propeller optimiert zu dimensionieren. In dieser Arbeit wird das Strömungsfeld von Tauchmotorrührwerken mit verschiedenen Propellergeometrien und bei mehreren Drehzahlen räumlich hochaufgelöst erfaßt. Zum Einsatz kommt ein LDA-Meßsystem [1] mit tauchbarer Sonde in einem 340 m<sup>3</sup>-Wasserbecken.

Untersuchungsobjekte dieses Projektes sind Rührwerkspropeller, wie sie von einem großen deutschen Unternehmen hergestellt werden. Diese Rührwerke besitzen bei der sicheren, umweltgerechten Behandlung großer Abwassermengen in Klärwerken eine Schlüsselrolle: Einerseits darf es nicht durch mangelnde Fluidbewegung zu einem Absterben der Biologie in den Becken 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 die Klärung nützlichen Mikroorganismen durch zu hohe Schubspannungen beeinträchtigt werden.

#### Versuchsaufbau mit tauchbarem LDA-System

Um Freistrahler untersuchen zu können, sollten zwei Bedingungen erfüllt sein. Erstens benötigt der Strahl genügend Raum, um sich ungestört ausbreiten zu können. Hierzu befindet sich der strahlerzeugende Propeller in einem Becken mit 800 m<sup>3</sup> Wasser (siehe Abb. 1).

Zweitens soll das Geschwindigkeitsfeld mit einer hohen Genauigkeit gemessen werden, ohne die Strömung zu beeinflussen. Zum Einsatz kommt eine speziell entwickelte Unterwasser-Sonde für Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ein; von diesen tauchbaren LDA-Systemen existieren bislang nur zwei weltweit [2]. Es verfügt, als Drei-Komponenten-LDA, über drei Strahlenpaare, deren Wellenlängen 476 nm, 488 nm und 514 nm von einem Argon-Ionen-Laser erzeugt und durch Glasfasern zur Meßsonde geführt werden [3]. Der Schnittpunkt der Laser-Strahlen bildet ein Meßvolumen von ca. 200  $\mu\text{m}$ , in dem der Betrag und die Richtung der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden (Abb. 2).



Abb. 1 a: Versuchsbecken

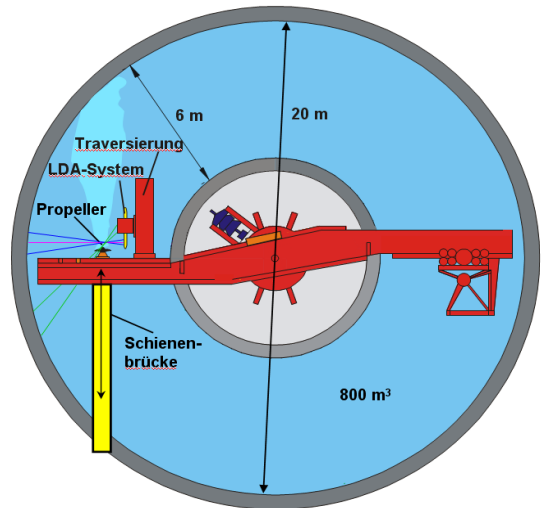


Abb. 1 b: Schematische Darstellung [4]

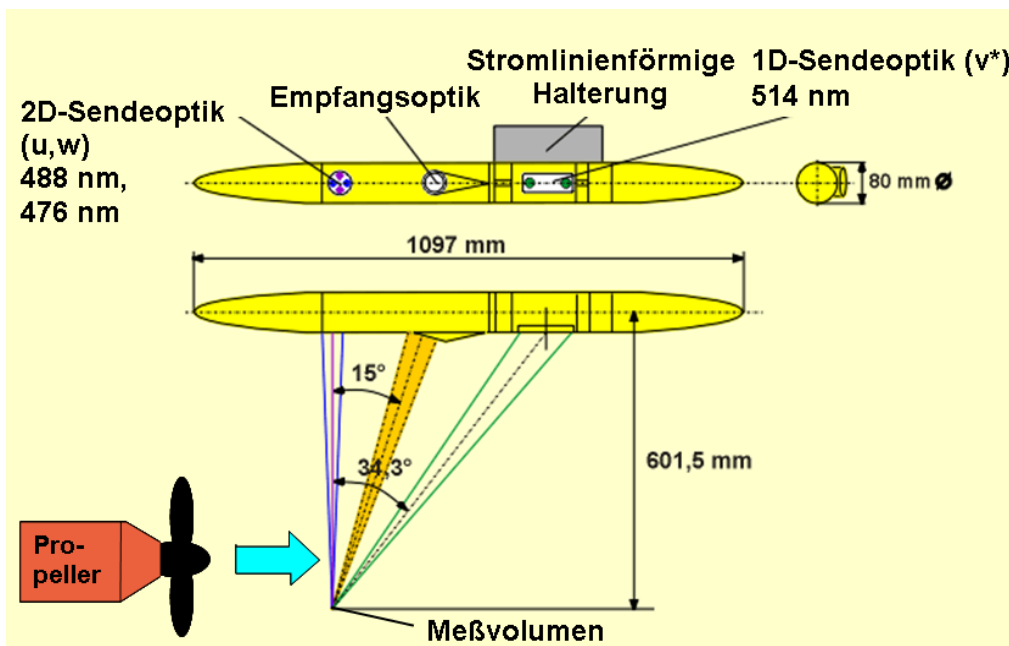


Abb. 2: Tauchbare LDA-Meßsonde

Um eine dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung zu erhalten, ist es notwendig, den Freistrahlpunkt für Punkt abzutasten. Dies erfolgt durch das Abfahren eines vordefinierten Meßgitters: die LDA-Sonde wird mit Schrittmotoren auf Traversen automatisch positioniert. Das Meßgitter ist in seinen Abmessungen dem erwarteten Strahlverlauf angepaßt (Abb.7). Um bei der Auswertung korrekt interpolieren zu können, werden die einzelnen Meßebenen nach der Messung auf äquidistante, gleichgroße Gitter interpoliert. Für Messungen im Fern-

feld, die über den Verfahrbereich der LDA-Traverse hinausgehen, kann der Propeller zusätzlich auf einer Schienenbrücke verschoben werden. Sowohl die Steuerung der Versuchsparmeter als auch die Datenerfassung erfolgt mit Hilfe von Computern. Das von den Streuteilchen reflektierte Licht gelangt aus der Meßsonde durch Glasfasern zu Sekundärelektronenvervielfachern (Photomultipliern), deren Ausgangssignale von Spektrumanalysatoren (BSAs) vorverarbeitet werden. Der schematische Signalverlauf ist in Abbildung 3 dargestellt.

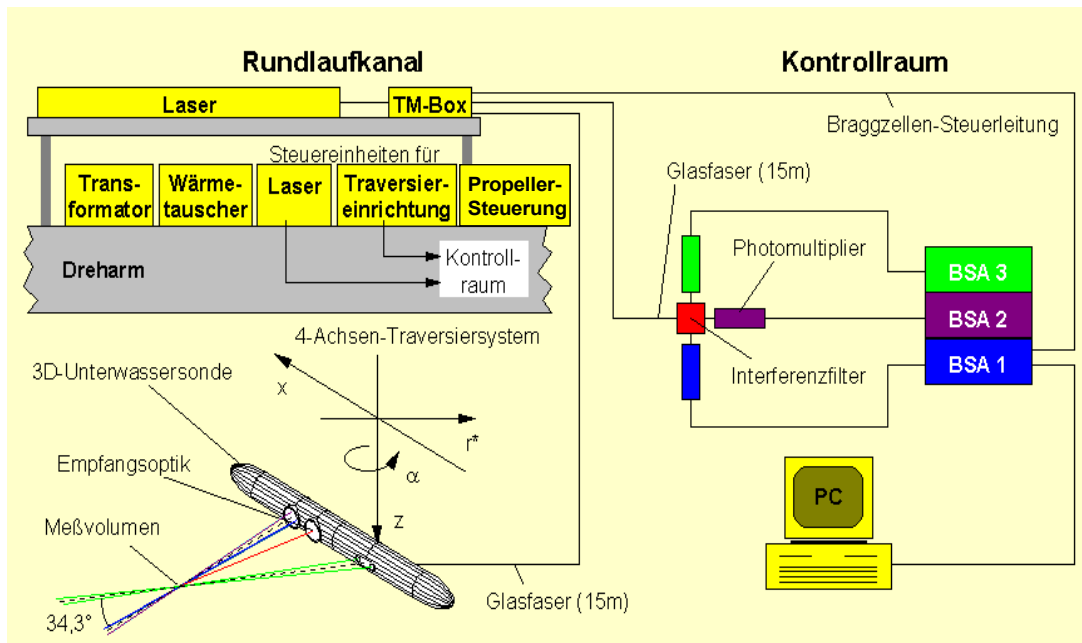


Abb. 3: Signalverlauf im LDA-System

## Experimentelle Parameter

Um auch außerhalb des verdrehten Freistrahls eine möglichst geringe Beeinflussung zu erreichen, sind sowohl die LDA-Sonde als auch ihre Halterung („Schwert“) strömungsgünstig geformt [5]. Der Koordinatenursprung befindet sich auf der Nabenspitze des Propellers (Abbildung 4).

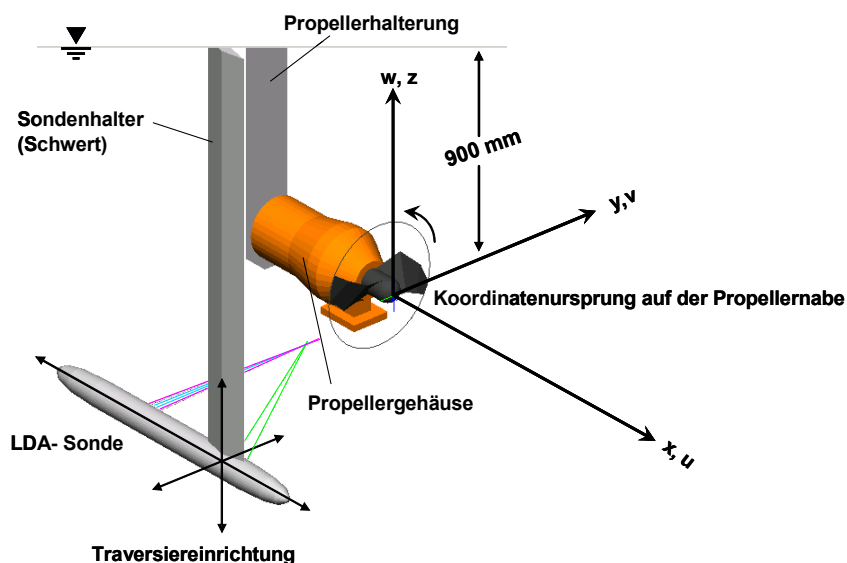


Abb. 4: Definition des Koordinatensystems

Die im nächsten Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurden an einem zweiflügeligen Tauchmotorrührwerk TR36 in Originalkonfiguration gewonnen. Sein Propeller besitzt einen Durchmesser von 0,36 m und eine Nenndrehzahl von 1.400 U/min. bei 50 Hz (siehe Abb. 5 a).

Eine exakte Einhaltung der Propellerdrehzahl ist Voraussetzung für reproduzierbare Meßergebnisse und wird durch die Ansteuerung des Propellermotors durch einen Frequenzumrichter gewährleistet. Da der Propeller in Wasser läuft ( $T \cong 17^\circ\text{C}$ ), muß ein Schlupf zwischen ihm und dem elektrischen Drehfeld ausgeglichen werden. Die hierfür aufgenommene Drehzahlkennlinie ist in Abb. 5 b dargestellt.

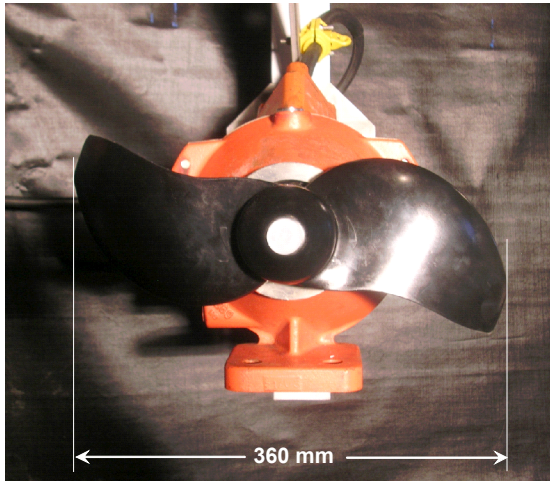


Abb. 5 a: Propeller (TR 36)

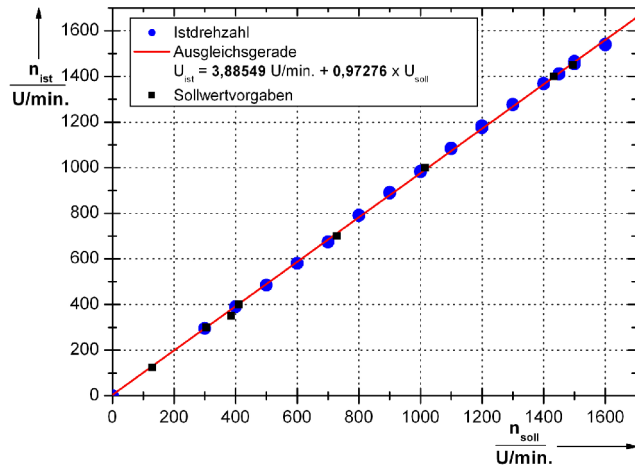


Abb 5 b: Drehzahlkalibrierung

Der Freistrahл befindet sich in einem ringförmigen Becken (ehem. Rundlaufkanal). Das Beckenfluid wird durch den Impulseintrag des Freistrahls mit der Zeit in Bewegung versetzt. Zur Bestimmung dieser Grundströmung wurden sowohl Messungen außerhalb des Freistrahls durchgeführt als auch im Strahlbereich unmittelbar nach dessen Abschaltung. Da im weiteren Projektverlauf auch andere Propellerdrehzahlen untersucht werden, fanden diese Messungen bei 700 U/min., 1.000 U/min. und 1.400 U/min. statt. Es zeigte sich, daß die Grundströmung einen Wert von 1,2% der maximalen Freistrahlgeschwindigkeit nicht überschreitet (Abb. 6 a) und in den Nachtstunden zwischen den Messungen wieder auf Null abklingt (Abb. 6 b). Trotz dieses geringen Einflusses wird der Propeller vor Beginn einer neuen Messung laufengelassen, bis sich sicher ein stationärer Zustand eingestellt hat.

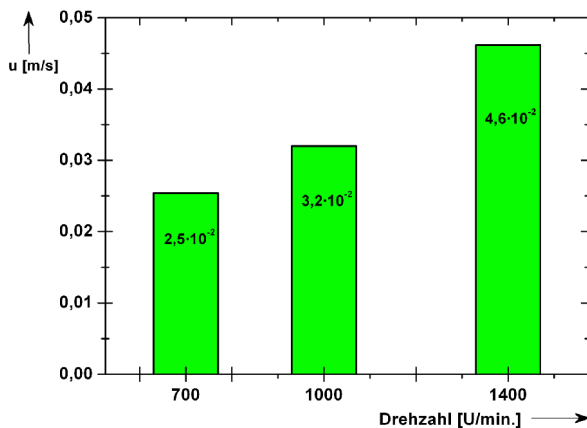


Abb. 6 a: Grundströmung außerhalb des Freistrahls

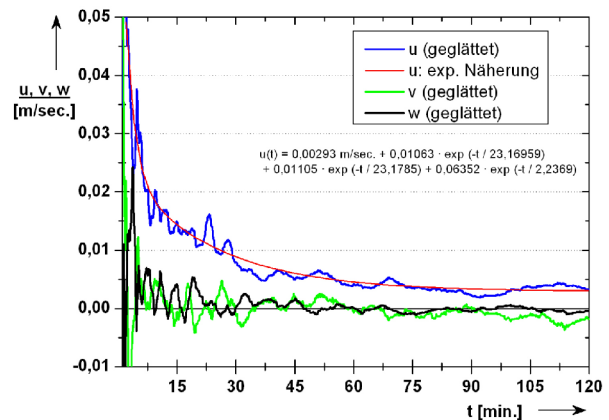


Abb. 6 b: Abklingen der Beckenströmung

Die Abmessungen des kartesischen Meßgitters wurden unter Berücksichtigung des Freistrahlausbreitungsverhaltens so gewählt, daß während des geplanten Meßzeitraums eine maximale Punktedichte erreicht wird. Außerdem enthält das Meßgitter einen durchgehenden Bereich mit besonders hoher Auflösung in der Nähe des Strahlmittelpunktes:  $\Delta y = 0,0125 \cdot D$  und  $\Delta z = 0,1000 \cdot D$ , bezogen auf den Propellerdurchmesser. Jede Meßebeine besteht aus 1.147 Meßpunkten, 37 in y-Richtung und 41 in z-Richtung, die jeweils 15 s lang abgetastet werden (Abb. 7).

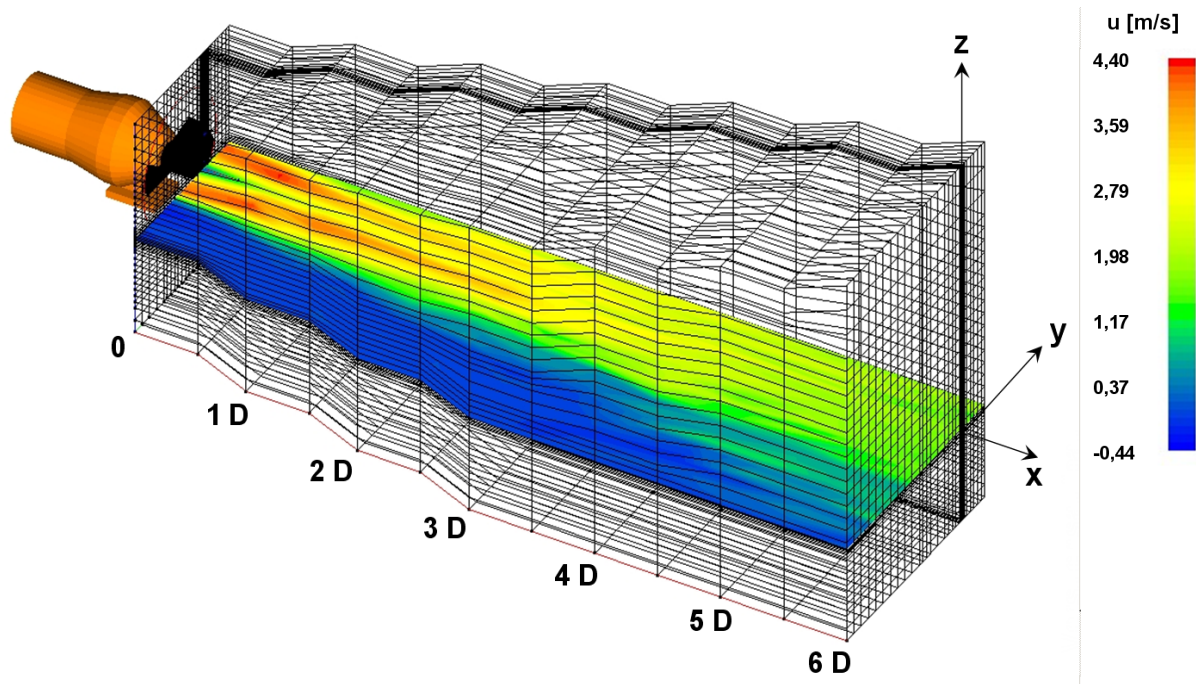


Abb. 7: Aufbau des freistrahlangepaßten Meßgitters

## Erste Ergebnisse

Die Strahlprofile unmittelbar hinter dem Propeller zeigen die typische Nachlaufdüse hinter der Nabe. Die Maximalgeschwindigkeit in x-Richtung wird in diesem Fall bei 60% des Propellerdurchmessers erreicht (Abb. 8 a). Um zu zeigen, daß dies und die Form des Strahlprofils von der Drehzahl weitgehend unabhängig ist, wurden die Profile der Drehzahlen auch mit der Maximalgeschwindigkeit normiert dargestellt (Abb. 8 b).

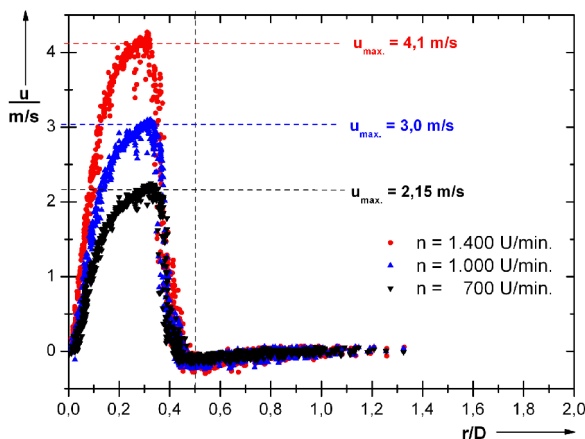


Abb. 8 a: Strahlprofile direkt hinter dem Propeller

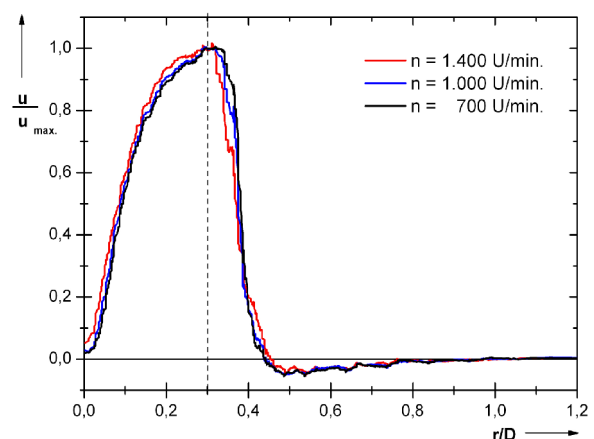


Abb. 8 b: Normierte Strahlprofile bei drei Drehzahlen



Die Abbildung 9 a zeigt die u-Geschwindigkeit farbig codiert, sowie die, den Drall kennzeichnenden Vektoren aus der v- und w-Komponente in der Ebene x/D = 0,0 (Nabenspitze). Die Nachlaufdelle zeigt sich deutlich im Strahlmittelpunkt, ebenso der durch die Propellerrotation im Gegenuhrzeigersinn erzeugte Drall. Der Einfluss des Motorfußes ist zu erkennen (vgl. Abb. 9 b). Die Isotachenlinie u = 0,1 m/s wurde benutzt, um aus der mittleren Geschwindigkeit und der Strahlfläche den Impulsstrom (Schub) des Propellers zu bestimmen:

$$\dot{I} = \rho \cdot u^2 \cdot A = 732 \text{ N}$$

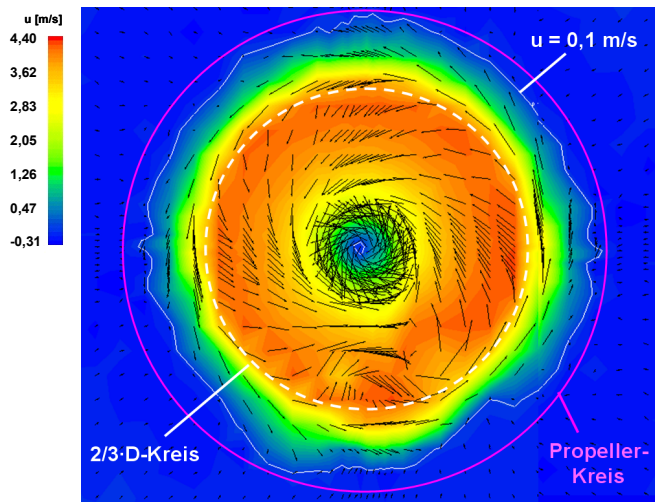


Abb. 9 a: Darstellung von u und v+w

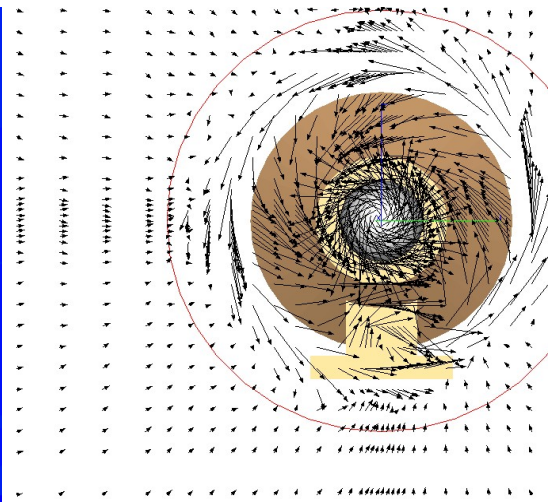


Abb. 9 b: Geschwindigkeit in der y-z-Ebene

Die Entwicklung des Freistrahls, mit zunehmendem Abstand vom Propeller, ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Graphik zeigt die zu erwartende Aufweitung bei gleichzeitiger Kontraktion des Strahlkerns.

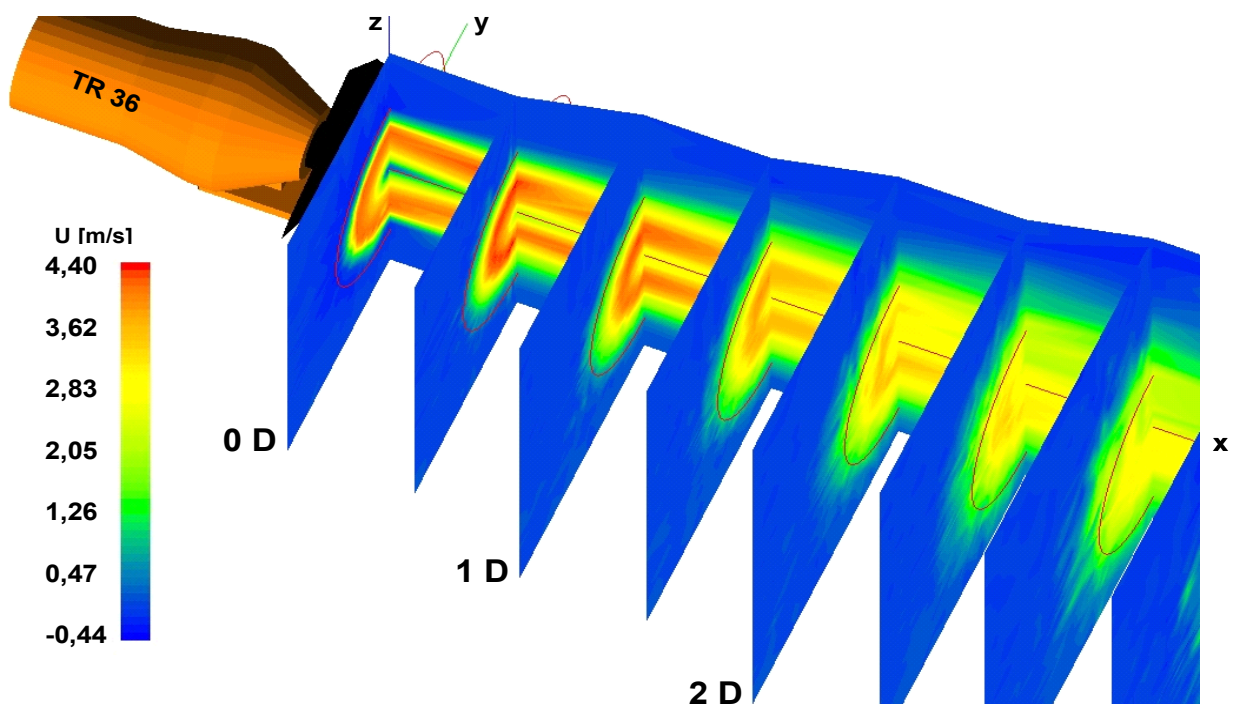


Abb. 10: Veranschaulichung der Strahlentwicklung hinter dem Propeller

Es wurden Messungen bis zu der Stromabkoordinate  $x/D = 9,0$  durchgeführt und die Strahlprofile bestimmt. Die maximale Geschwindigkeit nimmt mit dem Abstand vom Propeller ab und wandert zur Strahlachse, bis sich das Profil ab  $x/D = 3,5$  von dem eines unverdrallten Düsenfreistrahls nicht mehr unterscheidet (Abb. 11 a); dies ist besonders gut an den normierten Strahlprofilen in Abbildung 11 b zu erkennen. Das Profil  $x/D = 0,0$  wurde über  $r/D$  aufgetragen. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von  $2,52 \text{ m/s}$  in der  $0D$ -Ebene ergibt sich mit der charakteristischen Länge  $D = 0,36\text{m}$  und einer Wassertemperatur von  $17^\circ\text{C}$  eine Reynolds-Zahl von

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} = 8,2 \cdot 10^5$$

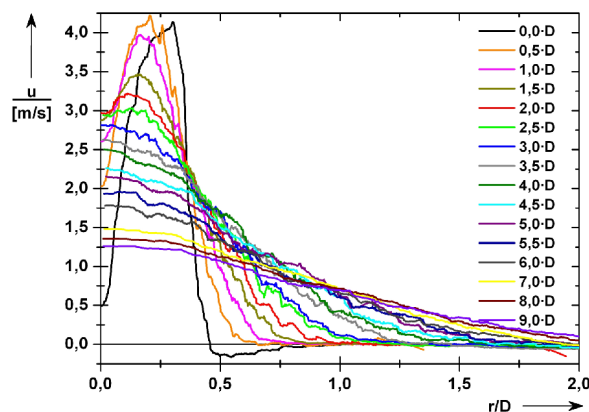


Abb. 11 a: Strahlprofile bei Nenndrehzahl

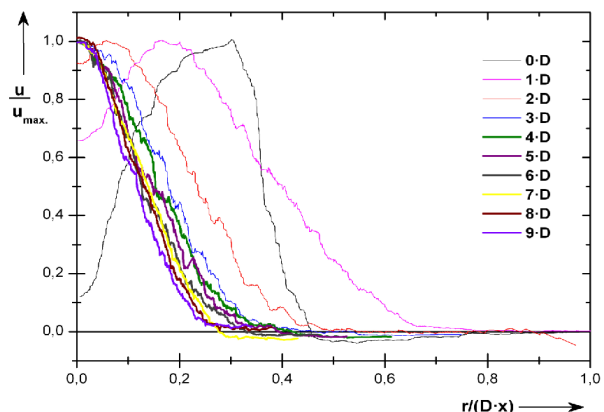


Abb. 11 b: Normierte Profile

Die turbulente kinetische Energie (Abb. 12) über dem Radius zeigt in Propellernähe einen anderen Verlauf als bei einem Düsenfreistrahls; es treten höhere Spitzen und stärkere Schwankungen auf. Aus den Strahlradien wurde der Ausbreitungswinkel bestimmt; wobei sich kein wesentlicher Unterschied daraus ergibt, ob die freie Strahlgrenze bei einer Geschwindigkeit von Null oder bei 1% der Maximalgeschwindigkeit an der jeweiligen  $x$ -Position angesetzt wird (Abbildung 13): Es ergibt sich  $\Psi = 13,8^\circ$ , ähnlich wie beim runden, unverdrallten Freistrahls mit einem Mischungsfaktor von  $0,3$  [6].

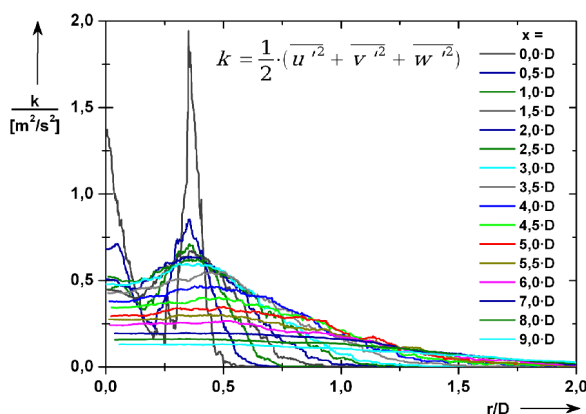


Abb. 12: Turbulente kinetische Energie  $k$

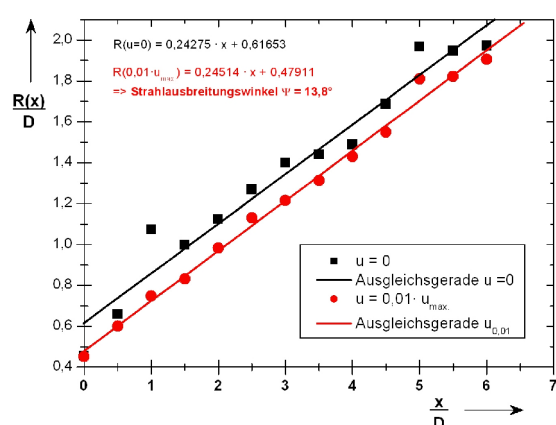


Abb. 13: Strahlradius

Erwartungsgemäß kommt es zu einem Anwachsen des Strahlvolumenstroms durch mitgerisenes Sekundärfluid („Entrainment“): im Abstand von  $8D$  hat sich die Menge des bewegten Wassers im Strahl vervierfacht (Abb. 14). Der im Strahlquerschnitt vorhandene Impulsstrom sollte in jeder Entfernung den gleichen Wert behalten, bis ihn schließlich die Dissipation aufzehrt. Zumindest zeigt die Messung keine Abnahme bis  $5D$ ; danach wird vermutlich die Auflösung des Meßsystems unterschritten (siehe Abb. 15).

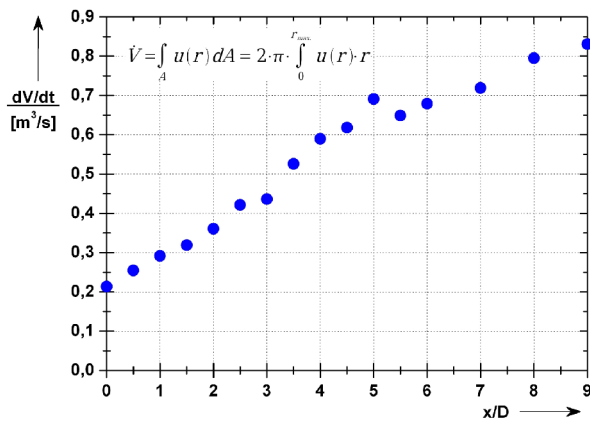


Abb. 14: Volumenstrom längs der Strahlachse

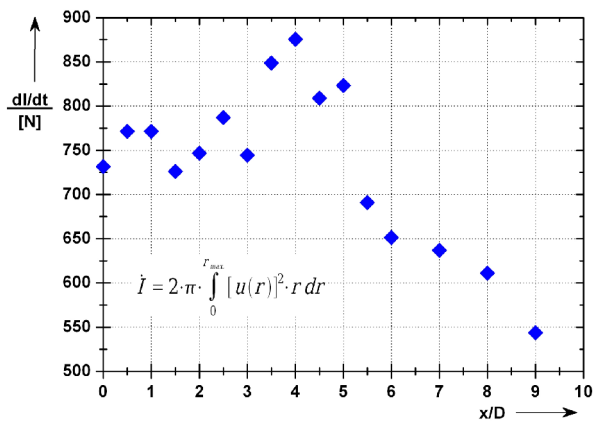


Abb. 15: Impulstrom

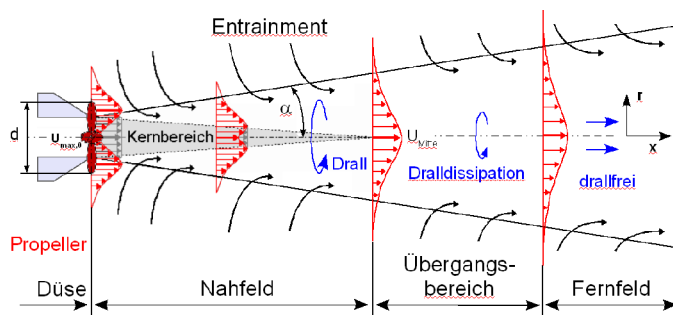


Abb. 16: Charakterisierung eines verdrehten Freistrahls

Weitere Drehzahlen – 1.000 U/min. und 700 U/min. am selben Propeller sind bereits gemessen – befinden sich in der Auswertung. Hieraus ergeben sich weitere Vergleichsmöglichkeiten. Im weiteren Projektverlauf werden Propeller mit anderen Geometrien – ebenfalls bei verschiedenen Drehzahlen - untersucht, die alle auf den charakteristischen Durchmesser  $D = 0,36$  m skaliert wurden. Die daraus gewonnenen Volumenda-

tensätze mit den höheren Ordnungen werden Vergleiche untereinander und mit Düsenfreistrahlen erlauben. Bereits jetzt liegt es nahe, den verdrehten Freistrahls in drei Bereiche zu charakterisieren: Das Nahfeld, den Übergang noch mit Drall aber bereits gaußförmigem Strahlprofil und das Fernfeld, das dem eines Düsenfreistrahls entspricht. Hieraus soll dann ein allgemeingültiger Ähnlichkeitsansatz für verdrehte, isotherme Freistrahls abgeleitet werden.

## Dankesworte

Mein Dank gilt Herrn Dr. M. Brede für die Diskussion und den regen, fachlichen Austausch.

## Literatur

- [1] Ruck, B.; Leder, A.: "Laser-Methoden in der Strömungsmeßtechnik", AT-Fachverlag, Stuttgart [1990], S. 101 - 130
- [2] 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.
- [3] Ruck, B.: "Laser-Doppler-Anemometrie", AT-Fachverlag, Stuttgart [1987], S. 113
- [4] Richter, F.: "Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung der Strömungs- und Wirbelstrukturen im Nachlauf eines Kreiszyylinderstumpfes unter Berücksichtigung des Einflusses einer Zentrifugalbeschleunigung" [2005], S. 21 - 24
- [5] Leder, A.; Brede, M.: Proceedings of the 12th international symposium on Applications on Laser Techniques on Fluid Mechanics [2004]
- [6] Surek, D.; Stempin, S.: "Angewandte Strömungsmechanik" [2007], S. 126