

## **Charakterisierung verdrallter Unterwasserfreistrahlen Characterisation of submerged unconfined swirling jets**

**M. Sieg, C. v. Hörsten, F. Hüttmann, A. Leder**

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

Freistrahler, verdrallt, Kennzahlen, Ähnlichkeitsansatz, Propeller, Rührwerk, Unterwasser-LDA. Swirling Jet, Characteristic Numbers, Similarity Approach, Propeller, Agitator, Submerged LDA.

### **Zusammenfassung**

Beruhend auf dem Datensatz über verdrallte Freistrahler, der im Rahmen einer Parameterstudie an Tauchmotorrührwerken mit Hilfe eines 3C-Laser-Doppler-Anemometers (LDA) mit tauchbarer Sonde gewonnen und in früheren Arbeiten bereits vorgestellt wurde, erfolgt die Charakterisierung des Strömungsfeldes dieser Unterwasser-Drallstrahler anhand definierter Kenngrößen. Die dabei erzielten Ergebnisse sollen in einen Ähnlichkeitsansatz zur allgemeinen Beschreibung von Propellerfreistrahler münden.

### **Einleitung**

Verdrallte Freistrahler finden seit langem vielfältige Anwendungen – von der Antriebstechnik (z. B. Flugzeugtriebwerke und Schiffspropeller) über Reinigungsprozesse in Tauchbädern bis hin zu Mischungs- und Rührvorgängen der Verfahrenstechnik oder Abwasserbehandlung. Um den steigenden Anforderungen an die Energie- und Materialeffizienz bei gleichzeitig höchster Zuverlässigkeit genügen zu können, ist es notwendig, die hierbei eingesetzten, drallstrahlerzeugenden Propeller noch besser als bisher an das jeweilige Einsatzgebiet anzupassen. Hierzu bedarf es detaillierter Kenntnisse über das Strömungsfeld und Ausbreitungsverhalten des erzeugten Freistrahlers. In vorangegangenen Arbeiten wurde der Aufbau eines Experiments für dreikomponentige Unterwasser-LDA-Messungen [6] sowie die Auswertung der dabei anfallenden umfangreichen Datenmenge von insgesamt mehr als 130.000 Messpunkten [7] behandelt. Zum Einsatz kamen vier moderne Tauchmotorrührwerke mit unterschiedlichen Propellergeometrien, wie sie im Bereich der Abwassertechnik eingesetzt werden. Rührwerke besitzen bei der umweltgerechten Behandlung großer Abwassermengen in Klärwerken eine Schlüsselrolle. Einerseits darf es nicht durch mangelnde Fluidbewegung und einer damit verbundenen unzureichenden Durchmischung zu einer Beeinträchtigung der Biologie in den Klärbecken kommen, andererseits sollen die im Dauerbetrieb laufenden Rührwerke möglichst energieeffizient arbeiten. Die hier durchgeführte Studie beinhaltet jeweils drei verschiedene Drehzahlen für jedes Rührwerk. Das Ziel der aktuellen Untersuchungen ist es, einen Ähnlichkeitsansatz für die Ausbreitung verdrallter Freistrahler zu gewinnen. Mit diesem soll es unter Eingabe weniger Parameter möglich werden, die Strömungsverhältnisse vollständig und realitätsnah wiederzugeben und den Einsatz der Propeller-rührwerke zu optimieren.

## Versuchsparameter

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Parameter der eingesetzten Tauchmotorrührwerke. Die Rührwerke RW 1, RW 2 und RW 3 wurden mit Propellern des Durchmessers  $D_1$  versehen. Um eine Ähnlichkeit auch über die Variation der geometrischen Skalierung nachzuweisen, kam ein viertes Rührwerk RW 4 mit einem Propellerdurchmesser  $D_2$  zum Einsatz. Jedes Rührwerk wurde mit drei verschiedenen Drehzahlen  $n$  gefahren, wobei eine Drehzahl für alle Rührwerke gleich gewählt wurde (vgl. Tab. 1). Um eine Vergleichbarkeit auch hinsichtlich der Axialimpulsströme bei RW 1, RW 2 und RW 3 zu erreichen, wurden Drehzahlen eingestellt, bei denen diese geometrisch unterschiedlichen Rührwerke den gleichen Schub entwickeln. Die Drehzahl  $n_{4,3}$  RW 4 ergab sich aus dem Wunsch, dieses Rührwerk mit der Netzfrequenz  $f = 50$  Hz zu betreiben.

$$n_{1,1} = n_{2,3} = n_{3,3} = n_{4,1}$$

$$\dot{i}(n_{1,1}) = \dot{i}(n_{2,2}) = \dot{i}(n_{3,1})$$

Tab. 1: Parameter der untersuchten Tauchmotorrührwerke

| Rührwerktyp: | RW 1        |           |           | RW 2        |           |           | RW 3        |           |           | RW 4        |           |           |
|--------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| Propeller:   | Geometrie 1 |           |           | Geometrie 2 |           |           | Geometrie 3 |           |           | Geometrie 1 |           |           |
| Durchmesser: | $D_1$       |           |           | $D_1$       |           |           | $D_1$       |           |           | $D_2$       |           |           |
| Drehzahlen:  | $n_{1,1}$   | $n_{1,2}$ | $n_{1,3}$ | $n_{2,1}$   | $n_{2,2}$ | $n_{2,3}$ | $n_{3,1}$   | $n_{3,2}$ | $n_{3,3}$ | $n_{4,1}$   | $n_{4,2}$ | $n_{4,3}$ |

Es wurde eine Abschätzung nach Gl. 1 der Reynolds-Zahl für die Propellerblatsumströmung unter Vernachlässigung der induzierten Geschwindigkeiten und der Grundströmung im Becken durchgeführt.

$$Re(r) = \frac{u_E(r) \cdot l_m(r)}{\nu} \quad (1)$$

mit mittlerer geometrischen Flügeltiefe:  $l_m$

Propellerblattanströmgeschwindigkeit:  $u_E = 2\pi r \cdot \frac{n}{60}$

In einer früheren Arbeit wurde nachgewiesen, dass die Drehzahlabhängigkeit von Schub  $\dot{i}$  und Drehmoment  $\dot{L}$  bei allen vorgegebenen Parametern einem quadratischen Zusammenhang folgt [7]. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass auch bei den niedrigen Drehzahlen eine überkritische Propellerblatsumströmung vorliegt. Abb. 1 zeigt schematisch ein Rührwerk sowie die traversierbare LDA-Sonde, die sich außerhalb des propellerinduzierten Freistrahls ebenfalls unter Wasser befindet. Beide Komponenten arbeiten in einem Becken mit  $800 \text{ m}^3$  Wasserinhalt, so dass eine weitgehend ungestörte Strahlausbreitung bei minimaler Anströmung gewährleistet ist. Das LDA-Messverfahren erfordert ein transparentes Medium. Aus diesem Grund wurde als Fluid für die Experimente Leitungswasser verwendet, das die optischen Anforderungen bestens erfüllt, kostengünstig verfügbar

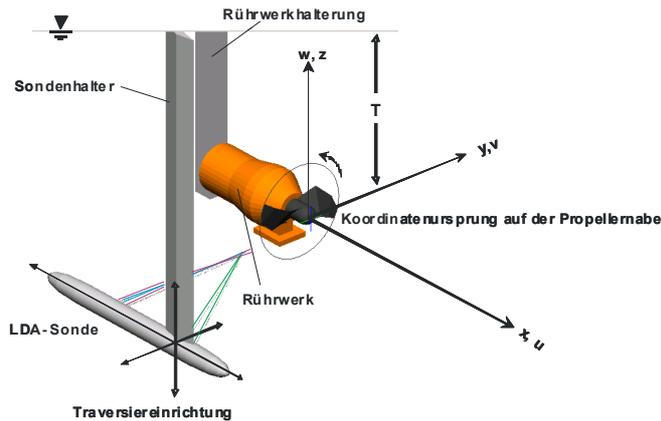


Abb. 1: Definition des Koordinatensystems

Tab. 2: Fluideigenschaften

| Medium:          |                               | Wasser                  |
|------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Temperatur:      | $T/^\circ\text{C}$            | 18                      |
| Dichte:          | $\rho/\text{kgm}^{-3}$        | 998,59                  |
| kin. Viskosität: | $\nu/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ | $1,05422 \cdot 10^{-6}$ |
| dyn. Viskosität  | $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$  | $1,05237 \cdot 10^{-3}$ |

ist, bei dem gegebenen Volumen vernachlässigbare Temperaturschwankungen aufweist und ausreichend natürliche Streuteilchen enthält (siehe Tab. 2). Diese Näherung hinsichtlich der Dichte und des Partikelgehalts ist möglich, da dem Abwasser in Belebungsbecken einer biologischen Reinigungsstufe – einem typischen Einsatzort von Rührwerken – nach dem Durchlaufen der mechanischen Reinigungsstufe (Feinrechen, Sandfang) und dem Vorklärbecken die Grobstoffe bereits entzogen sind, so dass ein weitgehend homogenes Fluid vorliegt, dessen Dichte sich nur geringfügig von der reinen Wassers unterscheidet.

## 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. Weiterhin wurde als Entrainment-Grenze ein Radius  $r_E$  definiert, bei dem die Radialkomponente  $u_r$  der Geschwindigkeit einen Nulldurchgang von positiven zu negativen Werten erfährt. Die positive Radialgeschwindigkeit  $u_r$  bei Abständen von der Strahlachse  $r < r_E$  ist für die Strahlaufweitung verantwortlich, während ein negatives  $u_r$  am Strahlrand für das Entrainment, das Mitreißen von ruhendem Umgebungsfluid, sorgt, wodurch sich der Volumenstrom  $\dot{V}$  stromabwärts vergrößert.

$$\text{Strahlgrenze:} \quad r_1 = r \Big|_{u=1\%u_{\text{max}}} \quad (2)$$

$$\text{Bezugsradius:} \quad r_{50} = r \Big|_{u=50\%u_{\text{max}}} \quad (3)$$

$$\text{Entrainment-Grenze:} \quad r_E = r \Big|_{u_r=0} \quad \text{bei} \quad \frac{\partial u_r}{\partial r} < 0 \quad (4)$$

Die Auswertung der Geometrie des Propellerfreistrahls umfasst neben der Strahlgrenze die Bestimmung des Strahlquerschnittes  $A$  in einzelnen Messebenen  $x = \text{const.}$  sowie die Ermittlung des Strahlausbreitungswinkels  $\alpha$  aus den lokalen Strahlradien  $r_1$ . Der Durchmesser des Freistrahls  $d = 2 \cdot r_1$  bzw. sein Querschnitt  $A$  gehen wesentlich in die integrativen Größen ein.

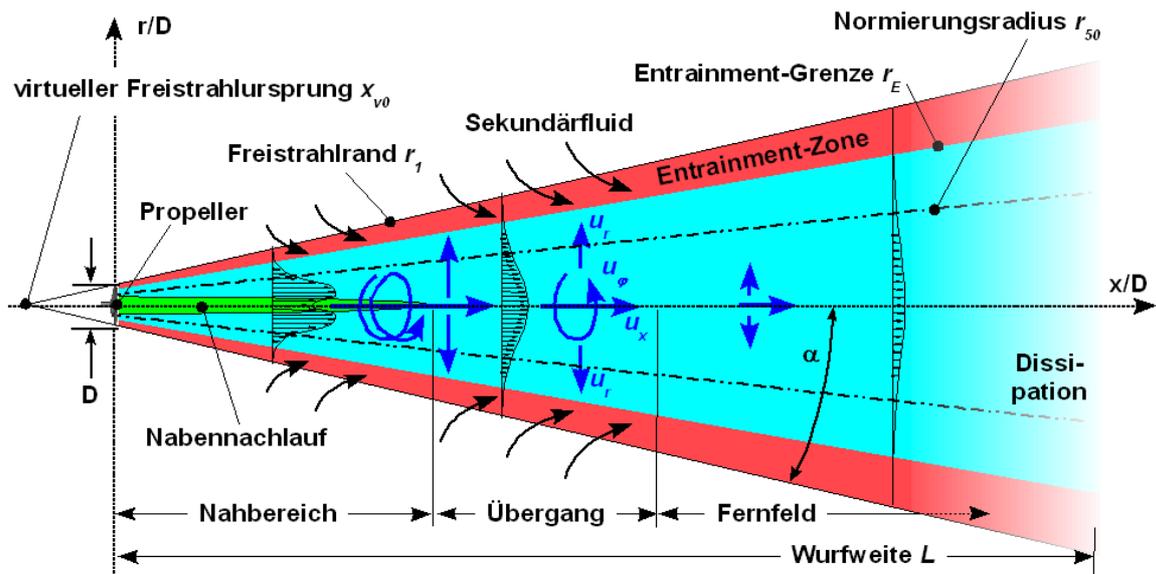


Abb. 2: Schematische Darstellung eines verdrehten Freistrahls

Für die Auswertung der einzelnen Messebenen wurde ein umfangreicher *MATLAB*-Algorithmus programmiert. Abb. 2 erläutert schematisch den Aufbau eines verdrehten Freistrahls. Im Nahbereich ist die Nachlaufdelle der Propellernabe eingezeichnet, die sich charakteristisch in den Axialgeschwindigkeitsprofilen  $u_x(r)$  zeigt.

In Abb. 3 sind die normierten Strahlradien für alle Rührwerke und Drehzahlen stromabwärts, d. h. in Abhängigkeit vom Axialabstand  $x/D$  zum Propeller dargestellt. Erwartungsgemäß entspricht in der Propellerebene der Strahlradius dem Propellerradius. Drehzahlvariationen bei den einzelnen Rührwerktypen zeigen keine signifikante Auswirkung auf die Radien, so dass die auf die Strahlachse bezogenen Ausbreitungswinkel  $\alpha$  rührwerkspezifisch durch Regression ermittelt wurden. Die Rührwerke RW 1 und RW 4, die über eine ähnliche Propellerblattgeometrie verfügen, weisen tendenziell geringere Werte auf als die beiden anderen, die sich hinsichtlich der Blattgeometrie einander ähneln, aber im Flügelprofil von den Rührwerken RW 2 und RW 3 unterscheiden. Für alle Rührwerke ergibt sich im Mittel ein Winkel  $\alpha \approx 12^\circ$ , der im Bereich der Literaturwerte für einen runden, unverdrehten Freistrahlliegt [4], [8]. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass völlig andere Profilgeometrien und Flügelanzahlen stärker abweichende Ausbreitungswinkel zur Folge haben. Der virtuelle Freistrahlsprung  $x_{v0}$  liegt in der Extrapolation für alle untersuchten Rührwerke etwa zweieinhalb Propellerdurchmesser stromaufwärts.

Die Abb. 4 zeigt ein mit dem Unterwasser-LDA-System räumlich hochauflösend vermessenes Geschwindigkeitsfeld mit seinen drei Komponenten am Beispiel des Rührwerks RW 3 bei  $n_{1,3}$ . Die einzelnen  $x/D$ -Ebenen sind mit dem Betrag der

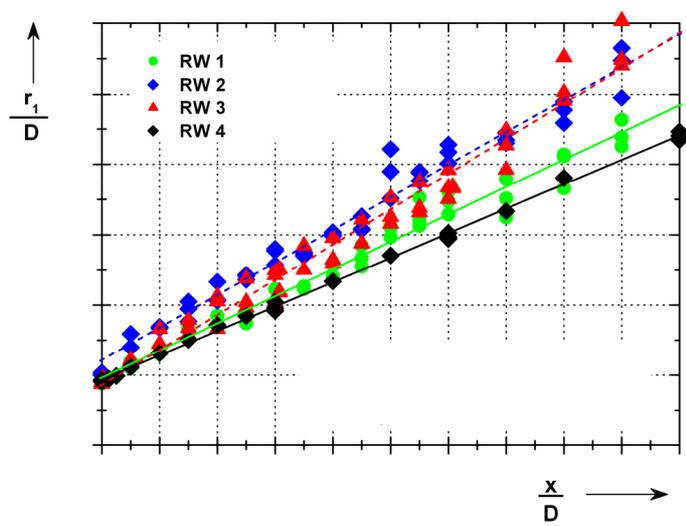


Abb. 3: Freistrahlausbreitungsverhalten  $r_1(x/D)$

lokalen Maximalgeschwindigkeit  $U_{max}$  normiert. Der Nabennachlauf ist bei der Axialgeschwindigkeit  $u_x$  bis zum Ende des Nahbereiches deutlich zu erkennen. Die Radialgeschwindigkeit  $u_r$ , deren Maximalwerte  $u_{r,max}$  etwa ein Fünftel der Axialgeschwindigkeit betragen, zeigt positive Bereiche, die für die Strahlexpansion verantwortlich sind und von einem negativen Ring umgeben werden; in diesem wird ruhendes Fluid aus der Umgebung angesaugt (Entrainment). Die Tangentialgeschwindigkeit  $u_\varphi$  weist in Propellernähe erheblich höhere Werte auf als  $u_r$ , fällt aber rascher ab: Der Drehimpulsstrom verteilt sich mit zunehmendem Abstand  $x/D$  auf einen größeren Querschnitt.

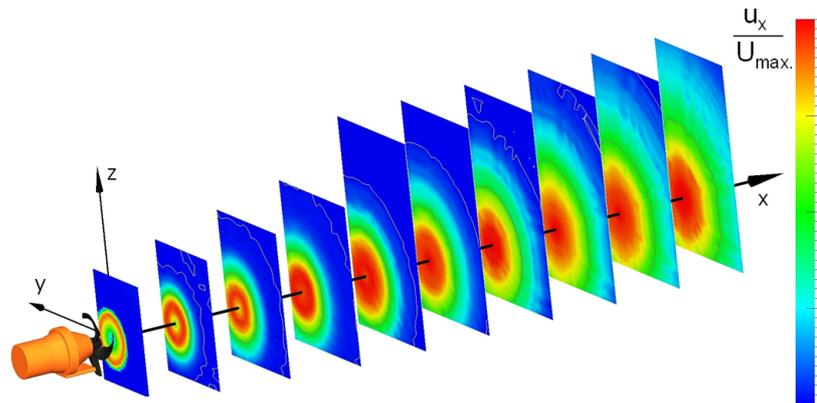


Abb. 4a: Axialgeschwindigkeit  $u_x(r, x/D)$ , RW 3, Drehzahl  $n_{3.3}$

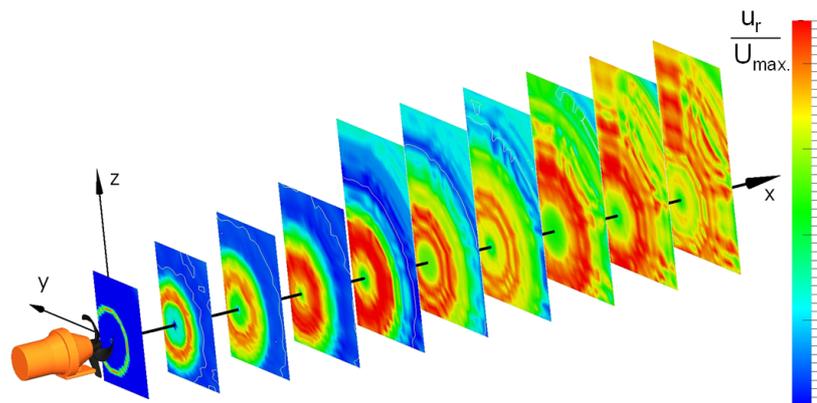


Abb. 4b: Radialgeschwindigkeit  $u_r(r, x/D)$ , RW 3, Drehzahl  $n_{3.3}$

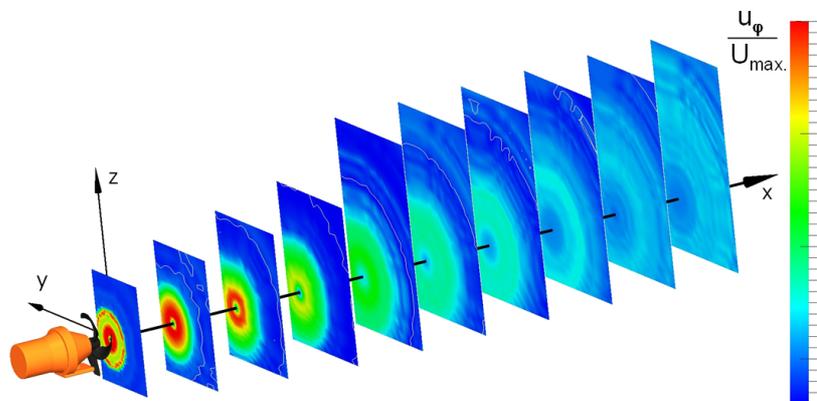


Abb. 4c: Tangentialgeschwindigkeit  $u_\varphi(r, x/D)$ , RW 3, Drehzahl  $n_{3.3}$

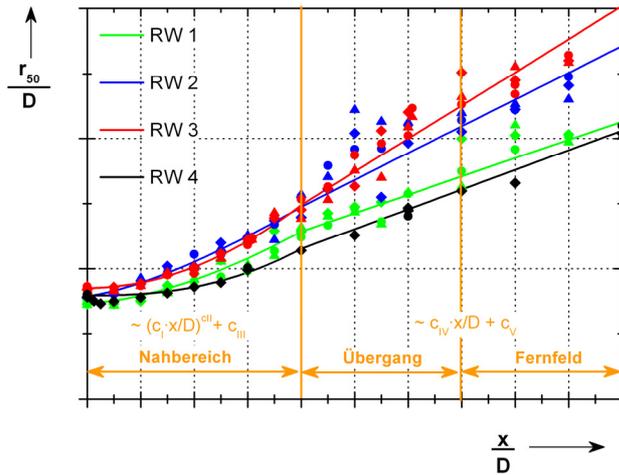


Abb. 5: Radien bei  $u_x(x/D) = 0,5 \cdot u_{x \max.}(x/D)$

der Radius  $r_{50}$ , bei dem die axiale Geschwindigkeitskomponente 50% ihres maximalen Wertes erreicht (vgl. Abb. 2). In Abb. 5 sind sämtliche  $r_{50}$ -Werte dargestellt. Da hier, wie schon bei der Strahlgrenze  $r_1$ , keine Drehzahlabhängigkeit festzustellen ist, wird  $r_{50}$  rührwerk-spezifisch durch Funktionen beschrieben. Im vorliegenden Fall genügt über den untersuchten  $x/D$ -Bereich eine Einteilung in zwei Bereiche: Im Nahbereich wird eine Exponentialfunktion angenommen, darüber hinaus, d. h. im Übergang und Fernfeld, wird  $r_{50}$  abschnittsweise gut durch eine lineare Funktion beschrieben:

$$\frac{r_{50}}{D} = \begin{cases} \left( c_I \cdot \frac{x}{D} \right)^{c_{II}} + c_{III} : & \text{Nahbereich} & (5) \\ c_{IV} \cdot \frac{x}{D} + c_V : & \text{Übergang und Fernfeld} & (6) \end{cases}$$

Nachdem  $r_{50}$  als eine Charakterisierungsgröße für die verdrallten Freistrahlen definiert und beschrieben worden ist, liegt es nahe, einen Zusammenhang zu weiteren Größen herzustellen. In Abb. 6 ist für sämtliche Untersuchungsparameter die Strahlgrenze  $r_1$  in Abhängigkeit von  $r_{50}$  aufgetragen. Da beide Größen einzeln nicht von der Drehzahl abhängen, war dies für das Verhältnis ebenfalls nicht zu erwarten. Allerdings ist der Zusammenhang  $r_1(r_{50})$  sogar unabhängig von der Propellergeometrie und kann – bis auf den Bereich in unmittelbarer Propellernähe – mit einer linearen Funktion beschrieben werden:

$$r_1 = c_{r1} \cdot r_{50} - c_{r2} \cdot D \quad (7)$$

In der Radialgeschwindigkeit  $u_r$  spiegelt sich sowohl die Strahlaufweitung (positives  $u_r$ ) als auch das Mitreißen von ruhendem Umgebungsfluid (negatives  $u_r$ , vgl. Abb. 4b). Daher wurde in den Profilen  $u_r(r)$  der Nulldurchgang im Bereich negativer Steigung als sog. Entrainment-Grenze  $r_E$  definiert. Die positiven  $u_r$ -Werte innerhalb dieser Isotachen treiben den Freistrahlaufeinander. Beim Überschreiten von  $r_E$  wird die Radialgeschwindigkeit negativ, so dass ruhendes Fluid aus der Umgebung in Richtung Freistrahlauf strömt, bis  $u_r$  bei weiter zunehmendem Abstand  $r$  schließlich Null wird. Abb. 7 zeigt, dass  $r_E$  nicht als separate Größe beschrieben werden muss, sondern auf die Normierungsgröße  $r_{50}$  zurückgeführt werden

## Zusammenhänge

Da integrale Größen, wie beispielsweise der Volumenstrom  $\dot{V}$ , der Impulsstrom  $\dot{I}$  und der Drehimpulsstrom  $\dot{L}$  bereits in einer früheren Arbeit vorgestellt wurden [7], soll das Augenmerk diesmal auf charakteristischen Größen und ihren Zusammenhängen liegen, die die Reproduktion des Strömungsfeldes mit den Strömungskomponenten Axialgeschwindigkeit  $u_x$ , Radialgeschwindigkeit  $u_r$  und Tangentialgeschwindigkeit  $u_\phi$  ermöglichen.

Entscheidend für Normierungen, insbesondere der Geschwindigkeitsprofile, ist

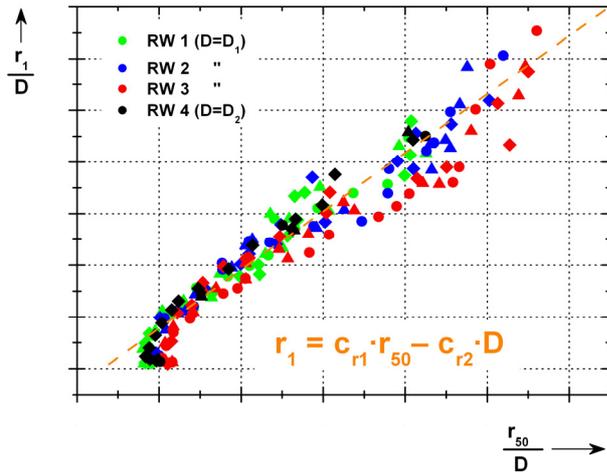


Abb. 6: Zusammenhang zwischen  $r_1$  und  $r_{50}$

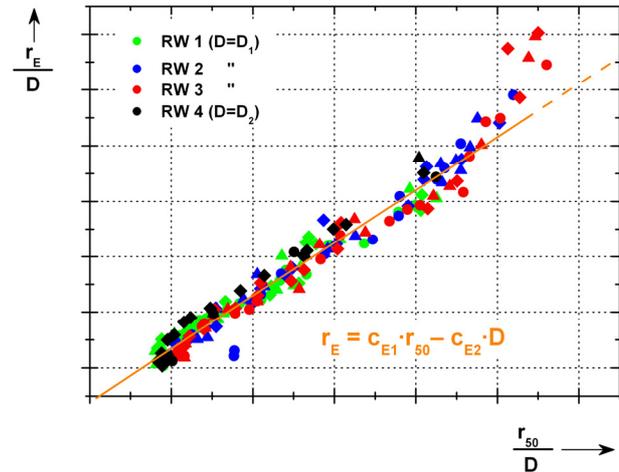


Abb. 7: Zusammenhang zwischen  $r_E$  und  $r_{50}$

kann. Wie  $r_1$  zeigt sich  $r_E$  unabhängig von Drehzahl und der Propellergeometrie, d. h. es kann auch hier ein linearer Zusammenhang angesetzt werden. Um eine sichere Aussage für sehr große axiale Abstände vom Rührwerk treffen zu können, sollten Messungen im weiteren Fernfeld berücksichtigt werden.

$$r_E = c_{E1} \cdot r_{50} - c_{E2} \cdot D \quad \text{mit} \quad c_{E2} = c_{r2} \quad (8)$$

Im folgenden Abschnitt sollen die Geschwindigkeitskomponenten eines verdrehten Freistrahls –  $u_x$ ,  $u_r$  und  $u_\varphi$  – durch Funktionen reproduziert werden. In diese Funktionen gehen u. a. die Maximalwerte der Geschwindigkeiten sowie ihr radialer Abstand von der Strahlachse ein. In Abb. 8 sind diese Werte als normierter Radius  $r_{u \max}$  für die maximale Axialgeschwindigkeit  $u_{x \max}$  alle untersuchten Rührwerke und Drehzahlen aufgetragen. Trotz der großen Streuung, die durch Strömungseinflüsse von Motoranbauteilen verursacht wird, ist zu erkennen, dass sich bei den untersuchten Propellern das Geschwindigkeitsmaximum mit zunehmendem  $x/D$ -Abstand von einem Drittel des Propellerdurchmessers zur Strahlachse hin verlagert, bis die Nachlaufdele verschwunden ist. In diesem sog. Nahbereich des verdrehten Propellerfreistrahls kann das Geschwindigkeitsprofil näherungsweise durch eine Gauß-Funktion beschrieben werden, deren Maximum nicht bei  $r/D = 0,0$  liegt, sondern bei  $r_{u \max}(x/D)$ , wie es sich aus den in Abb. 8 gezeigten Messwerten ergibt. Im Fernfeld liegt für  $u_x(r)$  ein zur Strahlachse symmetrisches Gauß-Profil vor, wie es für unverdrallte Freistrahlen typisch ist:

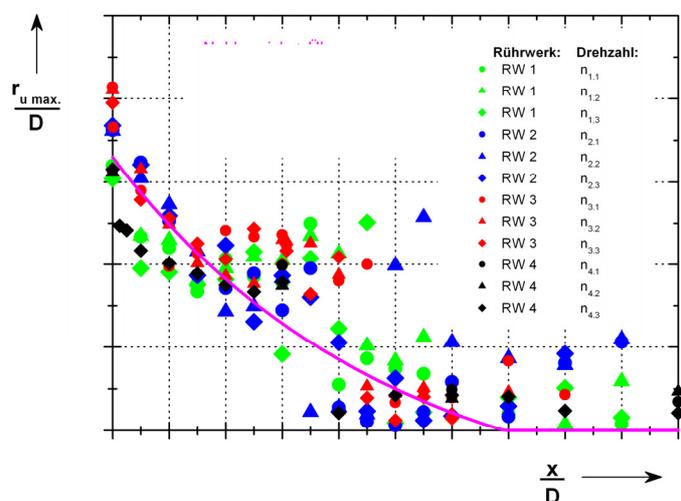


Abb. 8: Radialposition  $r_{u \max}$  der max. Axialgeschwindigkeit  $u_{x \max}$ .

$$r_{u_{\max.}}\left(\frac{x}{D}\right) = \begin{cases} k_a \cdot e^{-\frac{x}{k_b \cdot D}} - k_c & : \quad \text{Nahbereich und Übergang} \quad (9 \text{ a}) \\ \mathbf{0,0} & : \quad \text{Fernfeld} \quad (9 \text{ a}) \end{cases}$$

Die Maxima der Geschwindigkeitskomponenten  $u_x$ ,  $u_r$  und  $u_\varphi$  steigen erwartungsgemäß mit zunehmender Propellerdrehzahl an. In Abb. 9 sind die Werte für die Propellerebene aufgetragen, wo die Tangentialgeschwindigkeit  $u_{\varphi \max.}$  noch fast eine Größenordnung höher ist als die Radialkomponente  $u_{r \max.}$ . Dominierend ist stets die Axialgeschwindigkeit  $u_{x \max.}$ . Die in Abb. 9 gezeigten  $u_{\max.}(n)$ -Werte wurden den in Abb. 10 a, c und e gezeigten Ausgleichskurven  $u_{\max.}(x/D)$  entnommen. Diese Kurven beschreiben den Verlauf der maximalen Geschwindigkeiten stromabwärts mit einem exponentiellen Abfall (Gl. 10a).

Die gemessenen Maxima der Geschwindigkeitskomponenten  $u_x$ ,  $u_r$  und  $u_\varphi$  aller vier Rührwerke und die exponentiellen Näherungskurven (Gl. 10) sind mit ihren jeweils drei Drehzahlen dargestellt, wie sie in Tab. 1 aufgelistet sind. Die in Abb. 9 gezeigte Drehzahlabhängigkeit liegt erwartungsgemäß nicht nur in der Propellerebene, sondern über dem ganzen untersuchten Freistrahلبereich vor. Auffällig ist der starke Abfall der Tangentialgeschwindigkeit  $u_\varphi$ , die bereits stromabwärts nach einem Viertel des Msfeldes nur noch 1/e des Wertes in der Propellerebene aufweist und am Ende des Messfeldes die 1%-Marke unterschreitet, so dass der verdrehte Freistrahл in einen drallfreien Strahl übergeht.

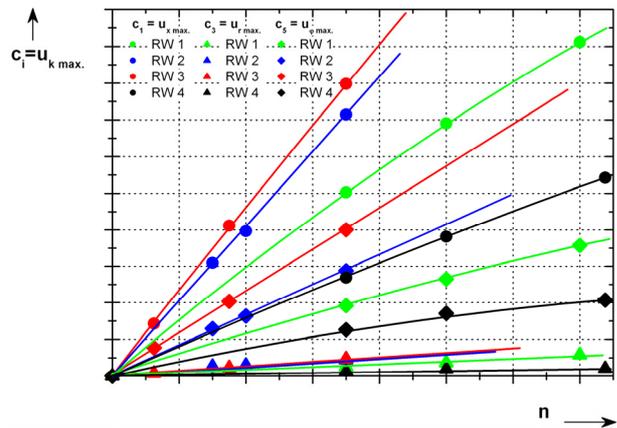


Abb. 9: Drehzahlabhängigkeit von  $u_{x \max.}$ ,  $u_{r \max.}$  und  $u_{\varphi \max.}$  in der Propellerebene

$$u_{x \max.}\left(\frac{x}{D}\right) = c_1 \cdot e^{c_2 \cdot \frac{x}{D}} \quad \text{mit} \quad c_1 = u_{x \max.} \Big|_{\frac{x}{D}=0} \quad (10 \text{ a})$$

$$u_{r \max.}\left(\frac{x}{D}\right) = c_3 \cdot e^{c_4 \cdot \frac{x}{D}} \quad \text{mit} \quad c_3 = u_{r \max.} \Big|_{\frac{x}{D}=0} \quad (10 \text{ b})$$

$$u_{\varphi \max.}\left(\frac{x}{D}\right) = c_5 \cdot e^{c_6 \cdot \frac{x}{D}} \quad \text{mit} \quad c_5 = u_{\varphi \max.} \Big|_{\frac{x}{D}=0} \quad (10 \text{ c})$$

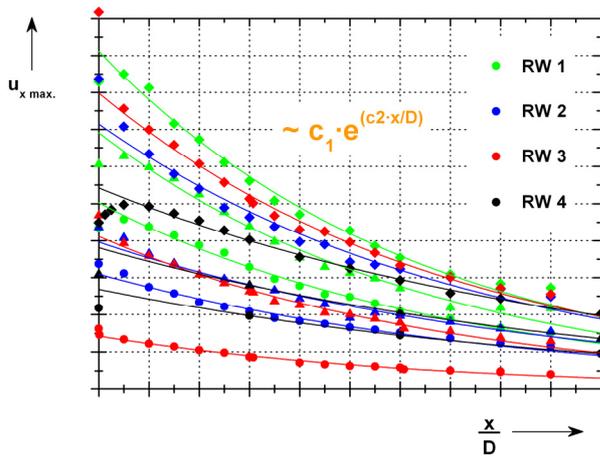


Abb. 10a: Ausgleichskurven der maximalen lokalen Geschwindigkeitskomponente  $u_{x,max}$ .

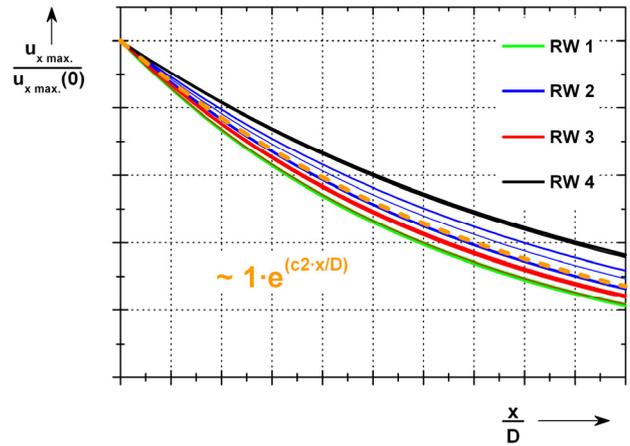


Abb. 10b: Normierte Ausgleichskurven der max. lokalen Geschwindigkeit  $u_{x,max}$ .

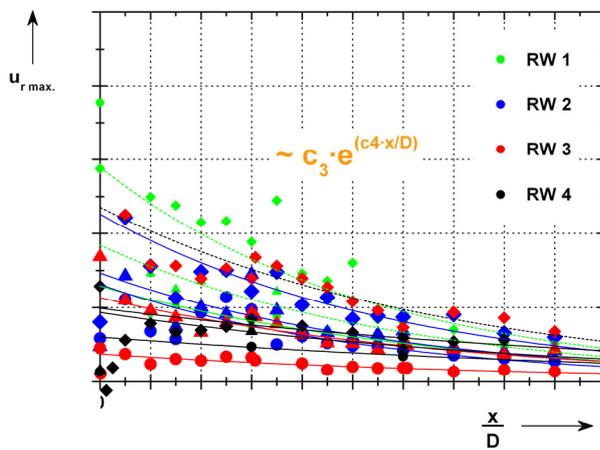


Abb. 10c: Ausgleichskurven der maximalen lokalen Geschwindigkeitskomponente  $u_{r,max}$ .

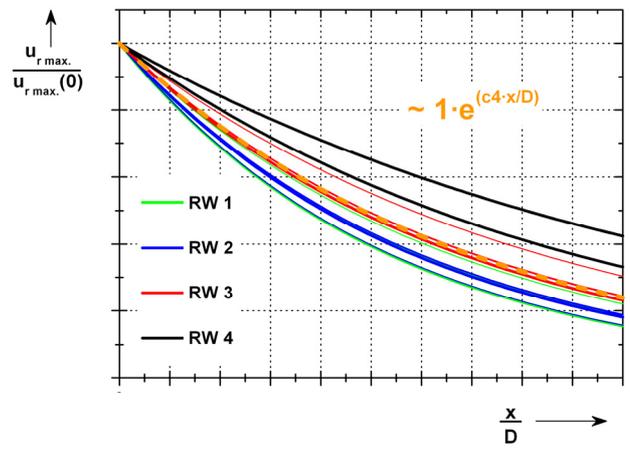


Abb. 10d: Normierte Ausgleichskurven der max. lokalen Geschwindigkeit  $u_{r,max}$ .

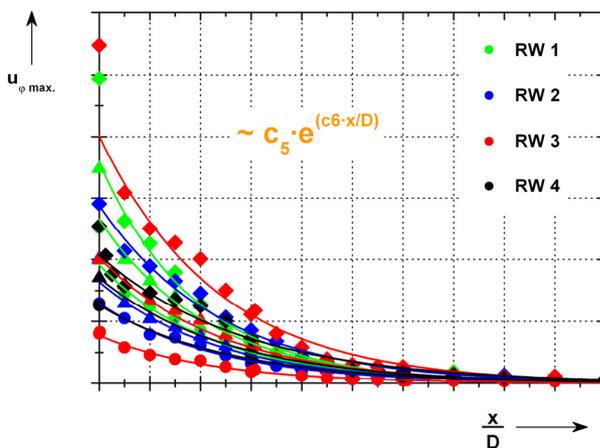


Abb. 10e: Ausgleichskurven der maximalen lokalen Geschwindigkeitskomponente  $u_{\phi,max}$ .

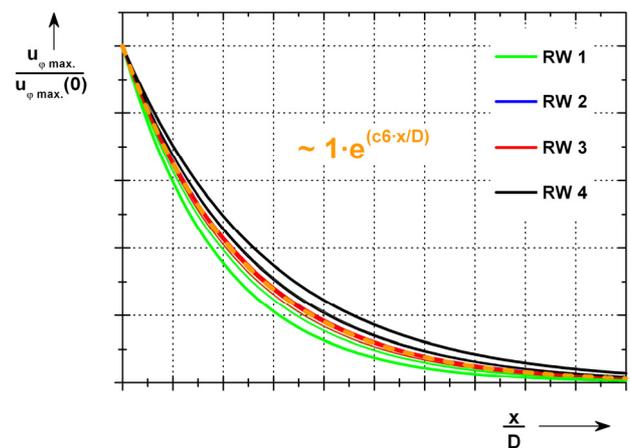


Abb. 10f: Normierte Ausgleichskurven der max. lokalen Geschwindigkeit  $u_{\phi,max}$ .

Die mit den in der Propellerebene auftretenden Geschwindigkeitswerten normierten  $u_{max.}(x/D)$ -Kurven verdeutlichen den erheblich rascheren Abfall von  $u_\varphi$  (Abb. 10f) im Vergleich zu  $u_x$  und  $u_r$  (Abb. 10b und d). Um zu einer einheitlichen Beschreibung zu gelangen, wird die geringe Streuung über Rührwerktyp und Drehzahl vernachlässigt, so dass sich für  $u_{x max.}$  und  $u_{r max.}$  ein gemeinsamer Exponent  $c_2 = c_4$  und für  $u_{\varphi max.}$  ein Exponent  $c_6$  ergibt (Abb. 11), so daß gilt:

$$c_2 = c_4 = \frac{1}{3} \cdot c_6 \quad (10 d)$$

Vergleicht man, wie in Abb. 11 gezeigt, die maximale Radialgeschwindigkeit  $u_{r max.}$  mit der maximalen Axialgeschwindigkeit  $u_{x max.}$ , so ergibt sich ein nahezu von der Propellergeometrie, dem Durchmesser, der Drehzahl und dem Abstand  $x/D$  unabhängiges Verhältnis  $\kappa$  von etwa einem Fünftel. Somit kann durch die in Gl. 10 angegebenen Zusammenhänge der Betrag und der Abfall von Radial- und Tangentialgeschwindigkeit über der Strahllänge aus der Axialgeschwindigkeit abgeleitet werden.

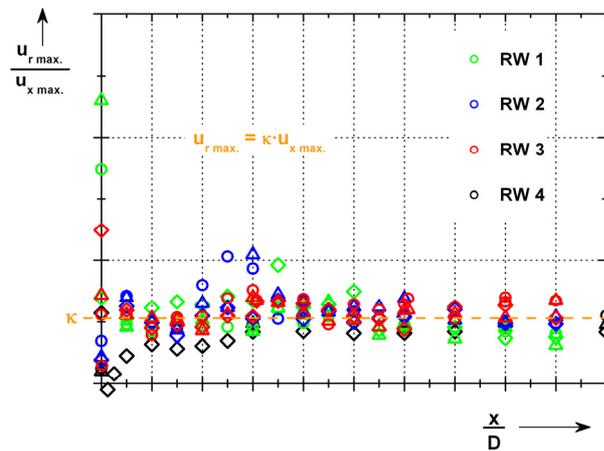


Abb. 11: Verhältnis von  $u_{r max.}$  zu  $u_{x max.}$

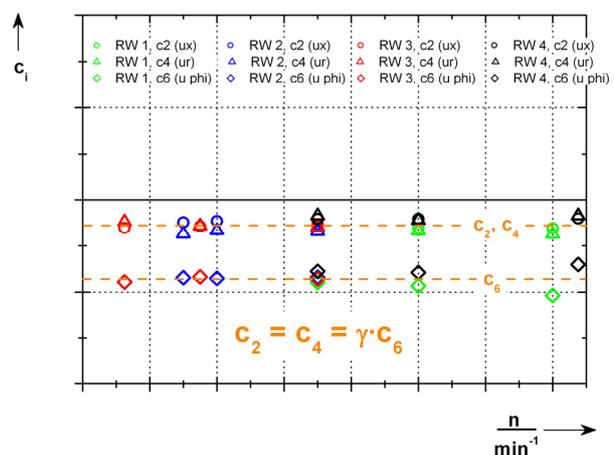


Abb. 12: Exponentialkoeffizienten

Mit den oben im Übergangsbereich und Fernfeld ermittelten Zusammenhängen wurde eine Funktion erzeugt, die die Strahlprofile  $u_x(r/D)$  reproduzieren sollte. In Abb. 13a sind als Beispiel gemessene Axialgeschwindigkeitsprofile im Nahbereich  $x_1/D$  (dünne Linie), im Übergangsbereich  $x_2/D$  (mittlere Linie) und im Fernfeld  $x_3/D$  (dicke Linie) zu sehen. Mit Absicht wurden die Daten von verschiedenen Propellergeometrien und Drehzahlen gewählt, RW 4 unterscheidet sich zusätzlich im Durchmesser  $D$ . Im nächsten Schritt erfolgte eine Normierung, die eine hervorragende Ähnlichkeit der Strahlprofile zeigt (Abb. 13b). Für die mit 1%  $u_{x max.}$  definierte Strahlgrenze bestätigt sich der in Gl. 7 genannte Zusammenhang.

Aus einer Gauß-Funktion, wie sie andere Autoren in ähnlicher Form vorschlagen [1], [2], wurden die in Abb. 13c dargestellten Profile berechnet. Der Vergleich zwischen den gemessenen (Abb. 13a) und den berechneten Profilen (Abb. 13c) zeigt eine gute Übereinstimmung, selbst der Einfluss des Nabennachlaufes kann reproduziert werden. Wenn die Strahlprofile für große Radien  $r/D$  im Wert  $u_x(r/D) \approx 0,0$  auslaufen, wie es bei fehlender Grundströmung  $u_\infty$  der Fall ist, kann  $c_{x4} = 0$  gesetzt werden.

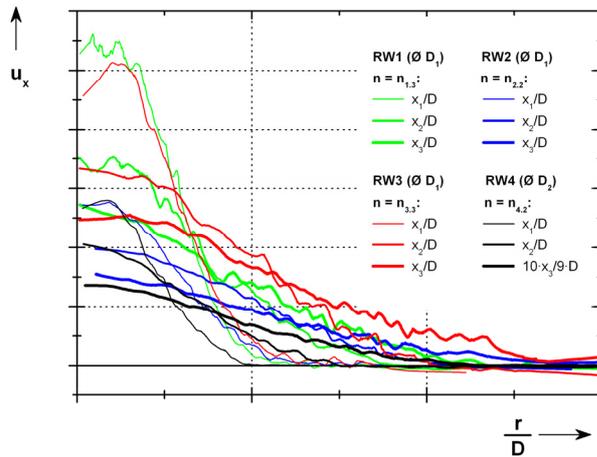


Abb. 13a: Gemessene  $u_x$ -Profile,  $x_1 < x_2 < x_3$

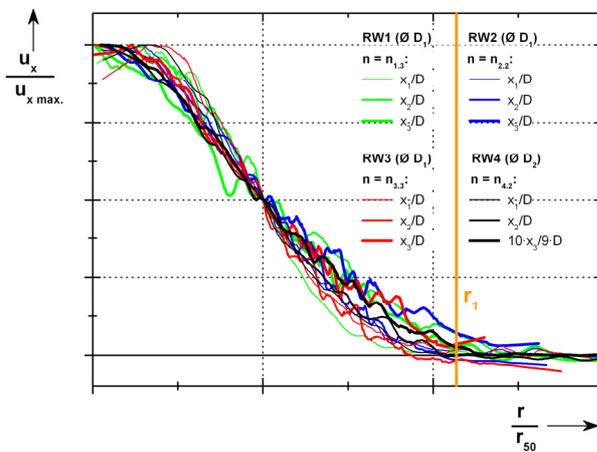


Abb. 13b: Normierte  $u_x$ -Profile,  $x_1 < x_2 < x_3$

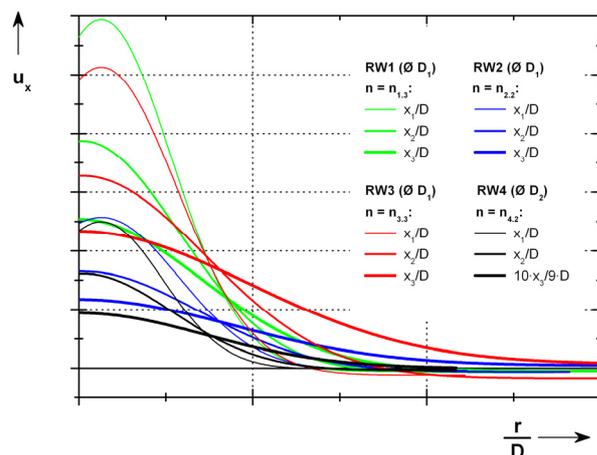


Abb. 13c: Berechnete  $u_x$ -Profile,  $x_1 < x_2 < x_3$

$$u_x\left(\frac{r}{D}\right) = c_{x1} \cdot e^{-\left(\frac{r/D - c_{x2}}{c_{x3}}\right)^2} + c_{x4} \quad (12)$$

mit  $c_{x1} = u_{x \max.} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)$

$$c_{x2} = r_{u \max.} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)$$

$$c_{x3} = r_{50} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)$$

$$c_{x4} = \frac{u_{x \min.} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)}{u_{x \max.} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)}$$

Die radialen Geschwindigkeitsprofile weisen nach der Normierung mit  $u_{x \max.}$  und  $r_{50}$  ebenfalls eine gute Übereinstimmung auf (Abb. 14). Durch diese Normierung bestätigen sich zwei Zusammenhänge, die für die Modellierung der radialen Geschwindigkeitsverteilung genutzt werden können – die Abhängigkeit des Entrainment-Radius  $r_E$  vom Normierungsradius  $r_{50}$  nach Gl. 8 (vgl. Abb. 11) sowie den Bezug zur Axialgeschwindigkeit  $u_x$ :

$$r_{E \max.} \approx \kappa \cdot r_{50 \max.} \quad (13)$$

### Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden charakteristische Kenngrößen des verdrehten Unterwasserfreistrahls mittels LDA-Technik bestimmt und ihre Zusammenhänge aufgezeigt. Einige Größen gelten für die untersuchten Propeller allgemein, d. h. sie hängen

weder von der Drehzahl noch von der Propellergeometrie ab. Somit kann die Anzahl der Eingangsgrößen zur Beschreibung verdrehter Freistrahlen reduziert werden. Dies und die gute Normierbarkeit der Strahlprofile (vgl. Abb. 14b und 14) lassen einen Ähnlichkeitsansatz erfolgversprechend erscheinen. Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen die Radial- sowie die

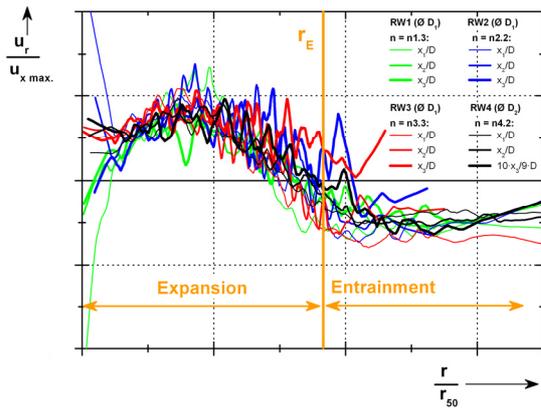


Abb. 14: Normierte  $u_r$ -Profile

Tangentialgeschwindigkeit ebenfalls durch Funktionen beschrieben und die Eingangsgrößen auf wenige, allgemeinübliche Kennwerte, z. B. den Schubbeiwert  $K_T$ , den Drehmomentbeiwert  $K_Q$ , den Propellerdurchmesser  $D$  und die Drehzahl  $n$  zurückgeführt werden. Die gemessenen und bereits früher vorgestellten Impulsstromstärken [7] werden hierbei mit einfließen. Vergleiche mit den Ansätzen anderer Autoren sind vorgesehen [2]. Die Prüfung der Allgemeingültigkeit durch Auswertung der Propellerdaten von weiter verkleinerten Rührwerken wird am Lehrstuhl Strömungsmechanik fortgeführt.

## Literatur

- [1] Blaauw, H.G.; Kaa, E. J. van den: „Erosion of Bottom and Sloping Banks caused by the Screw race of manoeuvring Ships“, Publikation Nr. 202, 7th International Harbour Congress, Antwerpen [1978], S. 1 – 12
- [2] Fuehrer, M.; Römisch, H.: „Effects of modern Ship Traffic on Inland- and Ocean- Waterways and their Structures.“, 24. Intern. Navigation Congress, Leningrad [1977], S. 79 – 94
- [3] Lam, W.-H.; Hamill, G.; Robinson, D. et al. : „Submerged Propeller Jet“, IASME Transactions, Band 2, Heft 1 [2005], S. 184–189
- [4] 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]
- [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] Sieg, M.; Hüttmann, F.; Leder, A.: „LDA-Untersuchungen an einem verdrehten 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
- [7] Sieg, M.; Hüttmann, F.; Leder, A.: „Experimentelle Charakterisierung der von Tauchmotorrührwerken erzeugten Drallstrahlen“, in: Delgado, A.; Rauh, C. et al. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 17. Fachtagung der GALA e. V., Erlangen [2009], S. 30.1 – 30.11.
- [8] Surek, D.; Stempin, S.: “Angewandte Strömungsmechanik” [2007], S. 126