

## VERGLEICH DER AUSBREITUNGSCHARAKTERISTIK VERDRALLTER FREISTRALLEN VON MODELLRÜHRWERKEN UNTERSCHIEDLICHER DIMENSIONEN

### COMPARISON OF THE PROPAGATION OF SWIRLED JETS GENERATED BY MODELL-AGITATORS WITH DIFFERENT DIMENSIONS

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

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

verdrallter Freistrahler, Rührwerke, Unterwasser-Laser-Doppler-Anemometrie, Strahlprofile  
swirled jet, agitators, underwater laser-doppler-anemometry, jet profiles

#### Abstrakt

Das Anwendungsgebiet verdrallter Freistrahler umfasst ein weites Spektrum – von der Antriebstechnik über die Lebensmittelindustrie bis hin zur chemischen Industrie und Umwelttechnik, z.B. in Klärwerken. Die Auslegung von Rührwerksanlagen beruht jedoch sehr auf Erfahrung und soll durch Untersuchungen an der Universität Rostock verbessert werden. Vorgestellt wird hier eine Versuchsanordnung, bei der die Ausbreitungscharakteristik von verdrallten Freistrahler mittels Unterwasser-LDA untersucht wird. Verglichen wird ein dreiflügliges Rührwerk bei gleicher Drehzahl, jedoch mit unterschiedlichen Abmaßen, um ein Unabhängigkeit der Ausbreitungscharakteristik auf die Skalierung nachzuweisen.

#### Einleitung

Energieeffiziente Auslegungen von technischen Anlagen finden in der heutigen Zeit eine immer größer werdende Beachtung. Bei den hier untersuchten Objekten handelt es sich um Rührwerke zur Durchmischung bzw. Verhinderung von Sedimentation und Kurzschlussströmungen in Kläranlagen. Die bisherige Auslegung von Rührwerksanlagen (Becken und Rührwerk) basiert mehr auf Erfahrungen und auf sicherheitsbewusster Überdimensionierung als auf exakter Anpassung der Rührwerke an die spezifischen Gegebenheiten. Aus diesem Grund erfolgen Untersuchungen über das Ausbreitungsverhalten der von verschiedenen Rührwerkstypen erzeugten verdrallten Freistrahler mit dem abschließenden Ziel, einen Ähnlichkeitsansatzes zu entwickeln. Mit diesem Ansatz soll eine schnelle und einfache Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens verdrallter Freistrahler in Unterwasseranwendungen ermöglicht werden.

Da Rührwerke Abmaße von mehreren Metern annehmen können, werden die Untersuchungen an skalierten Rührwerken durchgeführt. Erste Untersuchungen wurden von Sieg 2009 an Rührwerken mit einem auf  $\varnothing 0,36$  m skalierten Rührwerksaußendurchmesser durchgeführt. Um den Parameter der Skalierung zu variieren, erfolgen die gegenwärtigen Messungen an Rührwerken mit einem Propellerdurchmesser  $\varnothing 0,135$  m (Abb.1). Der Nachweis der Unabhängigkeit erfolgt durch einen Vergleich der normierten Profile für die Geschwindigkeitskomponenten und turbulenten Größen, sowie die Gegenüberstellung charakteristischer Radien und Geschwindigkeitsverläufe.

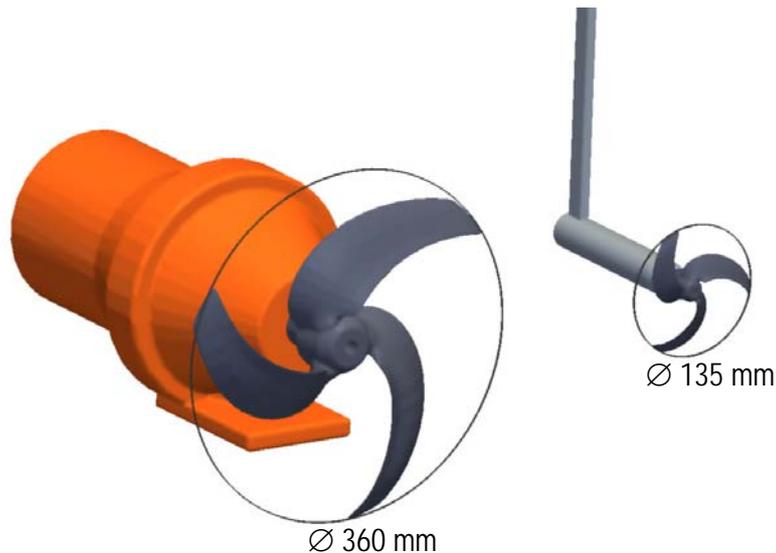


Abb. 1: Vergleich der Maßstäbe des RW3: Modell 1 nach Messung von Sieg 2009 (links); Modell 2 aktuelle Messungen (rechts)

### Messaufbau und experimentelle Parameter

Die im nächsten Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurden an einem dreiflügligem Rührwerkpropeller mit der Bezeichnung RW3 gewonnen. Das hier untersuchte Rührwerk besitzt einen Durchmesser von  $\varnothing$  135 mm und wird bei einer Drehzahl von 700 U/min betrieben. Um das Ausbreitungsverhalten des ungestörten verdrallten Freistrahls genau beschreiben zu können, sind mehrere Bedingungen von Bedeutung:

- Erstens wird ein geregelter Antrieb zur exakten Einhaltung der Drehzahl benötigt. Hierbei ergibt sich die Herausforderung, dass die Rührwerke im Originalmaßstab Durchmesser von mehreren Metern umfassen können und für diese Untersuchungen auf einen kleineren Maßstab unter dem Gesichtspunkt der Froude-Ähnlichkeit skaliert werden. Mit der Skalierung der Rührwerke muss demnach auch eine Skalierung der Motoren erfolgen. Hierzu wurde ein Antriebssystem entwickelt, dessen Abmaße bei den zu untersuchenden Rührwerken, unter Betrachtung einer geometrischen Skalierung, die Originalabmaße erreicht (s. Abb. 1).
- Zweitens wird zur Untersuchung des Freistrahls ein Messsystem benötigt, welches die Strömungsgrößen innerhalb des Strahls möglichst berührungslos mit einer hohen Genauigkeit erfassen kann. Zum Einsatz kommt hier die Unterwasser-LDA-Messsonde der Universität Rostock, die mit ihrer strömungsgünstigen Form und drei Laser-Strahlenpaaren eine berührungslose und die Strömung nicht beeinflussende Messung aller Geschwindigkeitskomponenten ermöglicht. Die Wellenlängen der Strahlenpaare betragen 476 nm, 488 nm und 514 nm siehe Richter 1998. Da es sich bei der LDA-Technik um ein punktwises Messverfahren handelt, wurden optimierte Messgitter für die Untersuchungen mit bis zu 729 Punkten je Messebene erstellt (Abb. 2).
- Als dritte Bedingung für die genaue Untersuchung von Freistrahlen ist deren ungestörte Ausbreitung zu betrachten. Hierzu befindet sich das Rührwerk in dem Rundlaufkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock, welcher mit einem Wasservolumen von  $800 \text{ m}^3$  eine ungestörte Ausbreitung und seinen seitlich und unten angebrachten Rippen eine gegen Null gehenden Anströmung ermöglicht. Das Becken besitzt einen Durchmesser von 20 m bei einer Kanalbreite von 6 m und einer Tiefe von 3 m siehe Richter 1998.

Abb. 3 zeigt den Rundlaufkanal mit seinen Abmaßen. Zusätzlich wurde die normierte absolute Geschwindigkeit in Prozent auf Höhe des Propellers farbige eingeblendet und auf 1% skaliert. Die Daten für diese Geschwindigkeitsverteilung wurden mittels einer numerischen Simulation gewonnen. Dabei wurde das Rührwerk durch eine „Black Box“ ersetzt, dessen Randbedingungen aus den Experimenten gewonnen werden konnten. Es zeigt sich, dass die Anströmgeschwindigkeit des Rührwerks unterhalb von 0,5% der maximalen Austrittsgeschwindigkeit liegt und somit als vernachlässigbar angesehen werden kann (s. Abb. 3).

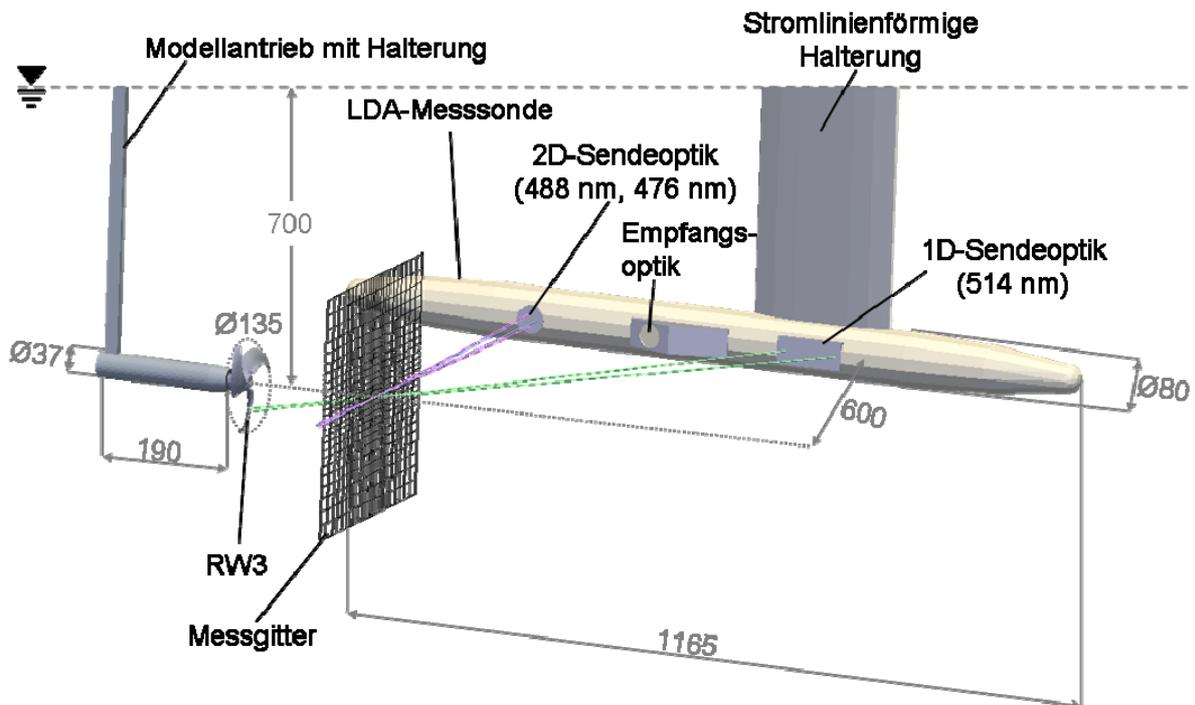


Abb. 2: Messaufbau mit LDA-Sonde und Rührwerk RW3

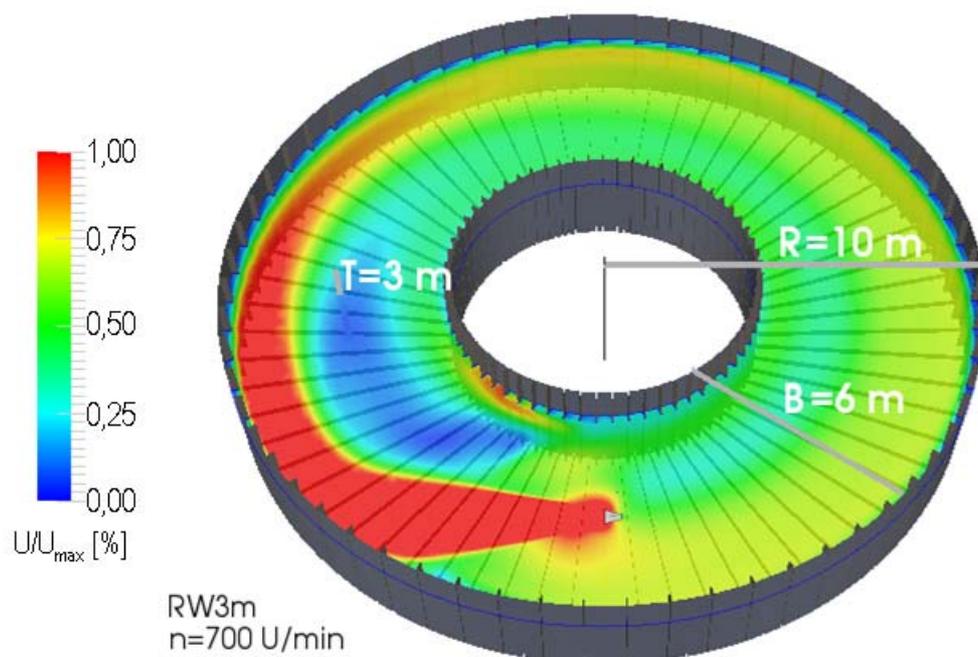


Abb. 3: Rundlaufkanal der Universität Rostock mit Modellrührwerk und Farbdarstellung der normierten Geschwindigkeit in Prozent aus numerischer Simulation

## Vergleich der normierten Strahlprofile

Abb. 4 zeigt die ersten Ergebnisse der Untersuchungen mit einem Modellrührwerk mit dem Außendurchmesser  $\varnothing 0,135$  mm. Dargestellt wird die normierte absolute Geschwindigkeit in vier Messebenen. Die Messungen zeigen eine sehr gute Achssymmetrie. Bei den Messungen von Sieg war der Motor mit einem Fuß versehen, um den Originalrührwerken möglichst nahe zu kommen (s. Abb. 1). Der Nachlauf des Fußes war dabei merklich im Strömungsbild erkennbar. Bei diesen Untersuchungen wurde hingegen ein zylindrisches glattwandiges Gehäuse entwickelt, welches ein nahezu komplett axialsymmetrisches Strömungsprofil ermöglicht.

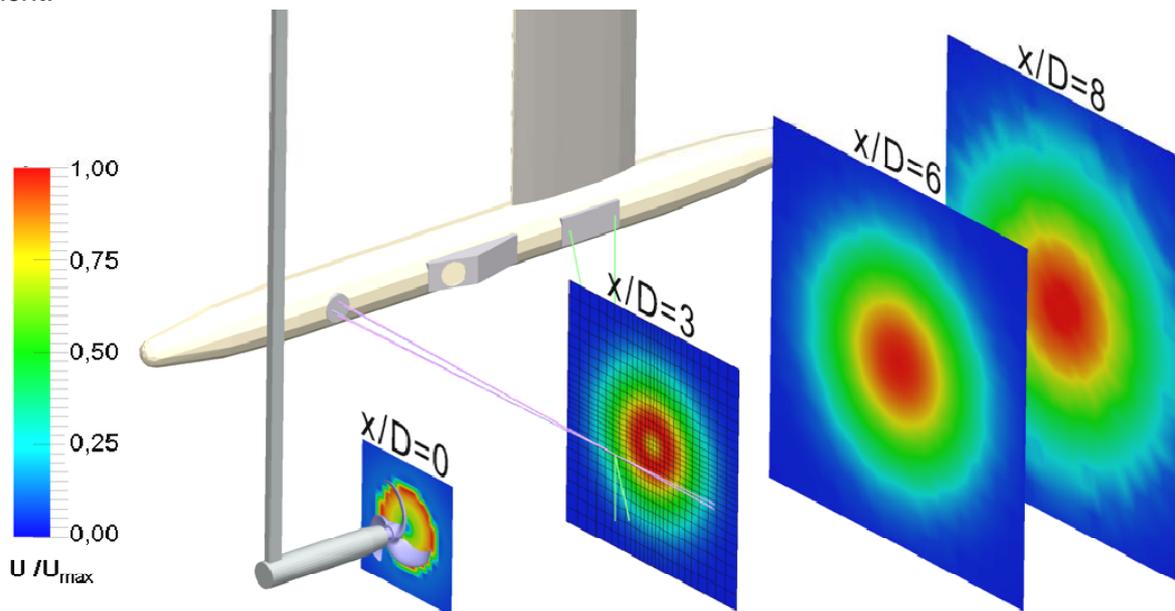


Abb. 4: Veranschaulichung der Strahlentwicklung hinter dem Rührwerk; dargestellt ist die auf die lokale maximale Geschwindigkeit normierten Geschwindigkeit  $U/U_{max}$

In den farbig dargestellten Messebenen ist ein deutlicher Übergang von einem Geschwindigkeitsprofil mit nabenverursachter Nachlaufdelle  $x/D \leq 3$  zu einem Gauß'schen Geschwindigkeitsprofil  $x/D \geq 6$  festzustellen. Dieser Übergang ist auch sehr gut in Abb. 5 zu erkennen. Dort sind die normierten Strahlprofile der Geschwindigkeitskomponenten über dem Radius aufgetragen, welcher dabei mit dem Radius  $r_{50}$  normiert wird. Bei dem Radius  $r_{50}$  handelt es sich um den Radius, bei dem 50% der maximalen, lokalen axialen Geschwindigkeit  $u_{x,max}$  erreicht werden. Die normierten Profile des kleineren Rührwerks werden in Abb. 5 als Volllinie, die des größeren als gestrichelte Linie dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der normierten Profile beider Rührwerke unterschiedlicher Dimensionen bei allen drei Geschwindigkeitskomponenten. Exemplarisch für den Vergleich der turbulenten kinetischen Energie sind in Abb. 6 die Verläufe der Ebenen  $x/D=0$  und  $x/D=8$  abgebildet. Auch hier lässt sich eine gute Konformität der Ausbreitungscharakteristik ableiten.

Eine ähnliche Schlussfolgerung kann ebenfalls aus dem Verlauf der charakteristischen Radien (s. Abb. 7 a) und Geschwindigkeiten gezogen werden (s. Abb. 7 b). Die Definition des Radius  $r_{50}$  wurde im vorherigen Absatz gegeben, dementsprechend ist der Radius  $r_1$  bei 1% der maximalen Geschwindigkeit anzusiedeln. Bei dem Radius  $r_{Umax}$  handelt es sich um den Ort der maximalen Geschwindigkeit. Der Verlauf von  $r_{Ux,max}/D$  zeigt, dass der Ort von  $u_{x,max}$  immer mehr zur Mitte in wandert, bis er letztendlich mit dieser übereinstimmt. Sobald  $r_{Ux,max}/D=0$  entspricht, ist die nabenverursachte Nachlaufdelle verschwunden und ein Gauß'sches Geschwindigkeitsprofil liegt vor.

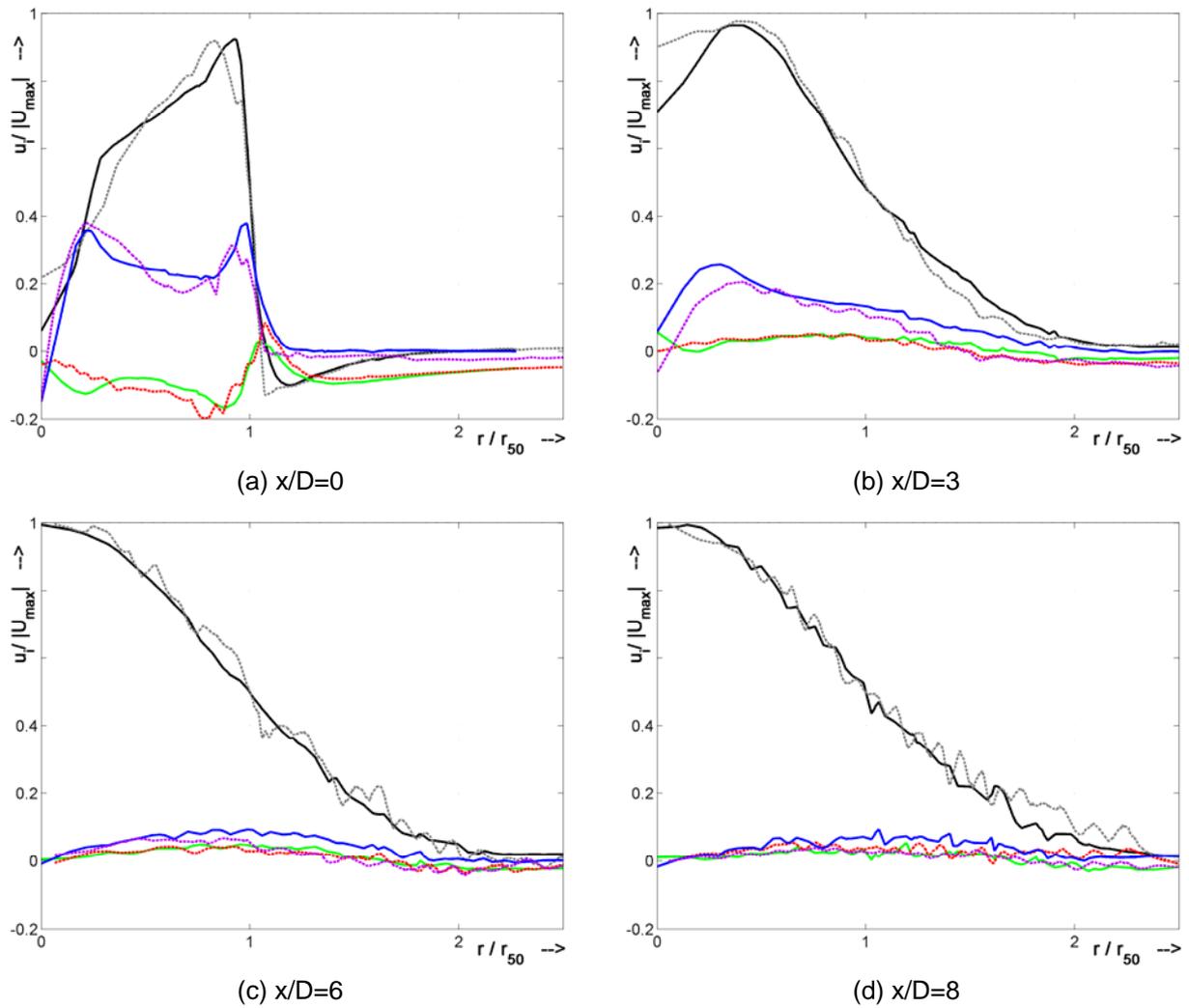


Abb. 5: Vergleich der Strahlprofile mit zunehmenden Abstand von den Modellrührwerken

$u_x/U_{max}$  :        — Modell 2 Ø135 mm    - - Modell 1 Ø360 mm  
 $u_r/U_{max}$  :        — Modell 2 Ø135 mm    - - Modell 1 Ø360 mm  
 $u_\phi/U_{max}$  :      — Modell 2 Ø135 mm    - - Modell 1 Ø360 mm

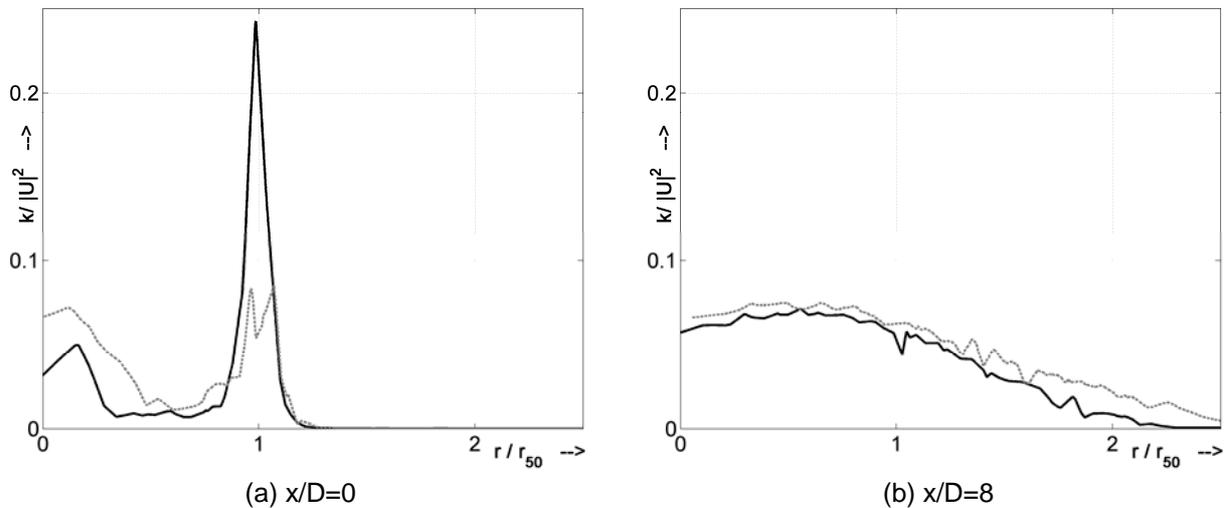


Abb. 6: Vergleich der Strahlprofile mit zunehmenden Abstand von den Modellrührwerken

$k/U_{max}^2$  :        — Modell 2 Ø135 mm    - - Modell 1 Ø360 mm

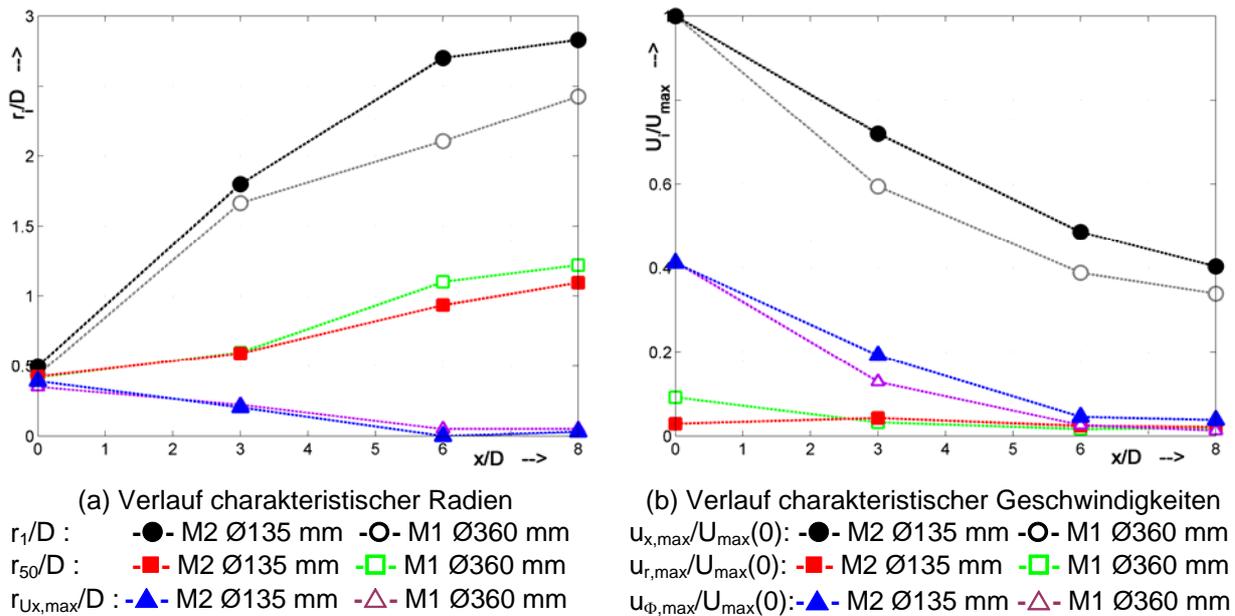


Abb. 7: Verlauf charakteristischer Größen mit zunehmenden Abstand von den Modellrührwerken

Die Normierung der charakteristischen, axialen, radialen und tangentialen Geschwindigkeitsverläufe in Abb. 7 b erfolgt durch Division mit dem Betrag der maximalen globalen Austrittsgeschwindigkeit, d.h. der maximalen Geschwindigkeit bei  $x/D=0$ .

Der Verlauf der maximalen Geschwindigkeiten lässt ebenfalls auf ein Ähnlichkeitsverhalten der Rührwerke schließen. Sehr deutlich ist die Abnahme des Dralls zu erkennen, also die Abnahme der maximalen tangentialen Geschwindigkeitskomponenten  $u_{\phi,max}$ .

Insgesamt verdeutlichen die ersten Ergebnisse eine sehr gute Ähnlichkeit der Ausbreitungscharakteristik von Rührwerken mit unterschiedlichen Durchmessern  $D$ .

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein Vergleich der Ausbreitungscharakteristik verdrallter Freistrahlen, erzeugt durch Rührwerke gleichen Typs jedoch unterschiedlicher Propellerdurchmesser, wurde durchgeführt. Die ersten Messungen lassen auf eine Unabhängigkeit der Ausbreitungscharakteristik von den Dimensionen der Rührwerke schließen. Erfreulicherweise zeigte sich nicht nur eine Ähnlichkeit in den Geschwindigkeitsprofilen, sondern auch bei der turbulenten kinetischen Energie, welche für Durchmischungsvorgänge eine relevante Bedeutung einnimmt.

Weitere Messungen mit anderen skalierten Rührwerken bei verschiedenen Drehzahlen werden folgen, um eine unbeschränkte Unabhängigkeit der Dimensionen auf die Ausbreitungscharakteristik von verdrallten Freistrahlen und damit deren Ähnlichkeitsverhalten nachzuweisen.

## Literatur

Richter, F., Leder, A., 1998: "Tauchbare LDA-Schleppsonde für hydrodynamische Untersuchungen" in: Menzkirch, W., et al. „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ -6. Fachtagung der GALA e. V. 1998, Aachen, S. 3.1 – 3.6

Sieg, M., Hüttmann, F., Leder, A., 2009: „Experimentelle Charakterisierung der von Tauchmotorrührwerken erzeugten Drallstrahlen“ in: A. Delgado, et al. „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 17. Fachtagung der GALA e. V. 2009, Universität Erlangen, S. 30.1 – 30.11