

VERGLEICH DER BESTIMMUNGSMÖGLICHKEITEN VON SCHUB- UND DREHMOMENTBEIWERTEN AN MODELLRÜHRWERKEN

COMPAIRISON OF DIFFERENT DETERMINATION OF THRUST AND MOMENTUM COEFFICIENT BY MODELL AGITATORS

C. von Hörsten, K. Bunse, M. Sieg, F. Hüttmann, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Strasse 2, 18051
Rostock

Verdrallte Freistrahlen, Beiwertsbestimmung, DMS-Kraftmessung, LDA, Strahlradien
Swirled free jet, determination of coefficients, force measurement, jet radius

Zusammenfassung

Das Anwendungsgebiet verdrallter Freistrahlen umfasst ein weites Spektrum – von der Antriebstechnik über die Lebensmittelindustrie bis hin zur chemischen Industrie und Umwelttechnik. Die Auslegung von Rührwerksanlagen beruht jedoch sehr auf Erfahrungswerten und soll durch Untersuchungen unter Entwicklung eines Ähnlichkeitsansatzes an der Universität Rostock verbessert werden. Vorgestellt wird hier eine Versuchsanordnung, bei der ein synchroner Vergleich der für den Ähnlichkeitsansatz relevanten Beiwertsbestimmung aus Kraftmessung und LDA-Messungen erfolgen kann. Ferner wird der Einfluss verschiedener Strahlradien untersucht.

Einleitung

In der Verfahrens- und Umwelttechnologie dienen häufig Mikroorganismen zur Umsetzung chemischer Reaktionen. Dabei ist die Erzeugung und die Einhaltung von verfahrenstechnisch erforderlichen Strömungszuständen zwingend notwendig. Zu diesen Strömungszuständen zählen Mindestgeschwindigkeit zur Verhinderung von Ablagerungen und auch die Erzeugung von Turbulenz. Um diese Zustände einzuhalten, kommen häufig Tauchmotorrührwerke zum Einsatz. Wichtig ist dabei, dass der gesamte Beckeninhalte in den Rührvorgang mit eingezogen wird und sich das Fluid im Becken nicht in Ruhe befindet. Damit erweist sich die Gesamtbeckenströmung, welche maßgeblich von dem Schub bestimmt wird, als entscheidend für die Effizienz von Rührwerksanwendungen. Der Schub- und der Drehmomentenbeiwert sind darüber hinaus noch grundlegende Parameter für den derzeit an der Universität Rostock entwickelten Ähnlichkeitsansatz zur Ausbreitungscharakteristik verdrallter Freistrahlen (s. Sieg 2010).

Zur Erlangung dieser Kennwerte können zwei Wege beschritten werden: Erstens kann eine direkte Messung der relevanten Kräfte, in diesem Fall über Hebelgesetze, erfolgen (Abb.1). Zweitens kann das Strömungsfeld in unmittelbarer Rührwerksnähe messtechnisch erfasst und mittels Integration über dem Geschwindigkeitsprofil die Kräfte bestimmt werden (Abb.2). Bei der letzteren Bestimmungsmöglichkeit sind Parameter wie Strahl- bzw. Integrationsradius zu berücksichtigen. In dieser Untersuchung wird ein Vergleich dieser beiden Methoden und ihrer Parameter vorgestellt, um eine möglichst große Sicherheit bei der Bestimmung der Kennwerte zu erhalten.

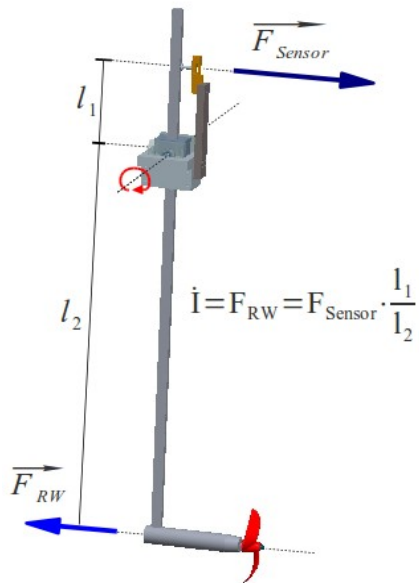


Abbildung 1: Prinzip Kraftmessung

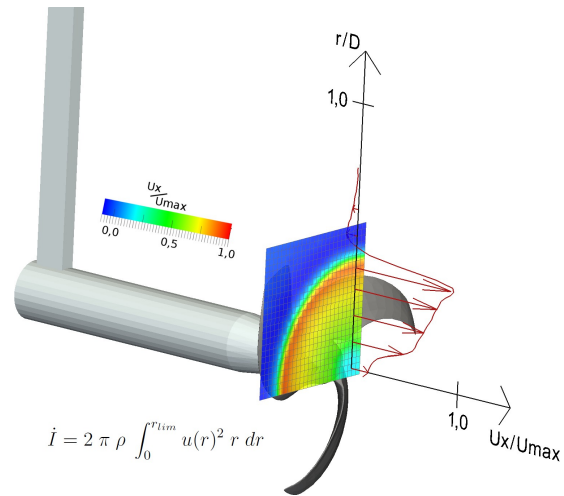


Abbildung 2: Ermittlung der Kräfte aus LDA-Messungen

Messaufbau und experimentelle Parameter

Für die genaue Untersuchung von Freistrahlen ist deren ungestörte Ausbreitung zu betrachten. Hierzu befindet sich das Rührwerk im Rundlaufkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock. Das Becken besitzt einen Durchmesser von 20 m, bei einer Kanalbreite von 6 m und einer Tiefe von 3 m (s. Abb 3). Folglich ergibt sich ein Wasservolumen von 800 m³, welches eine ungestörte Ausbreitung ermöglicht. Das Becken erlaubt mit seinen seitlich und unten angebrachten Strömungsbrechern eine gegen Null gehenden Anströmung. Als Antrieb wurde ein Gleichstrommotor mit Pulsweiten-Modulation und einer Abgabeleistung von 83,2 W gewählt. Hiermit kann eine konstante Drehzahl (Genauigkeit von 1%) gehalten werden. Das Gehäuse wurde unter geometrischer Ähnlichkeit auf einen maximalen Außendurchmesser von 37 mm skaliert. Das Antriebssystem des Rührwerks ist mittels einer Vierkanthalterung in einem Schienensystem drehbar gelagert. Die drehbare Halterung ermöglicht die Bestimmung der axial erzeugten Kraft des Rührwerks durch Hebelgesetze. Als Kraftmesssensor wurde der auf Dehnungsmessstreifen basierende EF7AH1,5/57K der Firma HBM verwendet.

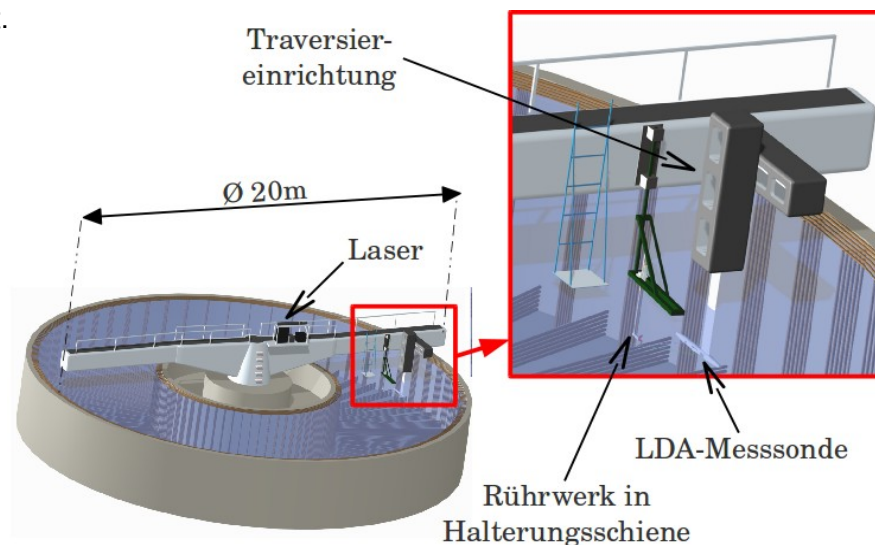


Abbildung 3: Messaufbau

Die Vermessung des Strömungsfeldes erfolgte durch eine tauchbare LDA-Messsonde. Diese Sonde ermöglicht durch ihre strömungsgünstige Form und mittels der LDA-Messtechnik eine berührungslose und damit einflussfreie Messung aller Geschwindigkeitskomponenten unter Einhaltung hoher Genauigkeit. Die Messsonde ist an einer Vier-Achsen-Traversiereinrichtung befestigt und erlaubt damit eine exakte Definition des Messortes. Da es sich bei der LDA-Technik um ein punktwises Messverfahren handelt, wurden optimierte Messgitter für die Untersuchungen erstellt.

Bei den hier durchgeführten Messungen wurde ungefähr ein Viertel des Freistrahls in der Propellerebene vermessen. Dieses ist ausreichend, da es sich bei dem erzeugten verdrehten Freistrahls um ein axialsymmetrisches Problem handelt.

Als Untersuchungsobjekte dienen drei verschiedene Propellerrührwerkstypen, die sich in Profilform und Flügelzahl unterscheiden (s. Abb. 4). RW1M und RW2M besitzen zwei Flügel und einen Durchmesser von 0,15 m. RW3M hat lediglich einen Durchmesser von 0,135 m, jedoch drei Flügel. Die maximale Drehzahl betrug 1000 U/min⁻¹.

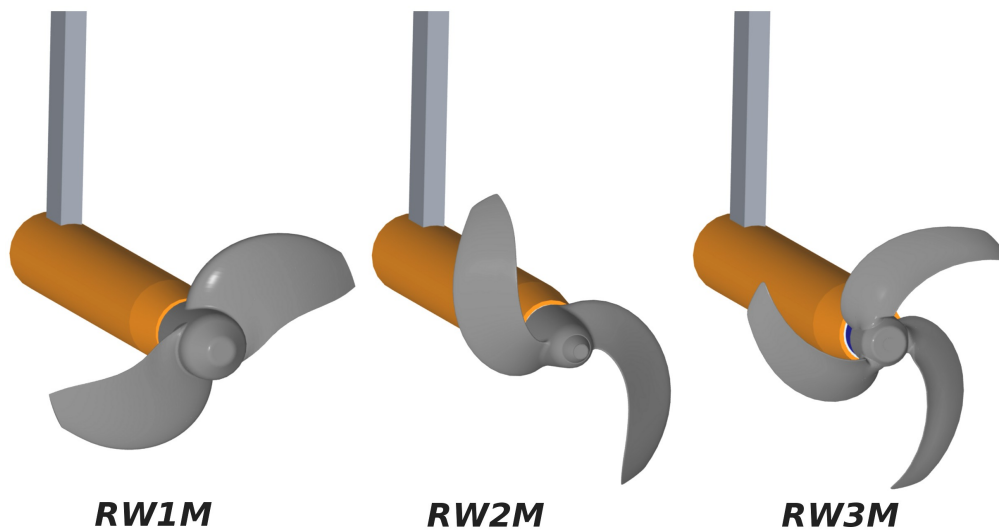


Abbildung 4: Propellerrührwerkstypen

Bestimmung der Beiwerte K_T und K_Q mittels Kraftmessungen

Für die Ermittlung des Schubbeiwertes (Gl. 1) und des Drehmomentenbeiwertes (Gl. 2) werden die rührwerksinduzierte Kräfte in axialer und tangentialer Richtung benötigt.

$$K_T = \frac{\dot{I}}{\rho n^2 D^4} \quad (1)$$

$$K_Q = \frac{\dot{L}}{\rho n^2 D^5} \quad (2)$$

Da sich das Rührwerk während der Messung unterhalb der Wasseroberfläche befindet, ist hier eine direkte Messung nur schwer möglich. Aus diesem Grund wurde das Rührwerk in der Aufhängung drehbar gehalten. Damit ist eine Kraftaufnahme am oberen Halterungsende möglich und mittels Hebelgesetzen nach Gl. 3 die Schubkraft des Rührwerks bestimmbar.

$$\dot{I} = F_{RW} = \left(F_{Sensor} \cdot \frac{l_1}{l_2} \right) \quad (3)$$

Das rührwerksinduzierte Drehmoment konnte aus dessen linearen Zusammenhang mit der Motorstromaufnahme des Antriebes gewonnen werden. Dazu wurde ein definiertes Drehmoment mittels eines Pronyschen Zaums aufgebracht (s. Abb. 5) und die Motorstromaufnahme erfasst. Bei der Durchführung der Messung wurde die Motorstromaufnahme ermittelt und mittels der Kalibrierkurve (s. Abb. 6) das Drehmoment errechnet.

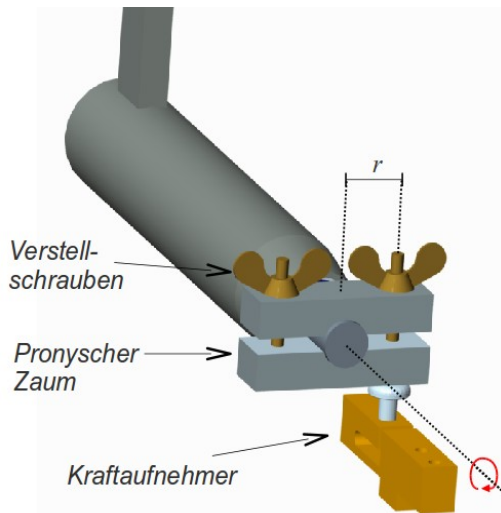


Abbildung 5: Drehmomenten-Kalibrierung

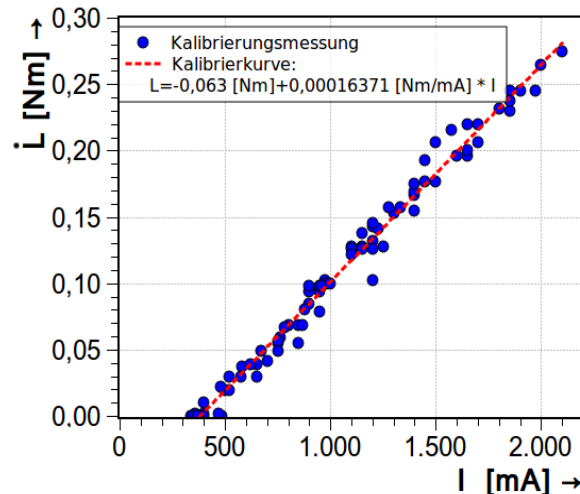


Abbildung 6: Drehmomenten-Kalibrierungskurve

Bestimmung der Beiwerte K_T und K_Q mittels LDA-Messungen

Das Strömungsfeld wird mittels LDA-Messtechnik erfasst, um möglichst einflussfreie Messungen gewährleisten zu können. Alternativ zu den Kraftmessungen ist somit auch eine Bestimmung der Kräfte aus dem Strömungsfeld möglich. Dazu werden die Bewegungsgleichung, d.h. Erhaltungsgleichung für Masse und Impuls, im axialsymmetrischen System unter Verwendung eines zylindrischen Koordinatensystems betrachtet. Mittels Integration des Impulssatzes in axialer Richtung und unter Vernachlässigung des Druckverlaufes in radialer Richtung lässt sich der Axialimpulsstrom gemäß Gl. 4 aus dem radialen Geschwindigkeitsverlauf berechnen.

$$\dot{I} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \int_0^{r_i} u(r)^2 \cdot r \, dr \quad (4)$$

Der Drehimpulsstrom lässt sich äquivalent aus dem Impulssatz in tangentialer Richtung ermitteln (Gl. 5).

$$\dot{L} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \int_0^{r_i} u(r) \cdot u_\phi(r) \cdot r^2 \, dr \quad (5)$$

In die Berechnung der Impulsströme geht jeweils ein Integrations- bzw. Strahlradius r_i ein. In der Literatur finden sich mehrere Definitionsmöglichkeiten dieses Strahlradius, die sich teilweise nur bedingt für experimentelle Untersuchungen eignen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Definitionsmöglichkeiten und deren Vor- bzw. Nachteile.

Aufgrund der einzelnen Vor- und Nachteile erweisen sich für diese Untersuchungen lediglich r_1 und $r_{2\sigma}$ als sinnvolle Integrationsgrenzen. Für den Radius r_1 besteht jedoch die Gefahr, dass die Grenzgeschwindigkeit im Fernfeld im Rauschen des Messverfahrens untergeht.

Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Strahlradius

In Abbildung 2 sind die LDA-Messergebnisse der axialen Geschwindigkeitskomponente im Konturplot dargestellt. Abbildungen 7 und 8 zeigen einen theoretischen Verlauf der axialen Geschwindigkeit in der Ausgangsebene ($x/D=0$) und im Fernfeld (hier Nachbildung des Geschwindigkeitsprofil vom RW3M $n=700 \text{ min}^{-1}$). Es zeigt sich, dass die Flanke des Strahlprofils bei $x/D=0$ derart steil ausgebildet ist, dass der Einfluss des Strahlradius zur Beiwertbestimmung vernachlässigbar klein ist. Mit zunehmender Lauflänge bildet sich ein sanfter Übergang in der Scherschicht aus und der Einfluss der Strahlradiuswahl wächst. Die Auflösung der einzelnen Größen ist in Tabelle 2 für die theoretischen Verläufe angegeben.

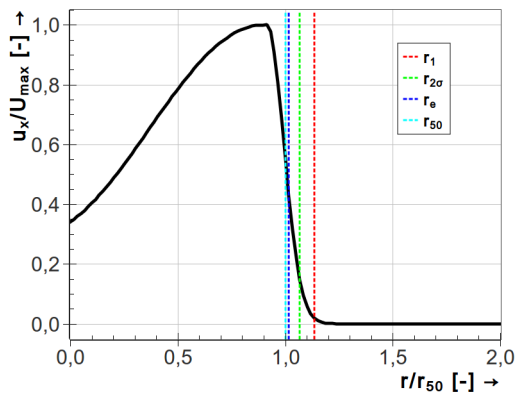


Abbildung 7: Typisches Strahlprofil im Nahfeld

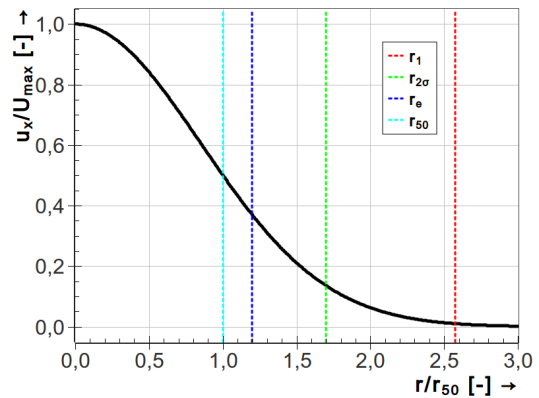


Abbildung 8: Typisches Strahlprofil im Fernfeld

Tabelle 1: Definitionsmöglichkeiten von Strahlgrenzen

Zeichen	Definition	Vor- / Nachteile
r_∞	Radius des Messfeldes	- Abhängig von der Wahl des Messfeldes - Ungewünschte Berücksichtigung von Sekundärströmung mgl.
r_0	Isotachenlinie $u_x=0$ m/s (Truckenbrodt 2008)	- idealer Fall; Sekundärströmungen dürften jedoch nicht vorhanden sein
r_1	Isotachenlinie $u_x=1\%$ $u_{x,max}$ (Kraatz 1978)	- Erfassung von nahezu des ganzen Strahlbereichs - Geschwindigkeiten unterhalb der Messgenauigkeit mgl. - Geschwindigkeiten unterhalb der Grundströmung mgl.
r_{50}	Isotachenlinie $u_x=50\%$ $u_{x,max}$ (Maier 1968)	- Großteil des Strahls bleibt unberücksichtigt - Häufig nur zum Vergleich der Ausbreitungscharakteristik
r_e	Isotachenlinie $u_x=e^{-1} u_{x,max}$ (Thuermer 1999)	- Ableitung aus dem Gauß'schem Strahlprofil - Großteil des Strahlbereichs bleibt unberücksichtigt
$r_{2\sigma}$	Isotachenlinie $u_x=e^{-2} u_{x,max}$	- Ableitung aus dem Gauß'schem Strahlprofil und Verwendung des 2σ -Vertrauensintervalls - Erfassung eines größeren Bereiches als mit r_e - Größere Geschwindigkeiten als bei r_1 , damit unempfindlicher gegenüber Sekundärströmungen
r_E	Isotachenlinie $u_r=0$ m/s (Batchelor 2000)	- Große Abhängigkeit von Sekundärströmungen - Im Fernfeld häufig kleine Größenordnungen von u_r - Nulldurchgang nicht zwingend gegeben
$r_{u,lim}$	Isotachenlinie $u_x=u_{lim}$	- Kaum Vergleichbarkeit gegeben - Wahl der Grenzgeschwindigkeit beliebig - Wichtig zum Einhalten einer Mindestgeschwindigkeit

Abbildungen 9 und 10 zeigen die experimentellen Ergebnisse für Axial- und Drehimpuls auf der Ausgangsebene, welche für die Beiwertsbestimmung relevant ist. Die Verläufe, hier normiert auf die maximal gemessenen Impulsströme dargestellt, bestätigen die theoretischen Betrachtungen. Der maximale Unterschied im Axialimpulsstrom bei unterschiedlichen Strahlradien liegt bei 0,3%. Im Fernfeld steigt der Unterschied wie erwartet (Abb. 11). Jedoch sind die Unterschiede auch hier gering (max. 6,5%). Problematisch für den Radius r_1 ist bei diesen Untersuchungen jedoch die Größenordnung der Grenzgeschwindigkeit. In der Ebene mit dem maximalen Unterschied liegt diese bei 0,0029 m/s, damit ist eine messtechnisch gesicherte Bestimmung nur schwer möglich. Die Grenzgeschwindigkeit bei $r_{2\sigma}$ liegt eine Größenordnung höher, so dass sich dieser Radius als messtechnischer Sicht als geeigneter erweist und für die weiteren Untersuchungen als Integrationsradius gewählt wird.

Tabelle 2: Theoretische Auflösung des Impulsstromes bei verschiedenen Radien

Strahlgrenze	Nahfeld	Fernfeld
theoretisch	100,00%	100,00%
r_{50}	98,17%	74,96%
r_e	98,72%	86,17%
$r_{2\sigma}$	99,90%	98,17%
r_1	99,94%	99,99%

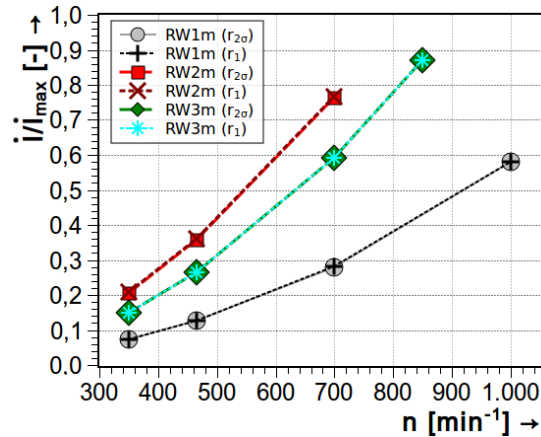


Abbildung 9: Einfluss der Strahlradien auf den Axialimpulsstrom ($x/D=0$)

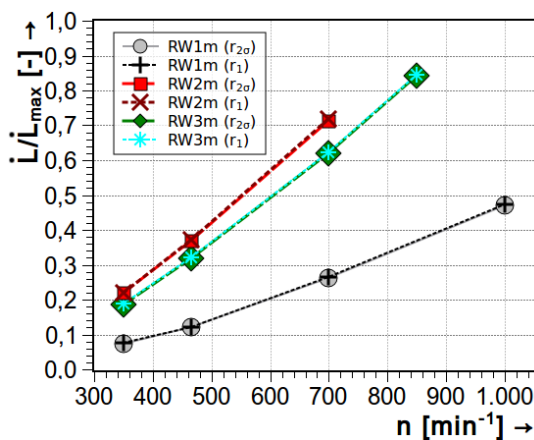


Abbildung 10: Einfluss der Strahlradien auf den Drehimpulsstrom ($x/D=0$)

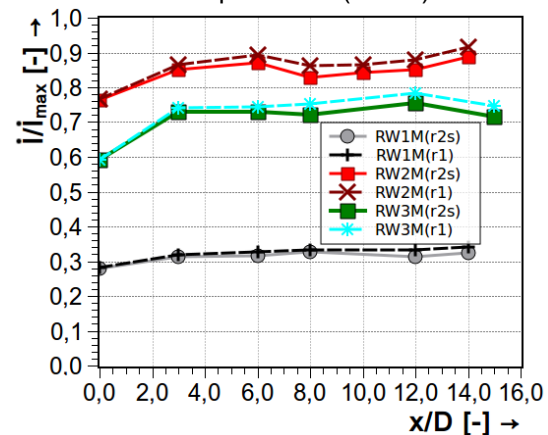


Abbildung 11: Einfluss der Strahlradien auf den Axialimpulsstrom entlang der Strahlachse

Vergleich der Bestimmungsmethoden

Dieser Abschnitt dient dem Vergleich der aus den LDA-Messungen gewonnenen Axial- und Drehimpulsströmen zu den aus den Kraftmessungen gewonnen Größen.

Abbildung 12 zeigt den Schub-Drehzahlverlauf der einzelnen Rührwerke. Der Verlauf wurde mittels Kraftmessung gewonnen. Zusätzlich eingezeichnet sind der aus den LDA-Messungen gewonnene Schub. Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren minimal sind (max. < 5%). Tendenziell wird dabei der Schub aus den LDA-Messungen kleiner bestimmt als aus den Kraftmessungen. Für den Drehimpuls zeigen sich größere Abweichungen (bis zu 16,5%, Abb. 13). Die Ursache für die Unterschiede sind einerseits in der Größenordnung der Drehimpulse bzw. der tangentialen Geschwindigkeit zu finden, andererseits in der Bestimmung des Drehmoments aus der Kalibrierungskurve. Vom Betrag her sind die Differenzen jedoch gering. Generell lässt sich also festhalten, dass die Bestimmungsmethode kaum einen Einfluss auf die, für den Ähnlichkeitsansatz relevante, Beiwertsbestimmung hat.

Abhängigkeit des Schubbeiwertes K_T von der Re-Zahl

Im Rahmen der Untersuchungen sind Drehzahl-Schub-Kurven gefahren worden, um die Abhängigkeit von der Drehzahl und damit von der Re-Zahl zu erfassen. Die Definition der Re-Zahl für Freistrahlen ist in Gleichung 6 dargestellt.

$$Re = \frac{\pi \cdot n \cdot \rho \cdot D^2}{\mu} \quad (6)$$

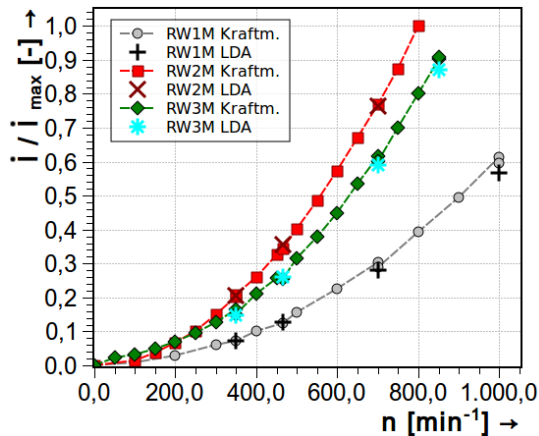


Abbildung 12: Vergleich des Schubs bei verschiedenen Bestimmungsmethoden

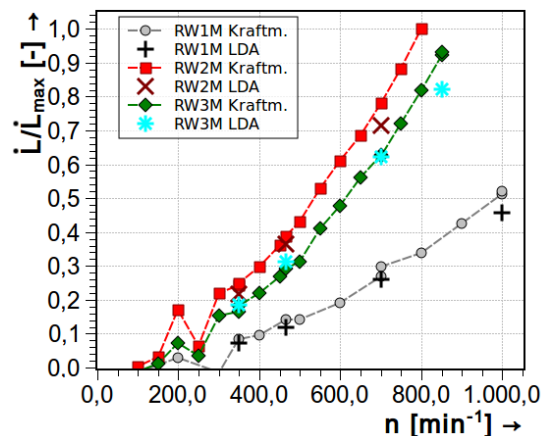


Abbildung 13: Vergleich des Drehmoments bei verschiedenen Bestimmungsmethoden

Abbildung 14 zeigt die aus den Messdaten gewonnenen Schubbeiwerte in Abhängigkeit der Re-Zahl. Die Beiwerte wurden dabei mittels des Schubbeiwertes von RW3M bei $Re \approx 8 \cdot 10^5$ normiert. Es zeigt sich, dass die Beiwerte eine gewisse Abhängigkeit von der Re-Zahl aufweisen. Dieses ist naheliegend, da sich der Betriebszustand des Rührwerks mit der Drehzahl ändern wird. Die Blätter der Rührwerke sind vergleichbar zu Tragflügeln. Bei der Tragflügelumströmung hat die Saugseite einen größeren Einfluss auf den Auftrieb bzw. hier auf dem Schub. Eine anliegende Strömung um das Profil hat somit eine größere Effektivität als eine Umströmung mit Ablösung (s. Abb 15).

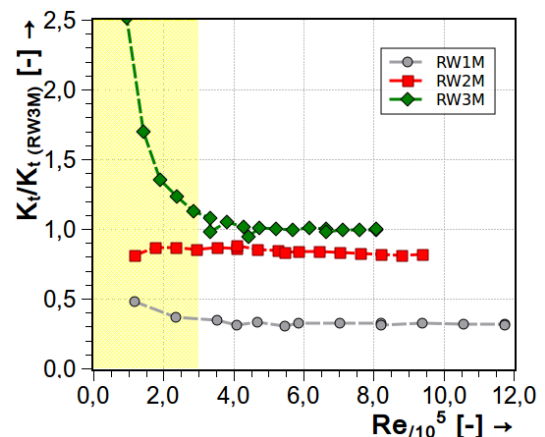


Abbildung 14: Abhängigkeit der Beiwerte von der Re-Zahl

Die Ablösung kann durch einen kritischen Anstellwinkel oder durch Erhöhung der Geschwindigkeit, damit auch der Re-Zahl erfolgen. Kornev [2009] gibt ab einen Bereich $Re > 3 - 5 \cdot 10^5$ eine Unabhängigkeit der Beiwerte von Propellern von der Re-Zahl an. Diese Eigenschaft lässt sich gut an den durchgeführten Messungen zeigen. Für den Fall, dass die genaue Bestimmung der Beiwerte unabhängig von der Re-Zahl erforderlich ist, besteht eine Korrekturmöglichkeit nach Kornev [2009] für gering belastete Propeller.

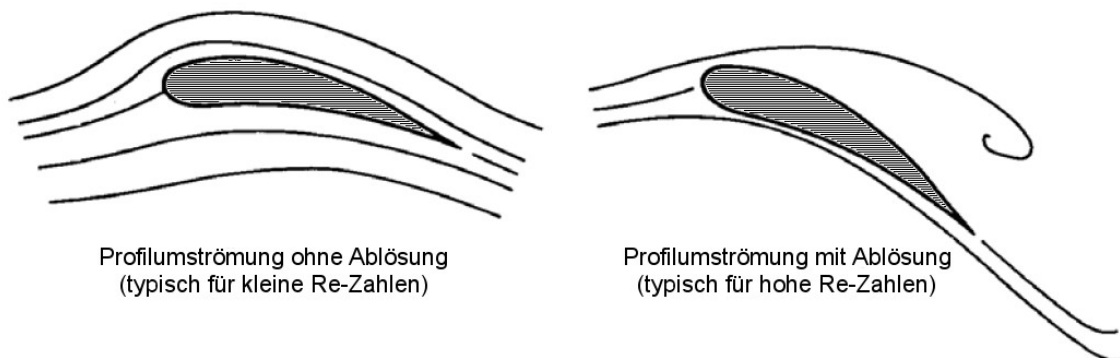


Abbildung 15: Tragflügelumströmung ohne und mit Ablösung [Kornev 2009]

Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung ist ein Vergleich der Bestimmungsmöglichkeiten zur Beiwertermittlung verdrahter Freistrahlen. Dazu wurde ein Messaufbau konzipiert, der synchrone Kraft- und LDA-Messungen des Strömungsfeldes ermöglicht.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde detailliert auf verschiedene Definitionen und Einflüsse des Strahlradius eingegangen. Aus praktischer und theoretischer Sicht erwiesen sich zwei Radien als sinnvoll. Dabei handelt es sich um den Radius r_1 , dieser ist durch die Isotachenline $u_x = 1\% u_{x,max}$ definiert, und den Radius $r_{2\sigma}$, welcher durch die Isotachenline $u_x = e^{-2} u_{x,max}$ definiert ist. Der Einfluss der beiden Strahlradien zur Bestimmung der Beiwerte auf der Propellerebene erwies sich als vernachlässigbar klein. Auch im Fernfeld war nur geringer Einfluss nachzuweisen, so dass auf Grund der höheren Größenordnung der Grenzgeschwindigkeit bei $r_{2\sigma}$ und der damit verbundenen besseren Erfassbarkeit dieser Radius als Strahl- und Integrationsgrenze gewählt wurde.

Die Bestimmung des Axialimpulses aus der Kraftmessung wurde durch eine drehbare Halterung und die damit verbundene Bestimmbarkeit des Schubes durch Hebelgesetze an der Oberfläche ermöglicht. Das Moment wurde aus der Motorstromaufnahme des Antriebes gewonnen. Dazu wurde eine Kalibrierung durch Anlegen eines Bremsmoments mittels Pronyschem Zaums und zeitgleicher Aufnahme des Motorstroms durchgeführt. Durch die gewonnene Kalibrierkurve konnte das Drehmoment bestimmt werden.

Der Vergleich zwischen den aus LDA- und Kraft-Messungen gewonnen unterschiedlichen Axialimpulsströmen zeigt eine generelle Unabhängigkeit von der Methode. Die Unterschiede lagen unter 5% und sind damit vernachlässigbar klein. Zumeist wurde dabei der Axialimpulsstrom aus der LDA-Messung geringer als bei der Ermittlung durch Kraftmessung ermittelt. Beim Drehimpulsstrom zeigen sich größere Abweichungen, bis zu 16,5%. Dieses ist jedoch auf die einerseits geringen tangentialen Strömungsgeschwindigkeiten sowie auf die relativ ungenaue Bestimmungsmethode mittels der Motorstromaufnahme zurückzuführen. Allgemein zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung der Verfahren.

Ferner zeigte sich eine Abhängigkeit der Beiwerte von der Re-Zahl bis zu $Re \approx 3 \cdot 10^5$. Weiter zu klären bleibt, in welchen Rahmen die Re-Zahl einen Einfluss auf die Ähnlichkeit des Ausbreitungsverhaltens verdrahter Freistrahlen besitzt.

Literatur

Batchelor, G.K.: An introduction to fluid dynamics. Cambridge Univ. Pr., 2000.

Kraatz, W.: Hydromechanische Grundlagen für die turbulente Diffusion. In: Acta hydrochimica et hydrobiologica, Band 6(5):S. 481491, 1978.

Kornev, N.: Propellertheorie. Shaker, 2009

Maier, P.: Untersuchung isothermer drallbehafteter Freistrahlen. In: Forschung im Ingenieurwesen, Band 34(5):S. 133140, 1968.

Sieg, M., von Hörsten, C., Hüttmann, F., Leder, A.: Charakterisierung verdrahter Unterwasserfreistrahlen, in: Egbers, C., Ruck, B. et al. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 18. Fachtagung der GALA e. V., Cottbus [2010], S. 34.1 – 34.11

Thuermer, K.: Ausbreitungsmechanismen von Suspensionen zur Restaurierung stehender Gewässer am Beispiel des Schalen Luzin. Dissertation, Brauhaus-Universität Weimar, 1999.

Truckenbrodt, E.: Fluidmechanik 2: Band 2: Elementare Strömungsvorgänge dichteänderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen. Springer, 2008.