

Numerische und experimentelle Untersuchung eines Propellers in 4 Quadranten

Pascal Anschau, Martin Lamprecht, Klaus-Peter Mach, Karsten Rieck

Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
rieck@sva-potsdam.de

Einführung

Der Propeller ist gegenwärtig immer noch das wichtigste Propulsionsorgan von Schiffen. Er hat nicht nur die Aufgabe, das Schiff zu beschleunigen und mit bestimmter Geschwindigkeit voranzutreiben, sondern er muss auch als aktives Bremsorgan bei Schiffsmanövern wirksam werden. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um einen freien Propeller oder einen Propeller in eine Düse oder an einem POD handelt [1]. Die Fragestellung, das Verhaltens eines Propellers im gesamten Arbeitsbereich über 4 Quadranten – Vorwärtsfahrt, Stoppen aus Vorwärtsfahrt, Rückwärtsfahrt und Stoppen aus Rückwärtsfahrt – voraussagen zu können, ist heute immer noch aktuell. Die dazu genutzten Verfahren entsprechen dabei dem jeweils gegenwärtigen Stand der Technik.

Hinsichtlich ihrer Wirkung werden 3 verschiedene Betriebszustände des Propellers unterschieden. Diese können als „Propeller“, „Turbine“ und „Bremse“ bezeichnet werden. Beim Betriebszustand „Propeller“ wirkt der Schub in Fortschrittsrichtung und das Drehmoment entgegen der Drehrichtung. Der Propeller wirkt als Arbeitsmaschine. Der Betriebszustand „Turbine“ ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schub entgegen der Fortschrittsrichtung und das Drehmoment in Drehrichtung wirken. Der Propeller wirkt als Kraftmaschine. Der für Stoppvorgänge wichtigste Betriebszustand „Bremse“ ist durch einen Schub entgegen der Fortschrittsrichtung und Drehmoment entgegen der Drehrichtung gekennzeichnet.

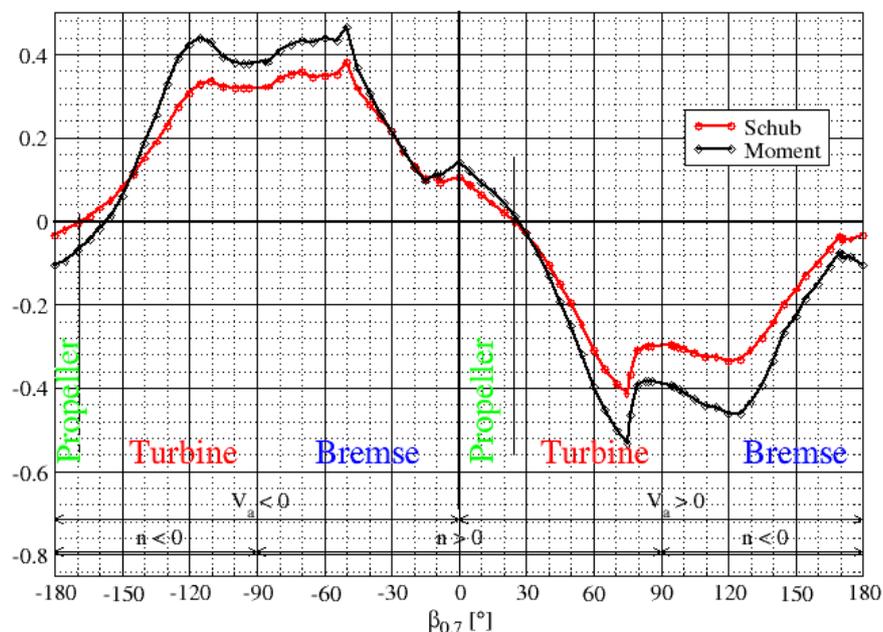


Abb. 1: Propellerzyklogramm für Schub und Drehmoment über 4 Quadranten

Die ermittelten Kennlinien für Schub und Drehmoment eines freifahrenden Propellers über alle 4 Quadranten sind in der Abbildung 1 dargestellt. Dabei erstreckt sich der für den Vortrieb des Schiffes interessierende Bereich von $\beta_{0,7} = 0^\circ$ (Pfahlzug) bis $\beta_{0,7} \approx 24^\circ$ (Nullschub), bei

Rückwärtsfahrt von $\beta_{0,7} = -180^\circ$ bis $\beta_{0,7} \approx -170^\circ$ bei dem hier verwendeten Propeller. Nur in diesen Bereichen sind überhaupt stationäre Betriebszustände möglich. In den anderen Bereichen werden die Betriebspunkte nur durchlaufen, weil dort keine konstante Geschwindigkeit gefahren wird. So erstreckt sich z.B. der Umsteuervorgang eines Festpropellers von der stationären „Fahrt voraus“ ($0^\circ < \beta_{0,7} < 24^\circ$) mit Wechsel der Drehrichtung bei $\beta_{0,7} = 90^\circ$ bis zum Stopp ($\beta_{0,7} = 180^\circ$) und weiter zur stationären Rückwärtsfahrt.

Daraus ergibt sich, dass der Propeller über den Fahrzustand „Fahrt voraus“ hinaus optimiert werden muss. Dabei gilt es die auftretenden hydrodynamischen Belastungen zu erfassen, um damit den Propeller einer Festigkeitsanalyse zu unterziehen.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten FuE-Projekts „Numerische und experimentelle Untersuchung der Umströmung von Schiffspropellern im Bereich von vier Quadranten“ erfolgte einerseits die Berechnung der viskosen Umströmung um einen freifahrenden Propeller in den verschiedensten Betriebszuständen. Im experimentellen Teil lagen die Schwerpunkte auf der Messung von Kräften und Momenten am gesamten Propeller und am Einzelflügel sowie in der Messung des Geschwindigkeitsfeldes um den Propeller. Die Strömungsmessungen beinhalteten LDV- und PIV-Untersuchungen. Damit wurden die Grundlagen für eine Validierung der Berechnungsergebnisse geschaffen.

Untersuchungsobjekt

Der Ausgangspropeller für die Untersuchungen war der Festpropeller eines 1200 TEU Containerschiffes. Aus diesem entstand durch Skalierung der Verstellpropeller VP 1455. Seine Flügel sitzen wahlweise auf der Standardnabe oder auf der Messnabe, in der ein Messglied zur Aufnahme der Momente am Einzelflügel untergebracht ist. Der Nabendurchmesser der Messnabe war mit $d_n = 0.075$ m vorgegeben. Dadurch hat der VP 1455 ein größeres Nabendurchmesserverhältnis als der Originalpropeller. Die Hauptabmessungen des Propellers VP 1455 sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Durchmesser	D	= 0.300 m
Steigungsverhältnis	$P_{0,7}/D$	= 0.941
Flächenverhältnis	A_E/A_0	= 0.580
Naben-/Durchmesserverhältnis	d_n/D	= 0.250
Flügelzahl	z	= 4
Orientierung		rechtsdrehend

Experimentelle Untersuchungen

4-Quadrantenversuche

Die experimentellen Untersuchungen umfassten einerseits die Bestimmung des Propellerzyklogramms für Schub und Moment des gesamten Propellers als auch für die Momente am Einzelflügel, jeweils über alle 4 Quadranten. Die Messungen wurden im Kavitationstunnel K 15A der SVA Potsdam mit einem Dynamometer vom Typ H 36 der Firma Kempf & Remmers durchgeführt. Der Tunnelquerschnitt im Bereich der Messstrecke betrug 850×850 mm.

Bei 4-Quadrantenversuchen wechselt die Richtung der Zuströmung zum Propeller. Da die Richtung der Strömung im Kavitationstunnel nicht geändert werden kann, wurde das Dynamometer mitsamt Propeller gedreht, um die Anströmrichtung zu wechseln. Die Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau mit dem Dynamometer in der Messstrecke des Kavitationstunnels.

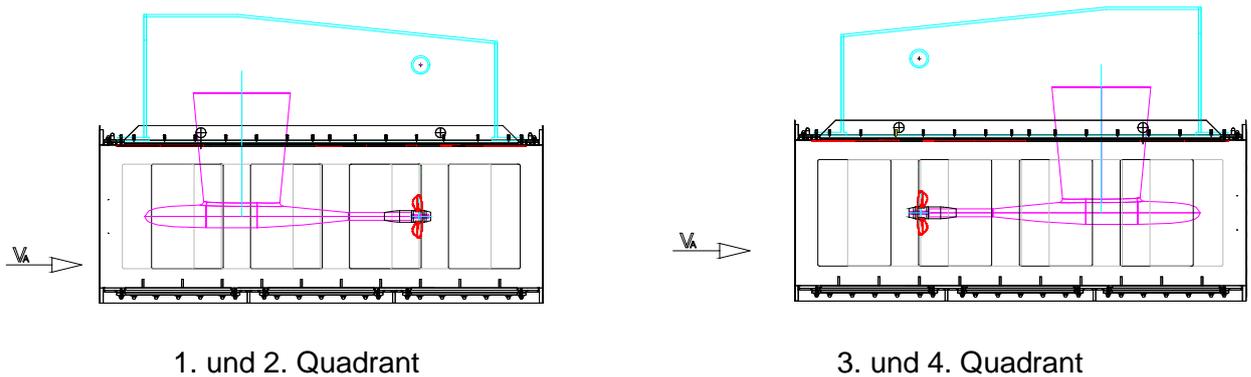


Abb. 2: Prinzipieller Versuchsaufbau im Kavitationstunnel

Ein Flügel des Flügelsatzes wurde auf dem Messglied montiert, das sich im Innern der Messnabe befindet. Die Messnabe wurde von der SVA entworfen und gefertigt. Die Ergebnisse der 4-Quadrantenversuche sind aus den Propellerzyklogramm für Schub und Moment in der Abbildungen 3 ersichtlich. Die Beiwerte für den Schub A_T und das Drehmoment A_Q sind als Funktion des Zuströmwinkels $\beta_{0,7}$ angegeben und wie folgt definiert:

$$A_T = \frac{T}{\rho D^2 (V_a + (0.7D \times \pi \times n)^2)} \quad A_Q = \frac{Q}{\rho D^3 (V_a + (0.7D \times \pi \times n)^2)}$$

$$\beta_{0,7} = \arctan\left(\frac{V_a}{0.7D \times \pi \times n}\right) \quad J_k = \frac{V_{ak}}{n \times D}$$

$\beta_{0,7}$ ist der Winkel, der sich aus der vektoriellen Addition der Anströmgeschwindigkeit V_a und der Umfangsgeschwindigkeit des Flügels bei $r/R = 0.7$ ergibt. Für $V_a = 0$ (Pfeilzug) ist $\beta_{0,7} = 0$, für den stehenden Propeller ($n = 0$) und $V_a > 0$ ergibt sich $\beta_{0,7} = 90^\circ$. Der Betrag der Resultierenden aus Umfangs- und Anströmgeschwindigkeit ergibt sich als $\sqrt{V_a^2 + (0.7D \times \pi \times n)^2}$.

Die dimensionslosen Beiwerte der Momente des Einzelflügels um die drei Achsen sind A_{M_x} , A_{M_y} und A_{M_z} . Angegeben ist nur der hydrodynamische Anteil. Um diesen zu bestimmen, wurden in Luft Korrekturwerte ermittelt, um damit aus den in Wasser gemessenen Werten den hydrodynamischen Anteil zu berechnen. Es gilt beispielsweise:

$$A_{M_x} = \frac{M_x}{\rho D^3 (V_a^2 + (0.7D \times \pi \times n)^2)}$$

Für die Momente (bzw. deren Beiwerte) gilt:

- M_x - Moment des Flügels um die Propellerachse
- M_y - Moment, das den Flügel in Richtung der Anströmung biegt
- M_z - Verstellmoment des Flügels um den Flügelfuß

Die Ergebnisse sind im Zylogramm der Momentenbeiwerte des Einzelflügels in Abbildung 3 dargestellt. Die gemessenen Werte sind über mehrere Umdrehungen gemittelt worden.

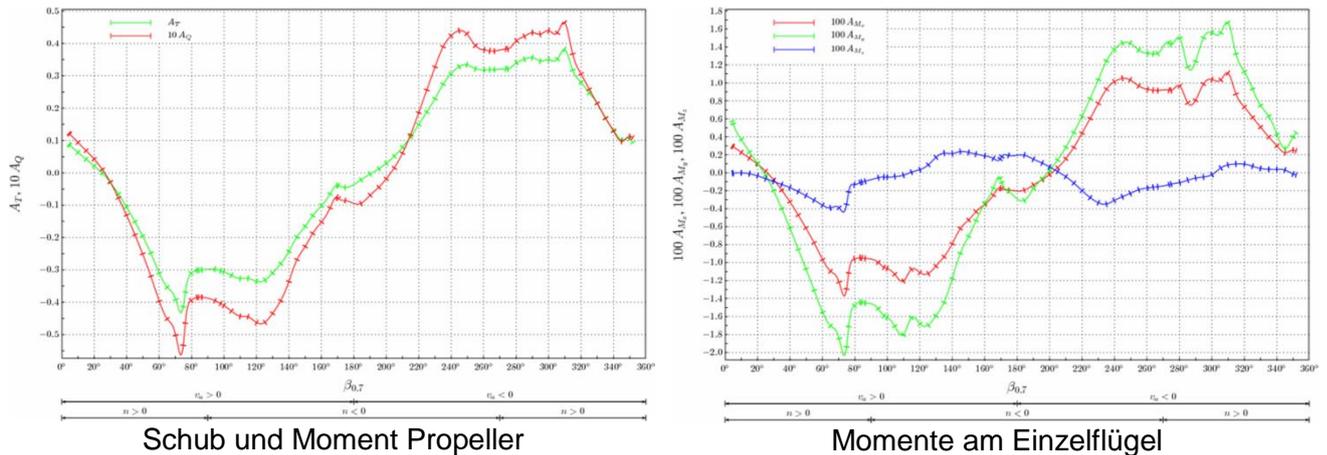


Abb. 3: Propellerzyklogramme für VP 1455

LDV- und PIV-Messungen

LDV-Messungen

Am Kavitationstunnel der SVA Potsdam steht für Geschwindigkeitsmessungen ein 2D-Laser Doppler Velocimetrie System (LDV) der Firma TSI zur Verfügung. Mit dem System lassen sich quasipunktförmige, berührungslose Strömungsmessungen, ohne Störung der Strömung, durchführen.

Der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf in der Umgebung eines Propellers lässt sich in 3 Geschwindigkeitsanteile zerlegen, einen stationären Geschwindigkeitsanteil, einen periodischen Geschwindigkeitsanteil, hervorgerufen durch die Propellerdrehbewegung, sowie einen stochastischen Anteil. Um den periodischen Anteil der Geschwindigkeit zu erfassen, wird neben der Geschwindigkeits- und Zeitinformation noch der momentane Propellerdrehwinkel mit gespeichert. Der stochastische Anteil setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen:

- Turbulenz der Strömung im Messpunkt
- Schwankungen des periodischen Anteils der Geschwindigkeit pro Propellerumdrehung, hervorgerufen durch stochastische Ablösevorgänge, Schwingungen des Propellers und der Propellerwelle sowie Schwankungen in der Zuströmung bzw. der Propellerdrehzahl
- Signalrauschanteile und Störsignale bei der LDV-Messung

Während im 1. und 3. Quadranten der periodische Geschwindigkeitsanteil überwiegt und sich das Wirbelsystem relativ konstant ausbildet, bezogen auf den Ort, die Ausdehnung und die Wirbelstärke, ist das Geschwindigkeitsfeld im 2. und 4. Quadranten stark instationär. Mit dem LDV-System lassen sich derartige Vorgänge nur schwer auflösen, da zu einem Zeitpunkt nur an einem Messort die Geschwindigkeit ermittelt wird. Damit lässt sich das Wirbelsystem für instationäre Vorgänge nicht wiedergeben. Das Ziel der Auswertung ist, die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten als mittlere Geschwindigkeiten in dem Messpunkt zu berechnen.

PIV-Messungen

Gegenüber der punktweise messenden LDV ist **Particle Image Velocimetrie (PIV)** ein optisches Messverfahren, bei dem die augenblicklichen Geschwindigkeitsinformationen zu einem definierten Zeitpunkt erfasst werden. Wie bei LDV wird die Wassergeschwindigkeit nicht direkt, sondern über die Bewegung von Streuteilchen erfasst, hier aber in einem Laserlichtschnitt mit hoch auflösenden Kameras. Dazu wird mit einem Laser ein Doppelblitz mit definiertem Zeitabstand ausgelöst und

synchron mit einer oder zwei Kameras Bilder von den Streuteilchen im Lichtschnitt gemacht. Aufgabe der Auswertung ist es, über Korrelationsverfahren herauszufinden, wie sich die Lage der Teilchen in beiden Bildern verändert hat, um daraus die Geschwindigkeitsvektoren zu berechnen. In der Abbildung 4 ist das Verfahren PIV prinzipiell dargestellt.

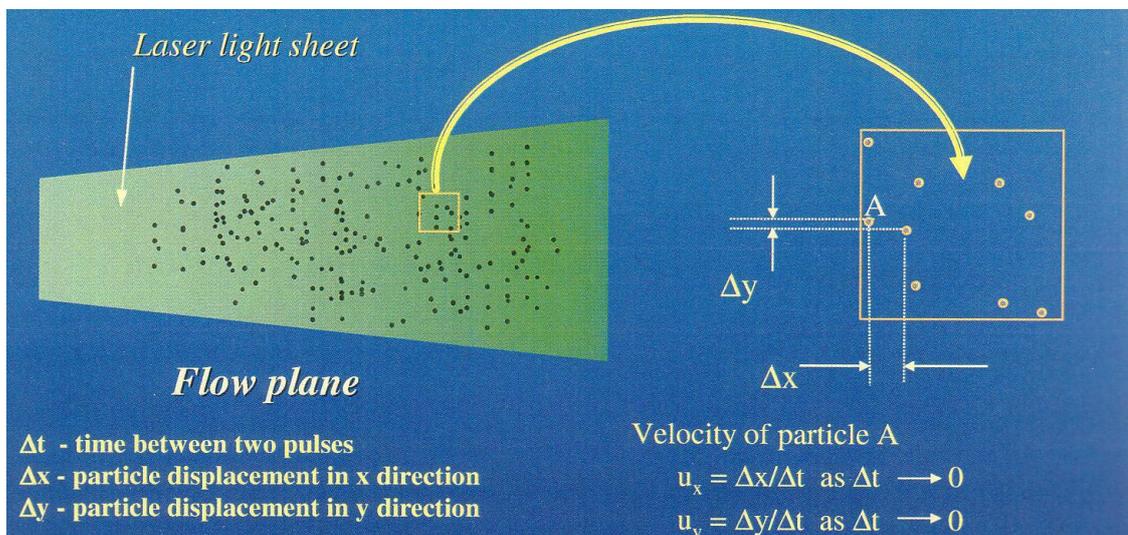


Abb. 4: Darstellung des Messprinzips PIV

Da man Geschwindigkeitsinformationen für eine ganze Ebene mit relativ hoher Frequenz erfassen kann, ist PIV zur Untersuchung von instationären Strömungsvorgängen besonders geeignet.

Seit Mitte 2006 verfügt die SVA über ein 3D-PIV-System für den praktischen Einsatz in der Schlepprinne. Der modulare Aufbau des Systems erlaubt verschiedene Kameraanordnungen, siehe Abbildung 5.

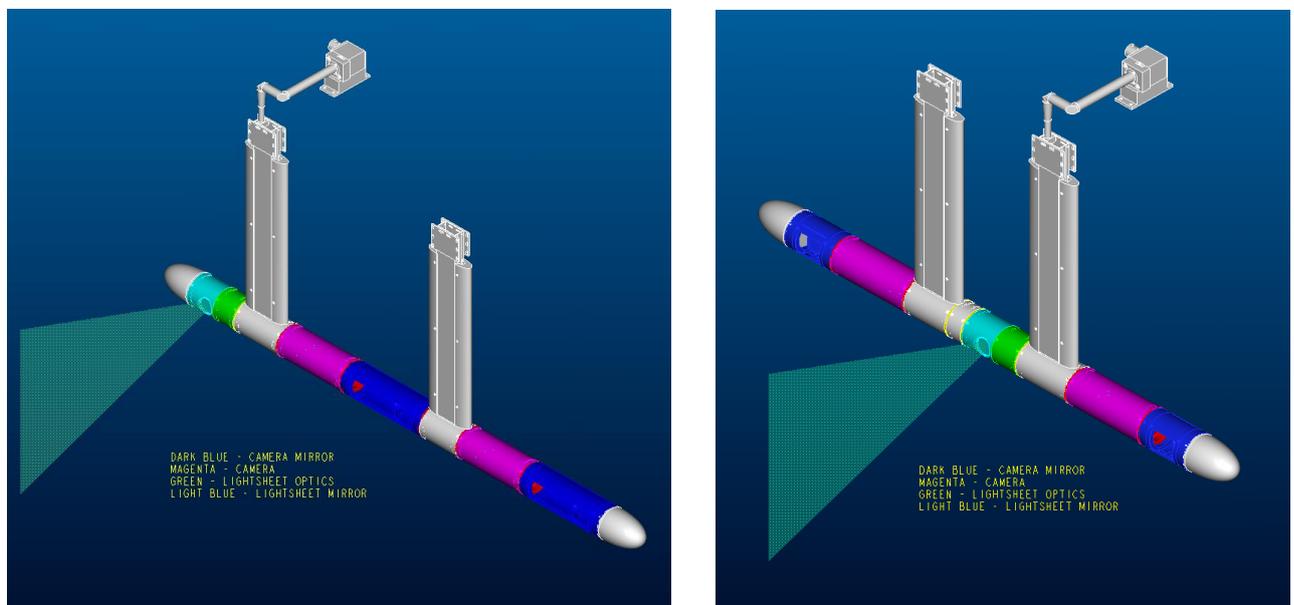


Abb. 5: Asymmetrische und symmetrische Kameraanordnung

Mit dem Propeller VP 1455 wurden PIV-Messungen in der Schlepprinne als auch im Kavitationstunnel in mehreren Betriebspunkten in allen 4 Quadranten durchgeführt.

Numerische Berechnungen

Aufbereitung der Geometrie und Gittergenerierung

Als Voraussetzung zur Generierung des Rechengitters muss die vollständige Geometrie des Propellers, beschrieben als ein 3D-Flächenmodell, aufbereitet sein. Um den Propeller wird ein weiträumiges zylindrisches Lösungsgebiet festgelegt. Diese beinhaltet 2 getrennte Rechengitter, ein Inneres und ein Äußeres. Im inneren Gitter wird der Nahbereich um den Propeller modelliert. Das äußere Gitter enthält eine Aussparung für das Innengitter und beschreibt das Fernfeld. Die Rechengitter sind blockstrukturierte, körperangepasste Gitter und wurden mit dem Programm ANSYS ICEM CFD erzeugt.

Grundlage zur Definition der Randbedingungen an den Begrenzungen des Berechnungsgebietes ist die Vorstellung, dass der Propeller sich an einem festen Ort im Strömungsgebiet befindet. Er rotiert mit konstanter Drehzahl n und wird mit der aus der Fortschrittsziffer berechneten Geschwindigkeit angeströmt. Am Einströmrand des Berechnungsgebietes wird diese als axiale Geschwindigkeit vorgegeben. Zur Turbulenzmodellierung kommt das SST-Modell zum Einsatz. Für die Berechnungen werden die Stoffgrößen von Frischwasser bei einer Temperatur von 15°C verwendet.

Die Rechengitter wurden in einem iterativen Prozess bzgl. Ausdehnung und Knotenverteilung optimiert. Mit der gewählten Ausdehnung des Lösungsgebietes ist davon auszugehen, dass die Umströmung des Propellers nicht durch die Randbedingungen an den zylindrischen Rändern des Außengebiets bzw. durch Versperrungseffekte beeinflusst wird.

Zum Vergleich mit den Geschwindigkeitsmessungen im Kavitationstunnel, bei welchen nicht mehr von einem unbegrenztes Strömungsgebiet ausgegangen werden kann, wurde ein äußeres Rechengitter, dass der Geometrie der Messstrecke angepasst ist, erforderlich.

Mit den Rechengittern

- **Schlepprinne** - unbegrenztes Strömungsgebiet analog den Experimenten in der Schlepprinne und
- **Kavitationstunnel** - begrenztes Strömungsgebiet analog den Versuchen im Kavitationstunnel

stehen zwei optimierte Gitter für die Untersuchung des Propellers in 4 Quadranten zur Verfügung. Die numerischen Berechnungen erfolgten mit dem RANSE-Verfahren ANSYS CFX.

Berechnung des frei angeströmten Propellers in 4 Quadranten

Die Einstellung des jeweiligen Quadranten in der Berechnung erfolgt nur durch die Variation der Vorzeichen von Anströmgeschwindigkeit V_a und Drehzahl n . Im Gegensatz zu den Messungen wurde bei den Berechnungen im 3. und 4. Quadranten das Vorzeichen der Geschwindigkeit gewechselt, indem Ein- und Austrittsrand getauscht wurden. Die folgende Tabelle zeigt die Zuordnung der Vorzeichen von Anströmgeschwindigkeit und Drehzahl zu den Quadranten:

Quadrant	V_a	n
1	-	+
2	-	-
3	+	-
4	+	+

Für die ersten Berechnungen im unbegrenzten Strömungsgebiet wurden $V_a = \pm 5.25 \text{ m/s}$ und $n = \pm 25 \text{ s}^{-1}$ gewählt. Dies entspricht einer Fortschrittsziffer von $J = 0.7$ bzw. $\beta_{0.7} = 17.7^\circ$ im 1. Quadranten. Die Wahl der Betriebspunkte in den Quadranten 2 – 4 erfolgte pragmatisch durch Änderung der Dreh- bzw. Anströmrichtung.

Die zweite Serie von Berechnungen im unbegrenzten Strömungsgebiet orientierte sich an den Betriebspunkten der PIV-Messungen in der Schlepprinne, $V_a = \pm 1.35 \text{ m/s}$ und $n = \pm 15 \text{ s}^{-1}$, entsprechend $J = 0.3$ ($\beta_{0.7} = 7.8^\circ$) im 1. Quadranten. Zusätzlich erfolgten noch Berechnungen für $J = \infty$ ($V_a = \pm 1.35 \text{ m/s}$, $n = 0 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 90^\circ$ und 270°).

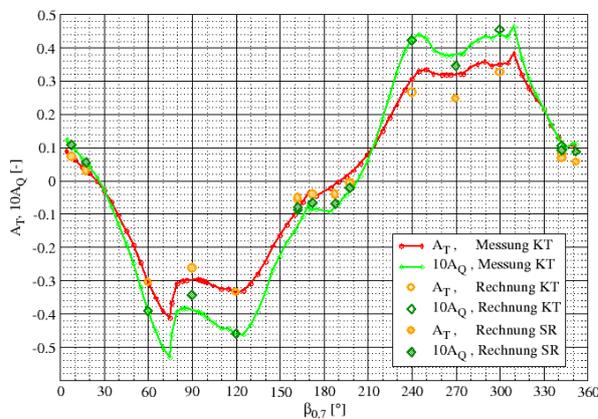
Alle Rechnungen im unbegrenzten Strömungsgebiet führten zu „stationären“ Lösungen, d.h. die auftretenden Schwankungen in den Kräften und den Geschwindigkeiten in verschiedenen Monitorpunkten über der Simulationszeit waren am Ende der Berechnung vernachlässigbar klein. Damit konnte mit guter Sicherheit ein Wert für jede ausgewertete Variable ermittelt werden.

Die dritte Rechenkampagne erfolgte für den Propeller in der Begrenzung des Kavitationstunnels für die Betriebspunkte entsprechend $J = 3.81$ ($V_a = \pm 5.71 \text{ m/s}$, $n = \pm 5 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 60^\circ$) im 1. Quadranten. Diese Berechnungen dienen zum Vergleich mit den LDV-Messungen im Kavitationstunnel. Die Betriebspunkte wurden danach festgelegt, um über den gesamten Bereich des Propellerzyklogramms $0^\circ \leq \beta_{0.7} \leq 360^\circ$ relativ gleichmäßig verteilt, Berechnungen durchzuführen. Die Drehzahl $n = 5 \text{ s}^{-1}$ ist so gewählt worden, dass die Messnabe durch die wirkenden Kräfte und Momente nicht überlastet wird. Zusätzlich wurden die Betriebspunkte der 1. Serie bei $J = 0.7$, berechnet auf dem Gitter „Schlepprinne“, unter der Randbedingung Kavitationstunnel wiederholt.

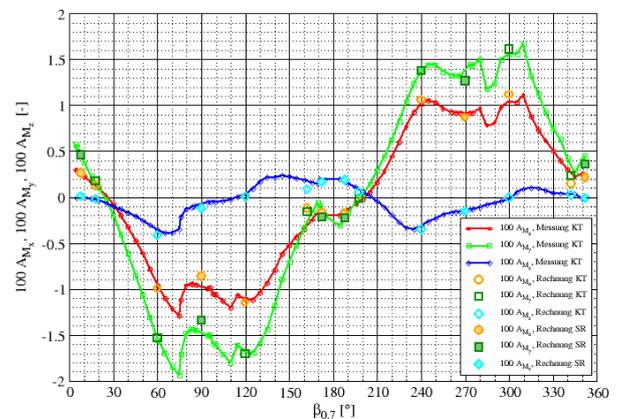
Vergleich der Ergebnisse von Messungen und Berechnungen

Kräfte und Momente

Die Messergebnisse für den Propeller VP 1455 wurden bereits in der Abbildung 3 gezeigt. Die Abbildung 6 stellt die Ergebnisse aller Berechnungen von Schub und Moment des Propellers den Ergebnissen der Messung gegenüber. Die Berechnungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen. Die größten Abweichungen treten in den Betriebspunkten $J = \infty$ ($\beta_{0.7} = 90^\circ$ und 270°) mit blockiertem Propeller sowie in den Betriebspunkten im 4. Quadranten auf. In diesen Punkten sind hohe instationäre Schwankungen zu erwarten. Die Abbildung 6 zeigt auch die Momente am Einzelflügel. Alle Berechnungen, im unbegrenzten als auch im begrenzten Strömungsgebiet, liefern hervorragend mit den Messungen übereinstimmende Ergebnisse.



Schub und Moment Propeller



Momente am Einzelflügel

Abb. 6: Propellerzyklogramme, Messungen und Berechnungen

Die 4 Berechnungen im begrenzten Strömungsgebiet entsprechend $\beta_{0.7} = 60^\circ, 120^\circ$ usw. wurden erst quasistationär und danach instationär durchgeführt. Im 1. und im 3. Quadranten lagen die instationären Schwankungen der Kräfte auf einen Flügel bei ca. $\pm 0.1\%$. Im 2. Quadranten lagen die Kraftschwankungen des Einzelflügels bei ca. $\pm 1.5\%$ und die des gesamten Propellers bei ca. $\pm 0.8\%$.

Die instationäre Berechnung im Betriebspunkt im 4. Quadranten ($\beta_{0.7} = 300^\circ$) erfolgte über mehr als 20 Umdrehungen. Die maximalen Schubschwankungen eines Flügels und des gesamten Propellers betragen ca. $\pm 20\%$ bzw. $\pm 3\%$, dargestellt in der Abbildung 7 über die letzten 13 Umdrehungen. Um die instationären Momente am Einzelflügel berechnen zu können, sind Berechnungsergebnisse über 1.25 Umdrehungen in einer Schrittweite von 20° ausgewertet worden. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 8. Die Mittelwerte dieser Kurven ergeben die Punkte in der Abbildung 7 bei $\beta_{0.7} = 300^\circ$. Trotz der enormen zeitlichen Schwankungen der Momente am einzelnen Flügel stimmen die über den Propeller summierten und über die Zeit gemittelten Werte der Berechnung mit den gemessenen Werten überein.

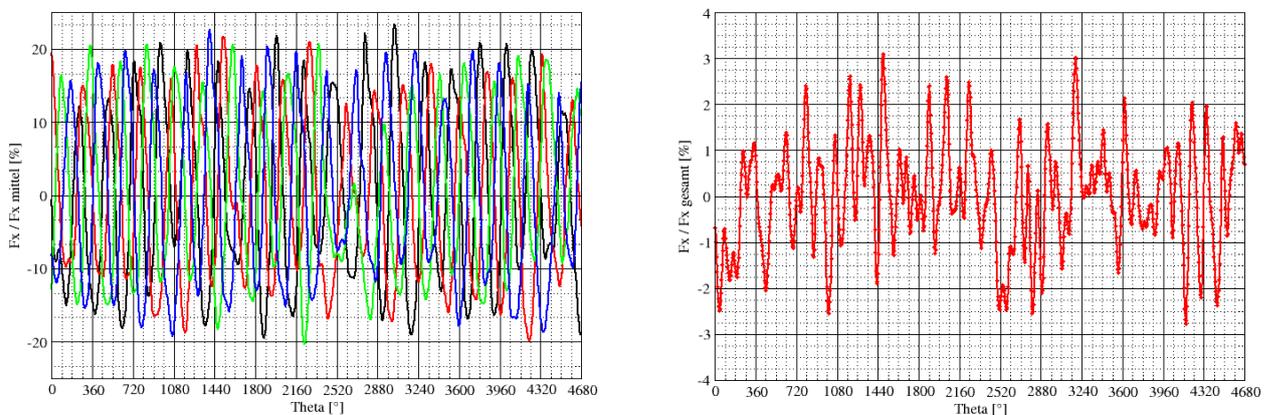


Abb. 7: Berechnete instationäre Schubschwankungen des Einzelflügels und des Propellers, Betriebspunkt im 4. Quadranten

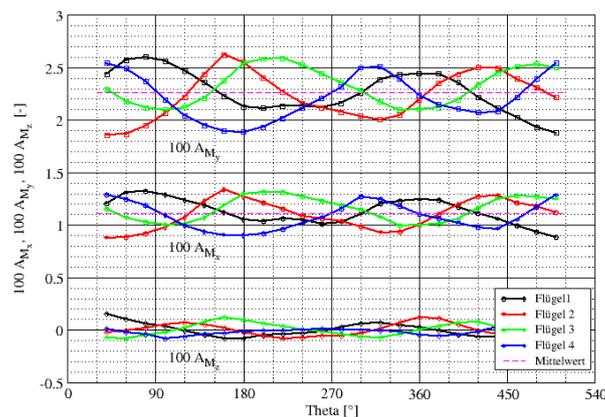


Abb. 8: Berechnete instationäre Momentenbeiwerte der Einzelflügel, Betriebspunkt im 4. Quadranten

LDV-Messungen im Kavitationstunnel

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der Geschwindigkeitskomponenten aus LDV-Messung und Berechnung. Dargestellt werden die Ergebnisse der Messungen im Kavitationstunnel und die Ergebnisse der Berechnungen im begrenzten Strömungsgebiet, entsprechend $J = 3.81$. Die bei den LDV-Messungen in den diskreten Messpunkten aufgenommenen Geschwindigkeiten wurden umfangsgemittelt. Damit liegt genau ein Wert für jeden Ort vor.

Die Berechnungen im 1. bis 3. Quadranten zeigten nur geringes instationäres Verhalten, siehe Bewertung der Kraftschwankungen. Es wird angenommen, dass eine Umfangsmittlung der berechneten Geschwindigkeitskomponenten auf einem Kreis mit dem Radius des Abstandes des Messpunktes von der Propellerachse der zeitlichen Mittelung im Experiment entspricht. Dazu müssen die berechneten Geschwindigkeiten vom kartesischen in das zylindrische Koordinatensystem umgerechnet werden.

Die Lage der Messebenen, in denen die Berechnungen ausgewertet werden, ist in der Abbildung 9 dargestellt.

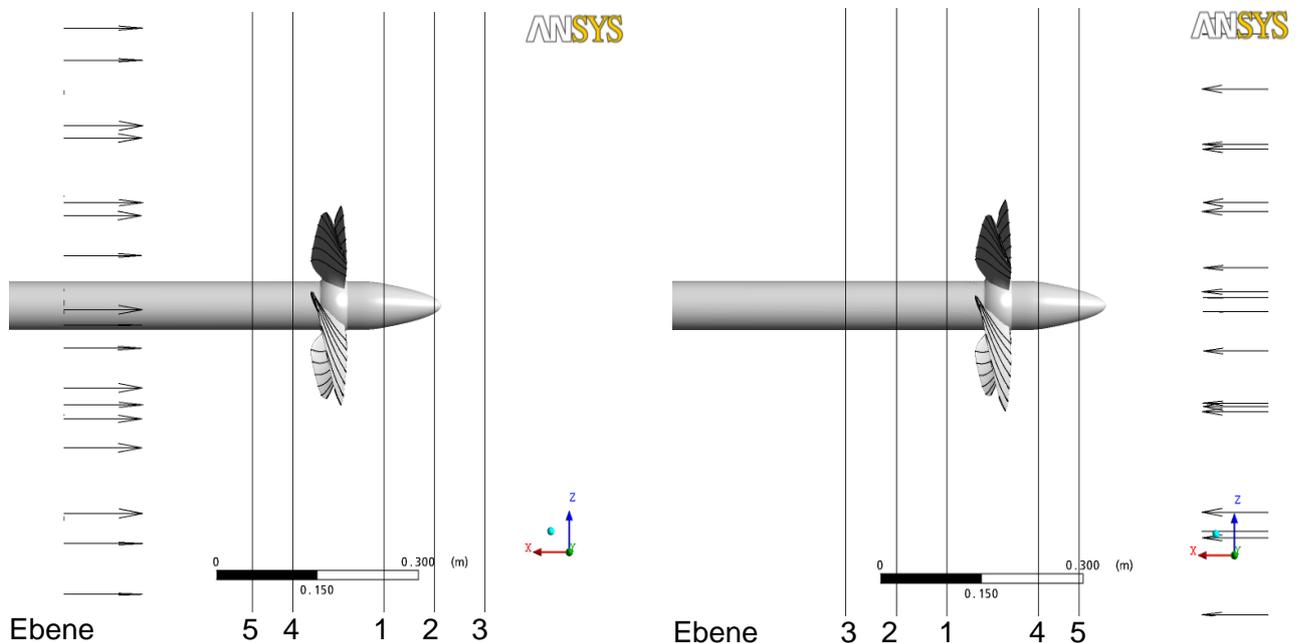


Abb. 9: LDV-Messebenen in der numerischen Untersuchung im 1. und 2. sowie im 3. und 4. Quadranten

Beispielhaft wird in 2 Betriebspunkten ein Vergleich ausgewählter Parameter vorgenommen.

Betriebspunkt im 1. Quadranten, $V_a = -5.71 \text{ m/s}$, $n = 5 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 60^\circ$

Die Abbildung 10 zeigt die Verteilung der berechneten axialen, tangentialen und radialen Geschwindigkeitskomponenten in der Messebene 1. Mit dem schwarzen Kreis ist der Durchmesser des hinter der Ebene liegenden Propellers gekennzeichnet.

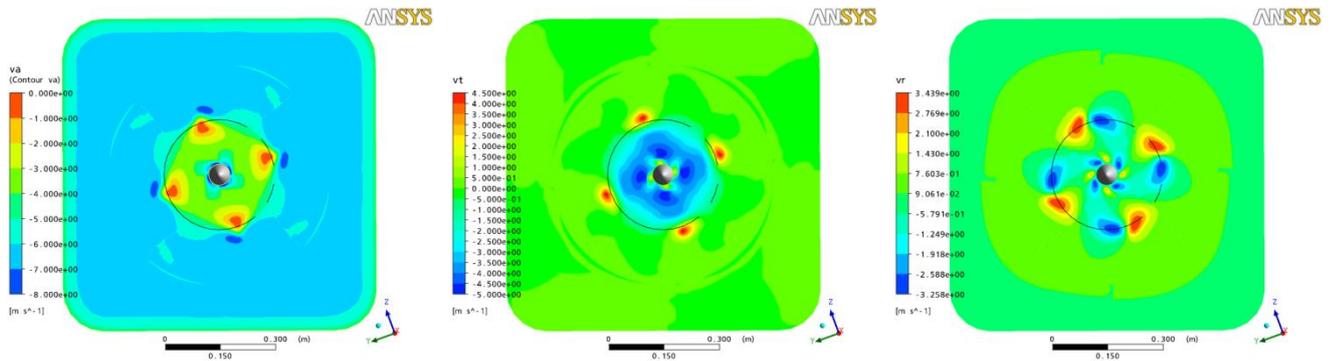


Abb. 10: Berechnete axiale, tangentielle und radiale Geschwindigkeiten, Betriebspunkt im 1. Quadranten, Ebene 1

In diesem Betriebspunkt arbeitet der Propeller als Turbine, d.h. er erzeugt Widerstand, siehe Abbildung 1. Die Strömung hinter dem Propeller wird gebremst und außen um den Propeller herum beschleunigt. Der Propellerstrahl weitet sich auf. Die tangentialen und radialen Komponenten bei $r/R \approx 1$ geben die Spitzenwirbel des Propellers wieder.

Den Vergleich der gemessenen und berechneten dimensionslosen axialen, tangentialen und radialen Geschwindigkeiten auf den 3 Strahlen in den Ebenen 1 bis 3 zeigt die Abbildung 11. Bis auf den Bereich direkt hinter der Nabe des Propellers weisen Messung und Berechnung eine sehr gute Übereinstimmung auf. In diesem Bereich tritt bei der Messung auch nur eine sehr geringe Datenrate auf. Die Differenzen in den radialen Komponenten sind ebenfalls gering, hier ist die andere Skalierung auf der y-Achse zu beachten.

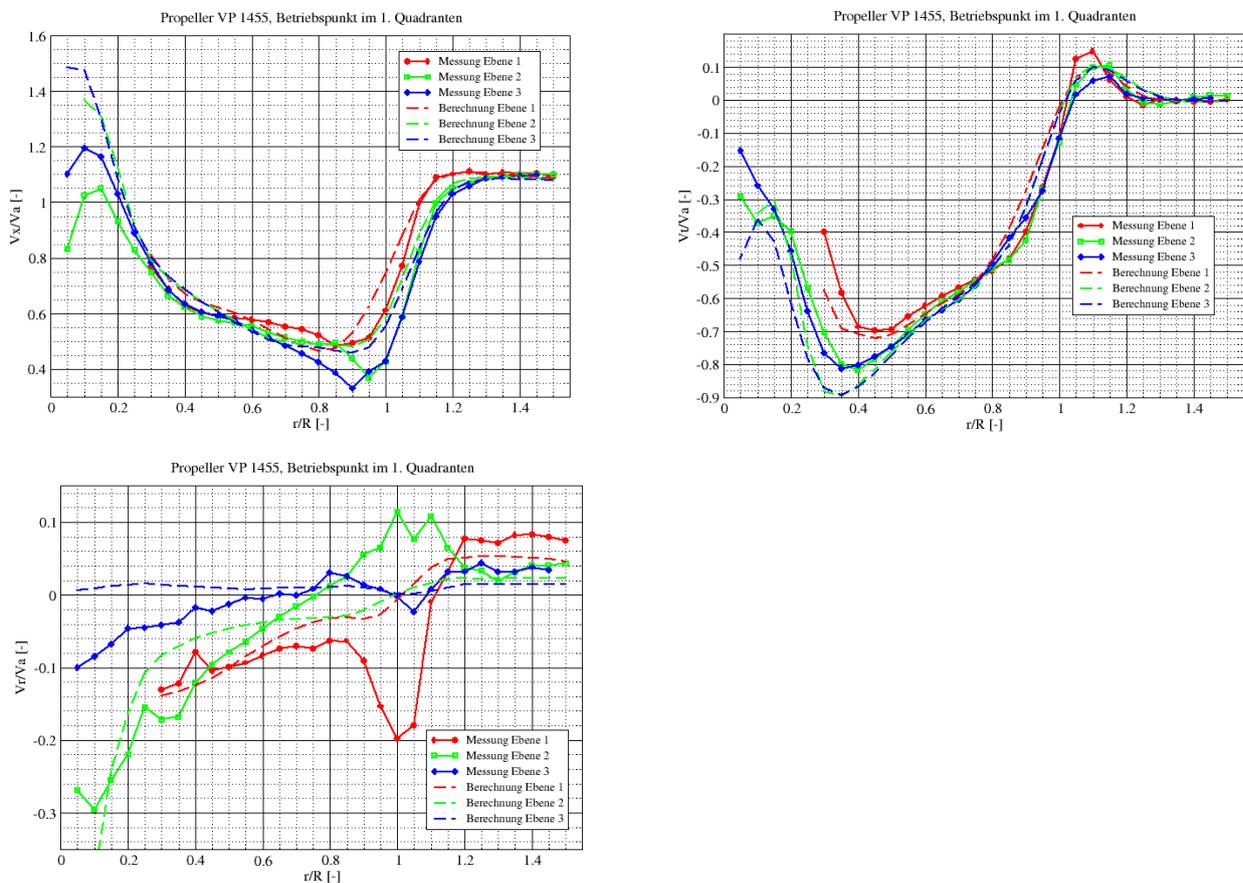


Abb. 11: Berechnete und gemessene axiale, tangentielle und radiale Geschwindigkeiten, Betriebspunkt im 1. Quadranten, Ebenen 1 - 3

In Anbetracht dessen, dass die dargestellten Werte der Berechnung eine Umfangsmittelung der in der Abbildung 10 gezeigten Geschwindigkeitskomponenten sind, als auch, dass die Messwerte zeitgemittelt wurden, sind die Abweichungen in der Abbildung 11 als gering einzuschätzen.

Betriebspunkt im 4. Quadranten, $V_a = 5.71 \text{ m/s}$, $n = 5 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 300^\circ$

Die instationären Berechnungen im Betriebspunkt im 4. Quadranten ergaben keinen mit der Flügelzahl oder der Drehzahl periodischen Verlauf. Auf die umfangsgemittelten Werte, die mit den Messwerten in der Abbildung 12 verglichen werden, hat dies aber nur geringen Einfluss. Die Übereinstimmung ist wieder sehr gut.

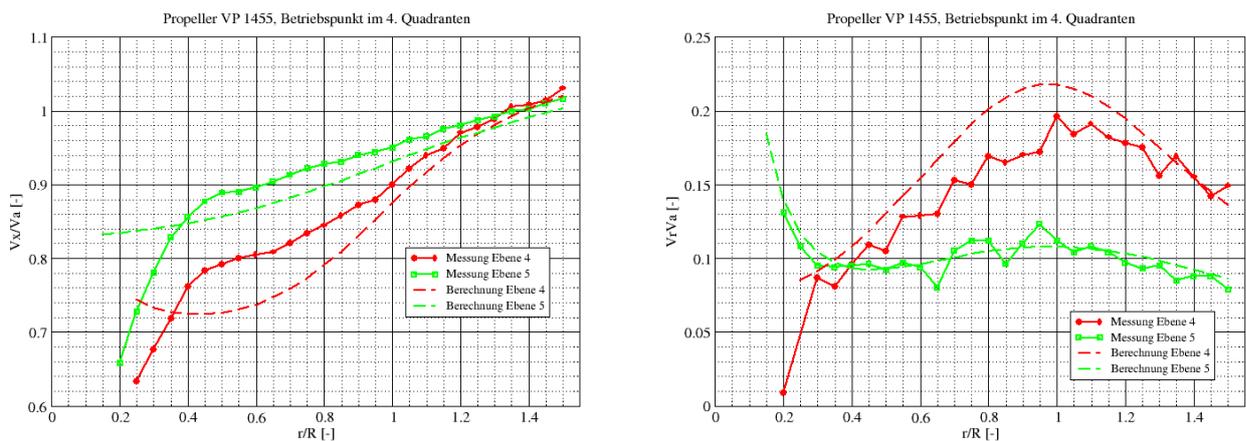


Abb. 12: Berechnete und gemessene axiale und radiale Geschwindigkeiten, Betriebspunkt im 4. Quadranten, Ebenen 4 und 5

PIV-Messungen in der Schlepprinne

Die PIV-Messungen wurden in jeweils einem Betriebspunkt in allen 4 Quadranten durchgeführt. Die Messebene lag im 1. und 2. Quadranten 0.2D hinter und im 3. und 4. Quadranten 0.2D vor dem Propeller. Die Ergebnisse der PIV-Messungen stellen hier den Mittelwert aus 20 Einzelmessungen für die gleiche Winkelstellung des Propellers dar.

Der Betriebspunkt im 1. Quadranten, $V_a = -0.9 \text{ m/s}$, $n = 10 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 7.8^\circ$ entspricht der Fortschrittsziffer $J = 0.3$ und bedeutet Vorausfahrt mit hoher Schubbelastung. Die Strömung im Propellerstrahl wird beschleunigt.

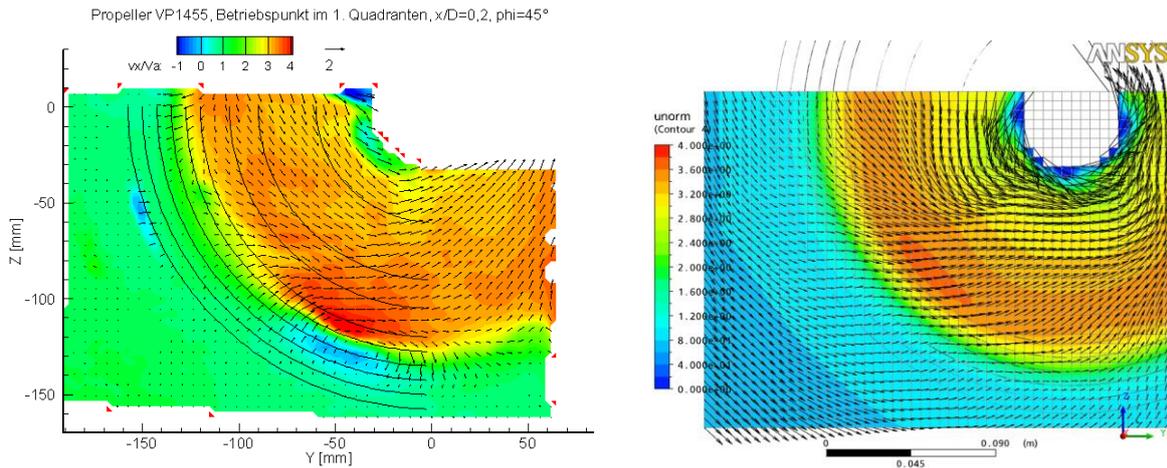


Abb. 13: PIV-Messung und Berechnung, Betriebspunkt im 1. Quadranten, Ebene hinter dem Propeller

Im Betriebspunkt im 2. Quadranten, $V_a = -0.9 \text{ m/s}$, $n = -10 \text{ s}^{-1}$, $\beta_{0.7} = 172.2^\circ$, wird das vorwärts fahrende System aufgestoppt, der Propellerstrahl arbeitet gegen die voraus gerichtete Strömung und verzögert die Anströmung.

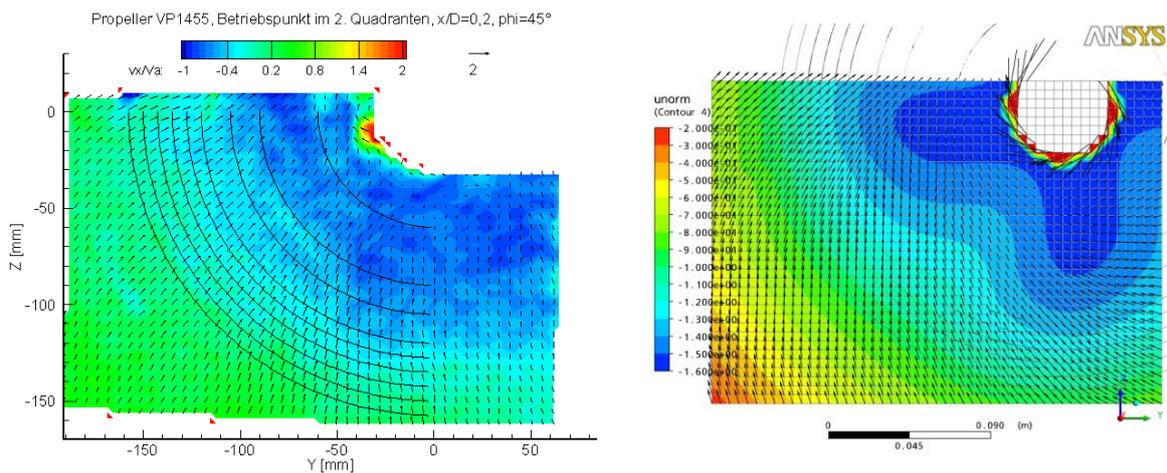


Abb. 14: PIV-Messung und Berechnung, Betriebspunkt im 2. Quadranten, Ebene hinter dem Propeller

Die PIV-Messungen zeigen trotz der Mittelung über 20 Messungen eine hochgradig instationäre Strömung, die von den Berechnungen nicht aufgelöst wird. Die qualitativen Prozesse werden jedoch wiedergegeben. Auch die Richtung der Vektoren stimmt qualitativ.

PIV-Messungen im Kavitationstunnel

Auf Grund der Fülle von Mess- und Berechnungsergebnissen werden auch in diesem Abschnitt nur einige ausgewählte Ergebnisse gegenübergestellt. Zur Darstellung dient die Ebene senkrecht zur Propellerebene durch die Mitte der Propellerwelle, d.h. die x-z Ebene. Der Propeller selbst befindet sich immer in der gleichen Position. Die Quergeschwindigkeiten in der Messebene sind als Vektoren dargestellt. Die Geschwindigkeitskomponente normal zur Ebene, die Tangentialgeschwindigkeit, wurde mit der ungestörten Anströmgeschwindigkeit normiert.

Betriebspunkt im 1. Quadranten, $V_a = -5.71$ m/s, $n = 5$ s⁻¹, $\beta_{0.7} = 60^\circ$

Der Propeller arbeitet bei dieser Fortschrittsziffer $J = 3.8$ im Turbinenbetrieb. Die Strömung hinter dem Propeller wird gebremst und außen um den Propeller herum beschleunigt. Die Umfangsgeschwindigkeit erfasst den mit dem Turbinenbetrieb verbundenen Energieentzug der Strömung sehr gut. Auch die Strahlaufweitung ist gut sichtbar, siehe Abbildung 15.

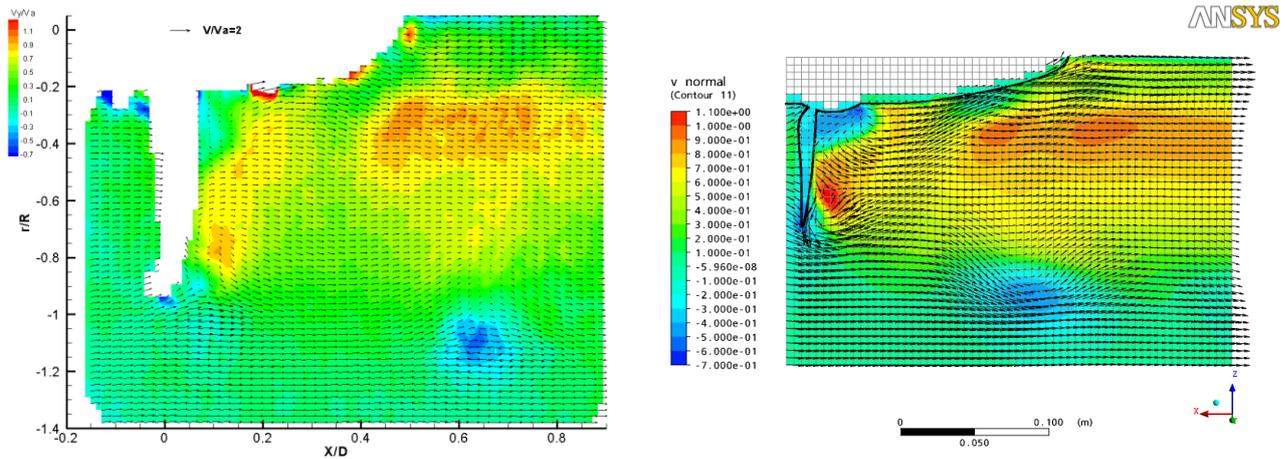


Abb. 15: PIV-Messung und Berechnung, Betriebspunkt im 1. Quadranten

Betriebspunkt im 4. Quadranten, $V_a = 5.71$ m/s, $n = 5$ s⁻¹, $\beta_{0.7} = 300^\circ$

Bei relativ hoher Rückwärtsfahrt hat der Propeller eine geringe Vordrehzahl. Die Lage des gemessenen Wirbels hinter dem Flügel wird recht gut wiedergegeben, während die tangentielle Geschwindigkeitskomponente größere Unterschiede aufweist.

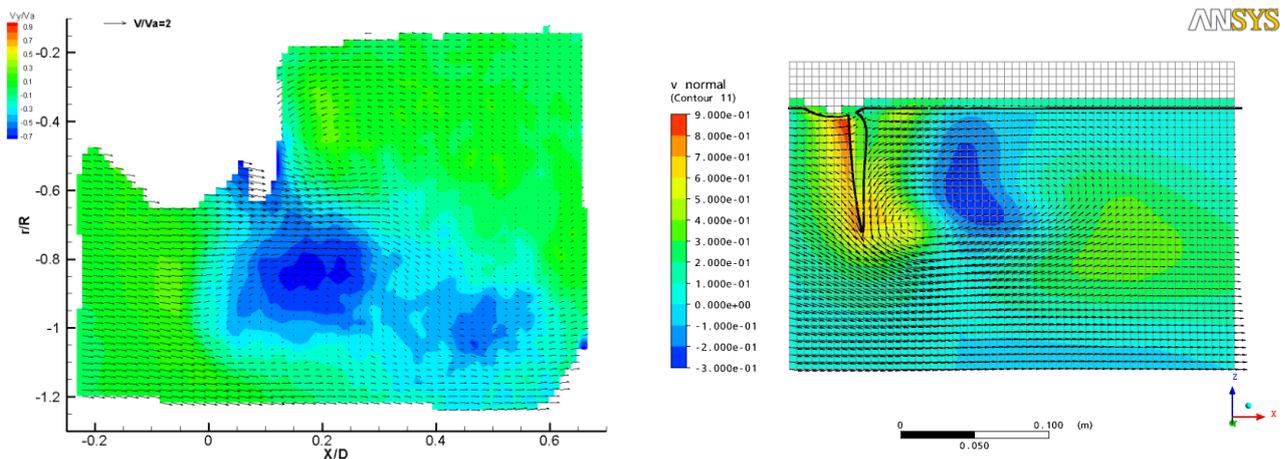


Abb. 16: PIV-Messung und Berechnung, Betriebspunkt im 4. Quadranten

Zusammenfassung

Für einen Festpropeller wurden umfangreiche Messungen und numerische Berechnungen in 4 Quadranten durchgeführt. Es wurde die Freifahrtcharakteristik in der Schlepprinne und im Kavitationstunnel ermittelt sowie Schub und Drehmomente am Propeller als auch die Momente am Einzelflügel. In ausgewählten Betriebspunkten wurde das Geschwindigkeitsfeld mit berührungslosen Messverfahren in der Schlepprinne (PIV) und im Kavitationstunnel (LDV und PIV) erfasst.

In den Berechnungen wurde der Propeller vollständig modelliert. Es wurden Rechengitter speziell zur Modellierung der Strömung in der Schlepprinne als auch im Kavitationstunnel genutzt. Die Berechnungen erfolgten für mehrere Betriebspunkte in allen 4 Quadranten.

Als Ergebnis der Untersuchungen ist fest zustellen:

- Das eingesetzte numerische Verfahren ist in der Lage, die mittleren Kräfte und Momente in allen 4 Quadranten mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.
- Die Strömungsfelder der LDV-Messungen werden durch die Berechnungen gut wiedergegeben.
- Die stark instationären Prozesse insbesondere im 2. und 4. Quadranten, die bei den PIV-Messungen sichtbar wurden, werden durch die Berechnungen nur unzureichend wiedergegeben.

Abschließend kann gesagt werden, dass sich das Vertrauen in die Nutzung numerischer Verfahren bei gleichzeitiger Erkenntnis ihrer derzeitigen Grenzen weiter erhöht hat. Die Erfahrungen zur Verbesserung der numerischen Modellierung fließen in die Bearbeitung von Kundenaufträgen und Forschungsprojekten ein.

Literatur

- [1] Wagner, K., Zur Hydrodynamik des Schraubenpropellers bei Umsteuerbetriebszuständen, Schiffbauforschung 13, Heft 3/4, 1974.