

Heinke, H.-J.; Abdel-Maksoud, M.  
Numerische und experimentelle Untersuchung der  
Umströmung von Düsenpropellern  
Beiträge zur Strömungsmechanik,  
Technische Universität Dresden,  
Institut für Strömungsmechanik,  
Dresden, Mai 2001

# Numerische und experimentelle Untersuchung der Umströmung von Düsenpropellern

Hans-Jürgen Heinke und Moustafa Abdel-Maksoud

## 1 Einleitung

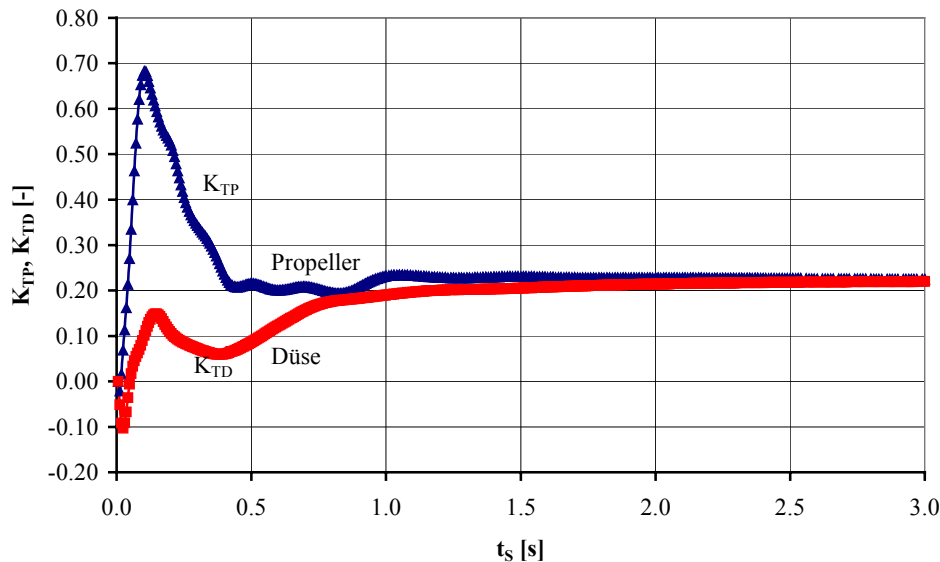
Untersuchungen von Düsenpropellersystemen haben in den letzten Jahren wieder deutlich zugenommen, Abdel-Maksoud und Heinke (2000). Ein wesentliches Ziel dieser Arbeiten ist u.a. die Erhöhung des Pfahlzuges der Düsenpropeller bei vorgegebener Leistung durch die Optimierung von Düse und Propeller. Zum Nachweis der erreichten Pfahlzüge und Freifahrtwirkungsgrade werden zumeist Modellversuche durchgeführt. Die Prognose der Wirksamkeit des Düsenpropellers im Großausführungsmaßstab ist aber häufig unsicher, weil die Reynoldszahleffekte noch unzureichend bekannt sind.

Durch die Anwendung von Verfahren zur Lösung der Reynolds-gemittelten Gleichungen kann die viskose Um- und Durchströmung von Düsenpropellern berechnet werden. Die Rechenergebnisse enthalten detaillierte Informationen über das Strömungsfeld, wie z.B. die Geschwindigkeits- und Druckverteilung und Wandschubspannung auf dem Propeller und auf der Düse. Die Berechnungen sind im Modell- und Großausführungsmaßstab möglich, so daß Maßstabseffekte untersucht werden können.

Die Genauigkeit der numerischen Berechnung der viskosen Strömung wird u.a. durch die Simulation der Strömung im Spaltbereich zwischen Flügelspitze und dem zylindrischen Düseninnenmantel, durch die Rand- und Startbedingungen und die örtliche Optimierung des Rechengitters beeinflusst. Der Rechenaufwand erhöht sich mit zunehmendem Schubbelastungsgrad des Propellers. Deshalb werden die numerischen Untersuchungen zur Zeit nur für ausgewählte Betriebspunkte durchgeführt.

## 2 Numerische Berechnung

Die Berechnung der viskosen Umströmung eines Düsenpropellers ist komplizierter als für einen freien Propeller und es können insbesondere bei hohen Schubbelastungsgraden Konvergenzprobleme auftreten. Die Konvergenzprobleme resultieren u.a. aus dem extremen Verhältnis zwischen der Umfangs- und der axialen Geschwindigkeitskomponente sowie der hohen Differenz zwischen der Geschwindigkeit am Einströmrand des Rechengebietes und der Zuströmgeschwindigkeit zum Propeller. Während die Geschwindigkeit am Einströmrand von der Simulationzeit  $t_s$  unabhängig ist, nimmt die Zuströmgeschwindigkeit zum Propeller mit wachsender Simulationszeit zu. Das Verhältnis zwischen dem Düsen- und dem Propellerschub (Bild 1) (und damit der Betrag des Gesamtschubes des Düsenpropellersystems und des Drehmomentes des Propellers) ändert sich während der Simulation sehr stark. Problematisch für das Konvergenzverhalten der Berechnung ist auch die hohe Drehzahl des Propellers und die Rückströmung im Spaltbereich.



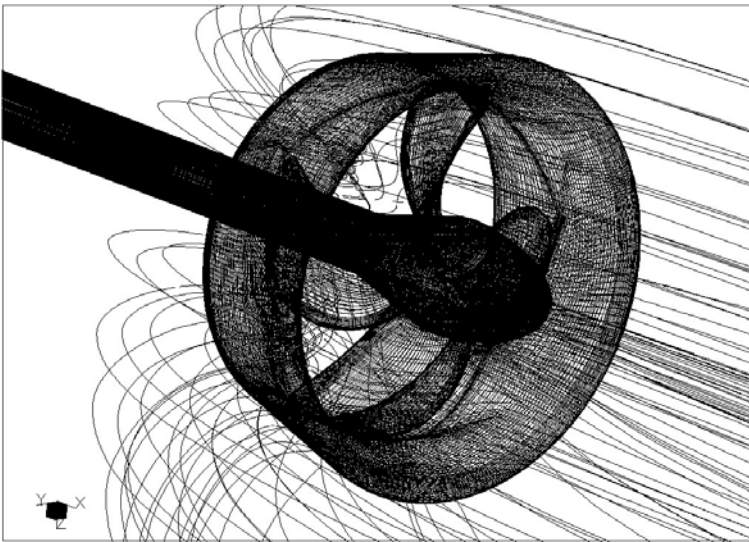
**Bild 1:** Schubbeiwerte in den ersten 3 s der Berechnung

Beim homogen angeströmten Düsenpropeller ist das Rechengebiet im Raum periodisch und die Berechnungen können auf einen Flügel beschränkt werden. Die Wechselwirkung mit den anderen Flügeln wird durch eine räumliche periodische Randbedingung berücksichtigt. Das Rechengebiet wird in einen feststehenden Teil um die Düse und dem nichtrotierenden Teil des Antriebs sowie einen rotierenden Teil um den Propeller eingeteilt. Im feststehenden Teil wird ein ortsfestes kartesisches Koordinatensystem genutzt. Die Strömung um den Propeller wird in einem rotierenden Koordinatensystem berechnet, dessen Drehachse auf der Drehachse des Propellers liegt. Zwischen dem rotierenden und dem stehenden Rechengitter wird eine Gleitrandbedingung definiert.

Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen enthalten in einem rotierenden Koordinatensystem zusätzliche Terme im Vergleich mit denen in einem feststehenden System. Die Wirkung der Turbulenz wird mit dem Standard  $k$ - $\epsilon$ -Modell und dem SST-Turbulenzmodell modelliert. Das SST-Modell verwendet im äußeren Bereich der Strömung das  $k$ - $\epsilon$ -Modell und im wandnahen Bereich das  $k$ - $\omega$ -Modell. Die Lösungsmethode basiert auf der konservativen finiten Volumen Methode CFX-TASCflow.

### 3 Untersuchung der Randbedingungen

An einem Düsenpropellersystem wurde der Einfluß der Rand- und Startbedingungen und der örtlichen Optimierung des Rechengitters auf die Berechnungsergebnisse untersucht, Abdel-Maksoud (2000). Für die Generierung des Rechengitters wurde ein 3-D CAD-Modell verwendet. Das Modell enthält die Düsen- und Propellergeometrie ohne Vereinfachung. Auch der Spalt zwischen der Flügelspitze und dem zylindrischen Innenmantel der Düse wurde berücksichtigt. Die numerischen Berechnungen wurden mit zwei blockstrukturierten Rechengittern durchgeführt. Beide Rechengitter bestehen aus 25 Blöcken. Das erste Rechengitter enthält 320.000 Rechenpunkte für einen Propellerflügel und das zweite Rechengitter enthält die doppelte Anzahl von Rechenpunkten. Das Rechengitter auf der Düse und auf dem Propeller ist im Bild 2 dargestellt.



**Bild 2:** Gitter auf der Oberfläche des Düsenpropellers

Die Untersuchungen zu den Randbedingungen der Berechnung wurden für verschiedene Schubbelastungsgrade durchgeführt. In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse von 5 Berechnungen mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen und/oder Abmessungen des Rechengebietes für den Schubbelastungsgrad  $C_{TH} = 1000$  des Düsenpropellersystems aufgeführt. Die Größe des Rechengebietes wird im Verhältnis zum Propellerdurchmesser  $D$  angegeben. Beim Rechengitter wurde nicht nur die Auflösung des Rechengitters variiert sondern auch dessen Topologie. Die Simulationszeit für alle Berechnungen betrug ca. 30 Sekunden.

Die erste Berechnung ergab zu kleine Propeller- und Düsenkennwerte im Vergleich zu den Messungen. Insbesondere der Schubbeiwert der Düse wird zu niedrig berechnet. Um den Einfluß der Abmessung des Rechengebietes auf die Kennwerte zu untersuchen, wurden in der zweiten Berechnung die Lage des Ausströmrandes von  $6,5$  auf  $20 D$  und der Außendurchmesser des Rechengebietes von  $4$  auf  $9 D$  erhöht. Die Berechnungen zeigen, daß durch die Vergrößerung des Rechengebietes eine Zunahme der Schubbeiwerte des Propellers und der Düse erreicht wird.

Bei dem Schubbelastungsgrad von  $C_{TH} = 1000$  ist der Gradient der Geschwindigkeit zwischen der Strömung innerhalb des Propellerstrahles und der Strömung in dessen Umgebung extrem hoch. Dies kann zur Rückströmung insbesondere im Bereich des Ausströmrandes des Rechengebietes führen. Die Abmessung des Rechengebietes wurde deshalb noch einmal vergrößert, um das Problem der Rückströmung zu vermeiden. Die Lage des Einströmrandes wurde auf  $87 D$  und des Ausströmrandes auf  $130,5 D$  erweitert. Der Durchmesser des Rechengebietes wurde auf  $90 D$  erhöht.

In der vierten Berechnung wurde das SST-Turbulenzmodell verwendet. Das SST-Modell liefert im Vergleich zum  $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell mit Wandfunktion bessere Rechenergebnisse, insbesondere für eine abgelöste Strömung. Die Rechenergebnisse der vierten Berechnung bestätigten, daß die Erfassung der abgelösten Strömung eine wichtige Voraussetzung ist, um die Strömung bei hohen Belastungsgraden zu berechnen. Mit dem SST-Modell haben sich die Differenzen zwischen Rechnung und Messung deutlich reduziert.

Das verwendete Rechengitter in der vierten Berechnung war nicht für das SST-Modell optimiert. Deshalb wurde das Rechengitter neu generiert. Dabei wurde die Gitterauflösung im

wandnahen Bereich deutlich erhöht. Die Ergebnisse der fünften Berechnung zeigen eine gute Übereinstimmung in den Kennwerten des Düsenpropellersystems zwischen Messung und Rechnung.

**Tabelle 1:** Kennwerte des Düsenpropellersystems in Abhängigkeit von den angewandten Randbedingungen

Berechnung	1	2	3	4	5	Versuch
Propellerschubbeiwert $K_{TP}$	0.186	0.229	0.243	0.238	0.225	0.222
Momentenbeiwert $10K_Q$	0.363	0.387	0.372	0.365	0.381	0.373
Düsenbeiwert $K_{TD}$	0.084	0.208	0.214	0.211	0.216	0.215
Gesamtschubbeiwert $K_{TG}$	0.271	0.437	0.457	0.449	0.441	0.437
Verhältnis $K_{TP}/K_Q$	5.127	5.925	6.539	6.537	5.896	5.960
Verhältnis $K_{TG}/K_Q$	7.450	11.289	12.304	12.323	11.545	11.718
Verhältnis $K_{TD}/K_{TP}$	0.453	0.905	0.882	0.885	0.958	0.966
Schubbelastungsgrad $C_{TH}$	621	1004	1050	1032	1012	1002
Durchmesser des Gitters in D	4	9	90	90	70	-
Lage des Einströmrandes in D	3.5	3.5	87	87	87	-
Lage des Ausströmrandes in D	6.5	22	130.5	130.5	130.5	-
Turbulenzmodell	K- $\epsilon$	K- $\epsilon$	K- $\epsilon$	SST	SST	-

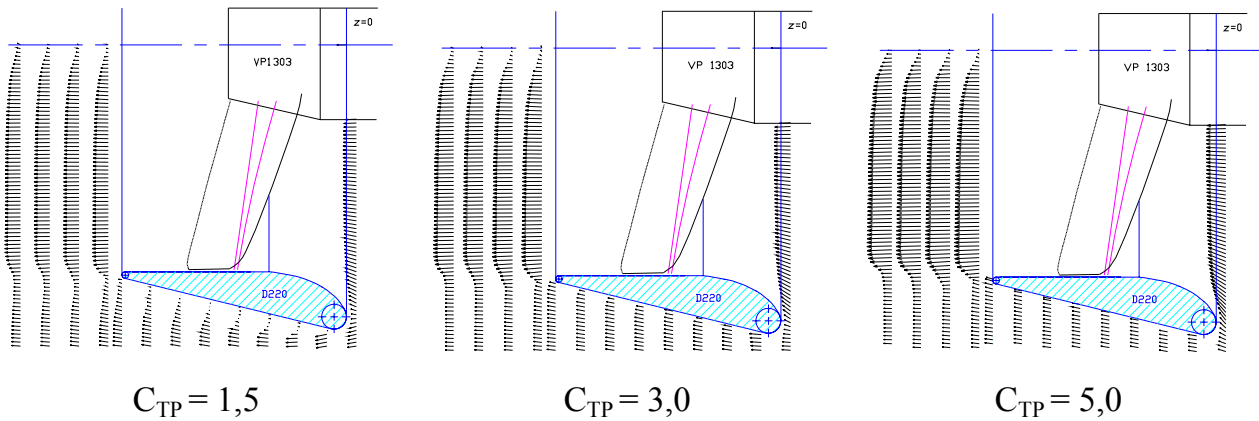
## 4 Berechnungs- und Versuchsergebnisse

Berechnungen und Modellversuche wurden für Düsenpropeller mit unterschiedlichen Propeller- und Düsengeometrien in homogener Anströmung durchgeführt. Ausgewählte Berechnungs- und Versuchsergebnisse werden im folgenden diskutiert.

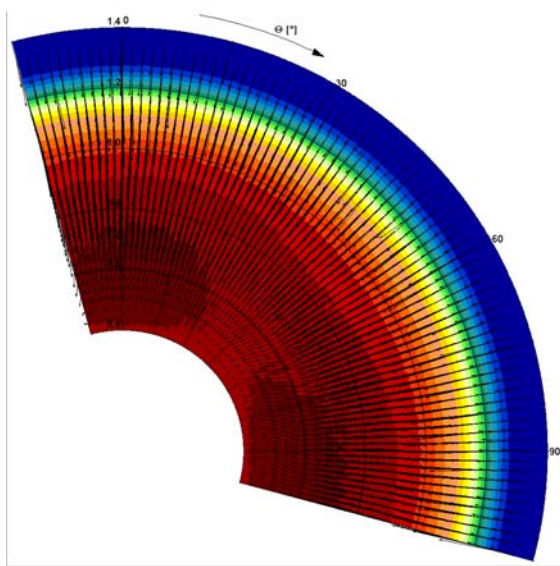
### 4.1 Umströmung des Düsenpropellers

Zur experimentellen Bestimmung der Um- und Durchströmung eines Düsenpropellers stehen LDA-Meßsysteme am Kavitationstunnel und in der Schlepprinne der SVA zur Verfügung. Das Bild 3 zeigt die Umströmung eines Düsenpropellers bei unterschiedlichen Schubbelastungsgraden, Heinke und Mach (2000). Beim Schubbelastungsgrad des Propellers von  $C_{TP} = 1,5$  löst die Strömung am Außenmantel der Düse ab.

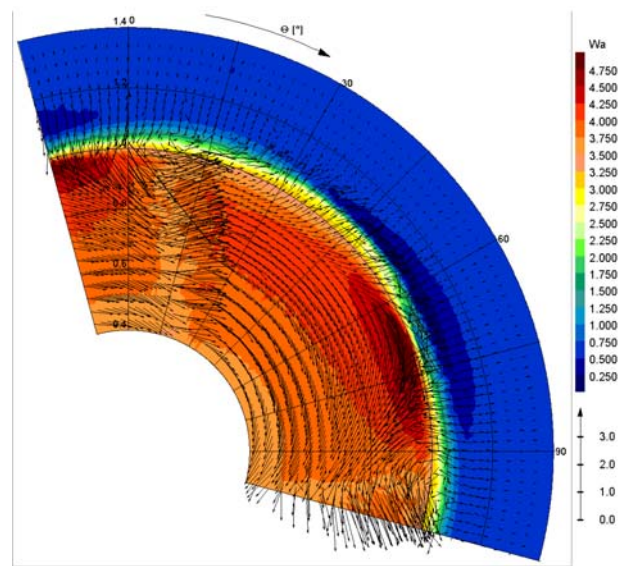
Winkelaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen liefern detaillierte Informationen zur Durchströmung des Düsenpropellersystems (Bilder 4 und 5). Vor der Düse ergeben sich beim Schubbelastungsgrad von  $C_{TP} = 13,1$  ( $C_{TH} = 22,2$ ) axiale Geschwindigkeitskomponenten, die den dreifachen Wert der Anströmgeschwindigkeit aufweisen. Die radiale Geschwindigkeitskomponente im Bereich der Düseneintrittsöffnung erreicht Werte von  $2,25 V_A$ . Hinter der Düsenaustrittskante ist eine geringe Strahlaufweitung zu verzeichnen. Die maximalen mittleren axialen Geschwindigkeiten treten im Propellerstrahl im Radienbereich von  $0,80 < r/R < 0,95$  auf. Im Bereich des Propellerflügels sind die maximalen axialen Geschwindigkeitskomponenten im Spitzenbereich des Propellers ( $r/R = 0,95$  bis  $0,995$ ).



**Bild 3:** Umströmung eines Düsenpropellersystems

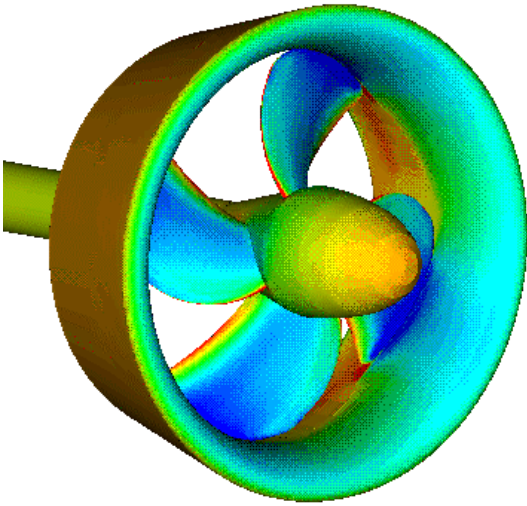


**Bild 4:** Geschwindigkeitsfeld vor dem Düsenpropeller,  $C_{TP} = 13,1$

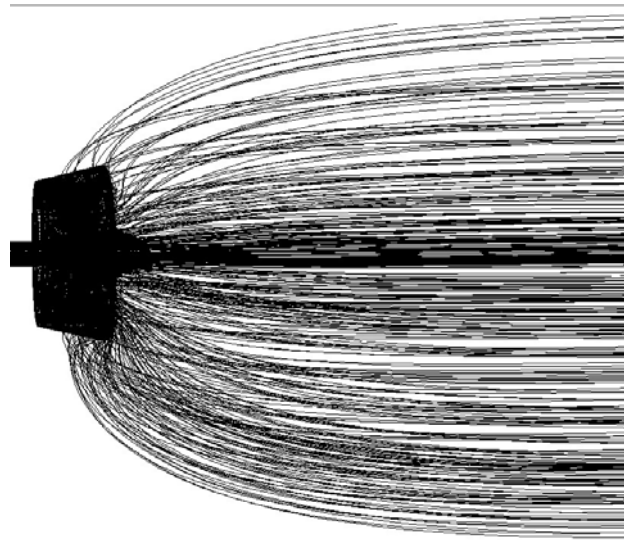


**Bild 5:** Geschwindigkeitsfeld hinter dem Düsenpropeller,  $C_{TP} = 13,1$

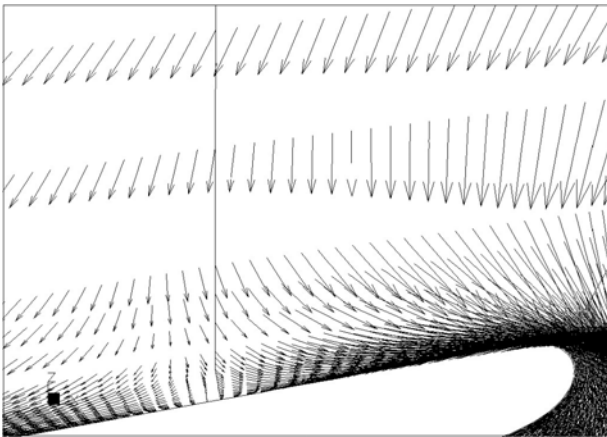
Die folgenden Bilder zeigen Berechnungsergebnisse für den Schubbelastungsgrad des Düsenpropellersystems  $C_{TH} = 1020$ . Die maximalen Unterdrücke treten im Düseneinlauf und im Bereich der Flügelspitze auf (Bild 6). Im Bild 7 ist eine Seitenansicht der Stromlinien dargestellt. Es wird deutlich, daß das Zuströmgebiet mehrere Propellerdurchmesser umfaßt und daß der Staupunkt auf dem Düsenaußenmantel liegt (Bild 8). Das Bild 9 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren an der Eintrittskante des Düsenprofils. Die Geschwindigkeitsvektoren an der Austrittskante der Düse sind im Bild 10 dargestellt. Die Geschwindigkeiten im Propellerstrahl sind extrem hoch im Vergleich zu der Außenströmung. Die Strömung im Spalt zwischen dem Düseninnenmantel und der Flügelspitze (Bild 11) unterscheidet sich vom Modell zur Großausführung. Deshalb ist eine exakte Modellierung des Spalts in der Berechnung eine wichtige Voraussetzung zur Untersuchung der Maßstabeffekte von Düsenpropellern.



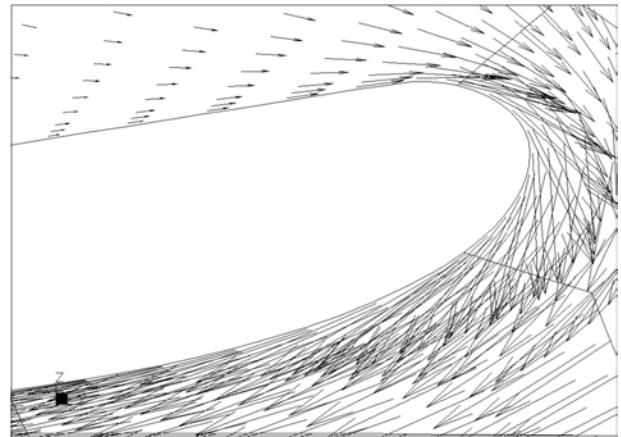
**Bild 6:** Druckverteilung beim Schubbelastungsgrad  $C_{TH} = 1020$



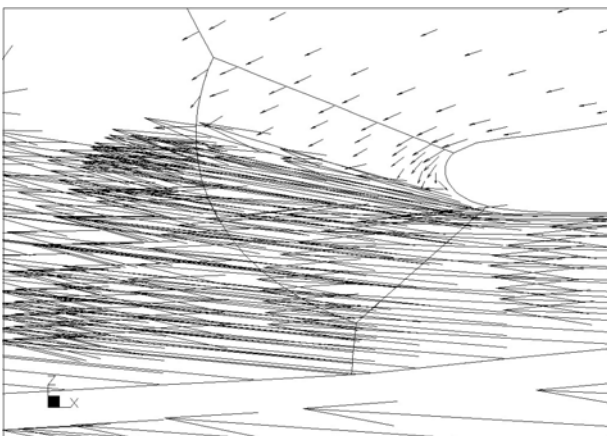
**Bild 7:** Stromlinien der Zuströmung zum Düsenpropeller,  $C_{TH} = 1020$



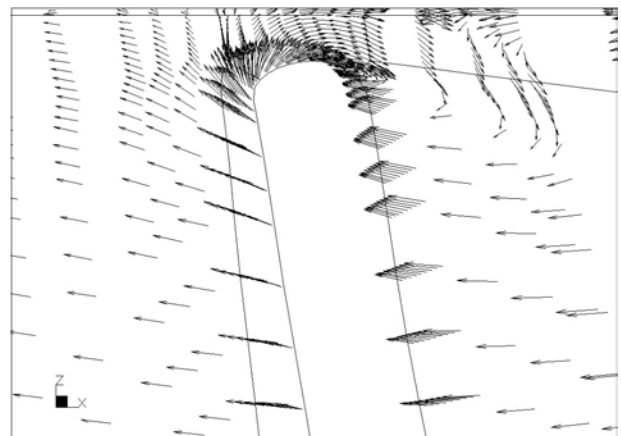
**Bild 8:** Geschwindigkeitsvektoren außerhalb der Düse,  $C_{TH} = 1020$



**Bild 9:** Geschwindigkeitsvektoren an der Eintrittskante der Düse,  $C_{TH} = 1020$



**Bild 10:** Geschwindigkeitsvektoren an der Austrittskante der Düse,  $C_{TH} = 1020$

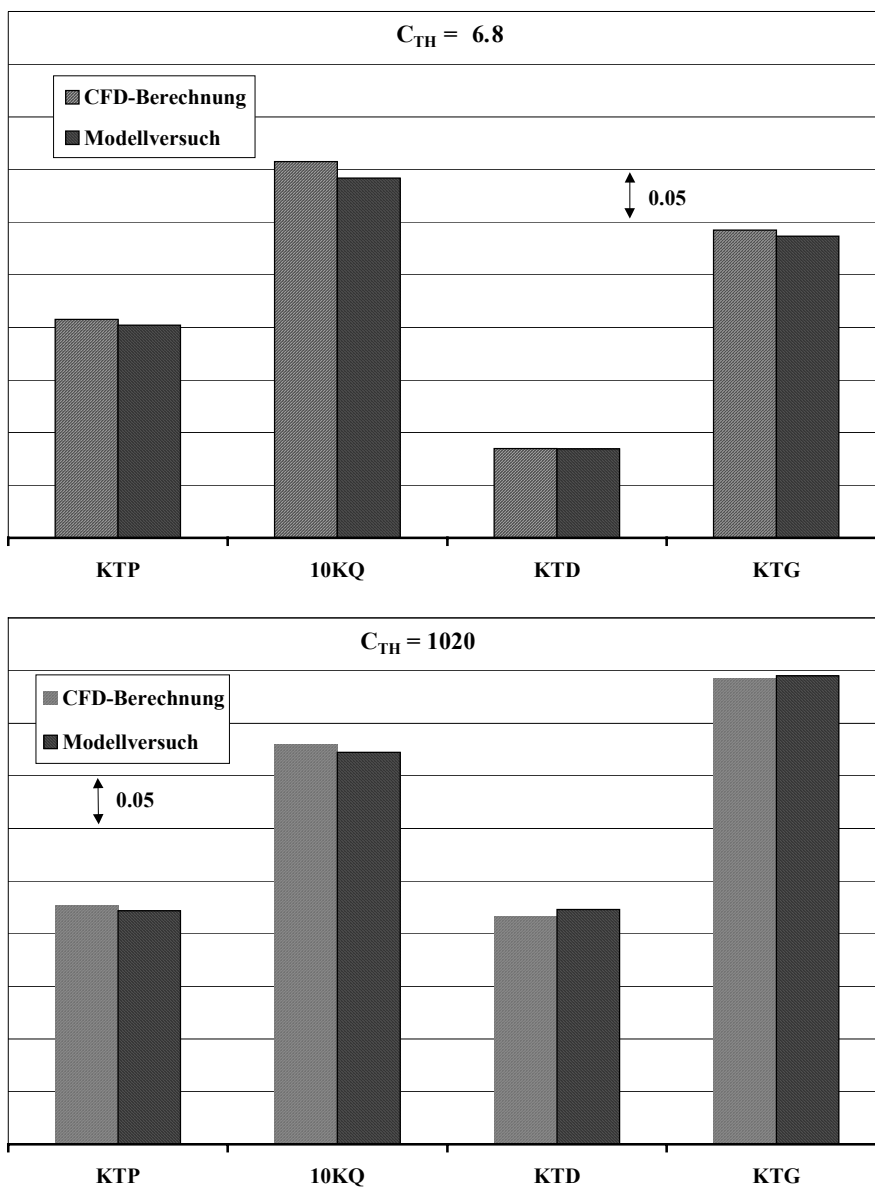


**Bild 11:** Geschwindigkeitsvektoren an der Spitze des Propellerflügels,  $C_{TH} = 1020$

## 4.2 Vergleich der berechneten und gemessenen Freifahrtkennwerte

Zur Validierung der numerischen Berechnungen wurden Freifahrtversuche bei verschiedenen Drehzahlen (Reynoldszahlen) in der Schlepprinne durchgeführt. Das Bild 12 zeigt einen Vergleich der berechneten und gemessenen Kennwerte des Düsenpropellersystems für die Schubbelastungsgrade  $C_{TH} = 6,8$  und 1020. Es wird deutlich, daß die Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Kennwerte des freifahrenden Düsenpropellers gut ist.

Das Know-how aus den systematischen Untersuchungen zu den Randbedingungen und zur optimalen Gittergenerierung bei der Berechnung von Düsenpropellern sowie aus der Analyse der berechneten und gemessenen Kennwerte und Geschwindigkeitsdetails ist die Basis für die Routineanwendung des Verfahrens CFX-TASCflow für die Berechnung von Düsenpropellersystemen. Düsenpropeller mit unterschiedlichen Düsenprofilen und Propellern (Kaplanpropeller, Skewpropeller, Variation der Lastverteilung) wurden berechnet und analysiert (Bild 13).



**Bild 12:** Vergleich der berechneten und gemessenen Düsenpropellerkennwerte



### 4.3 Reynoldszahleinflüsse

Zur Untersuchung der Reynoldszahleinflüsse auf die Kennwerte von Düsenpropellersystemen wurden Berechnungen im Modell- und Großausführungsmaßstab durchgeführt. Beim Düsenpropellersystem nimmt der Düsenschub mit zunehmender Reynoldszahl zu ( $K_{TDS}/K_{TDM} = 1,04$  bis  $1,14$ ). Die Veränderungen sind u.a. abhängig von der Reynoldszahldifferenz und der Umströmung der Düse. Die Reynoldszahleffekte sind besonders hoch, wenn im Modellversuch am Düsenprofil am Düsenaußenmantel oder im Diffusor Ablösung auftritt.

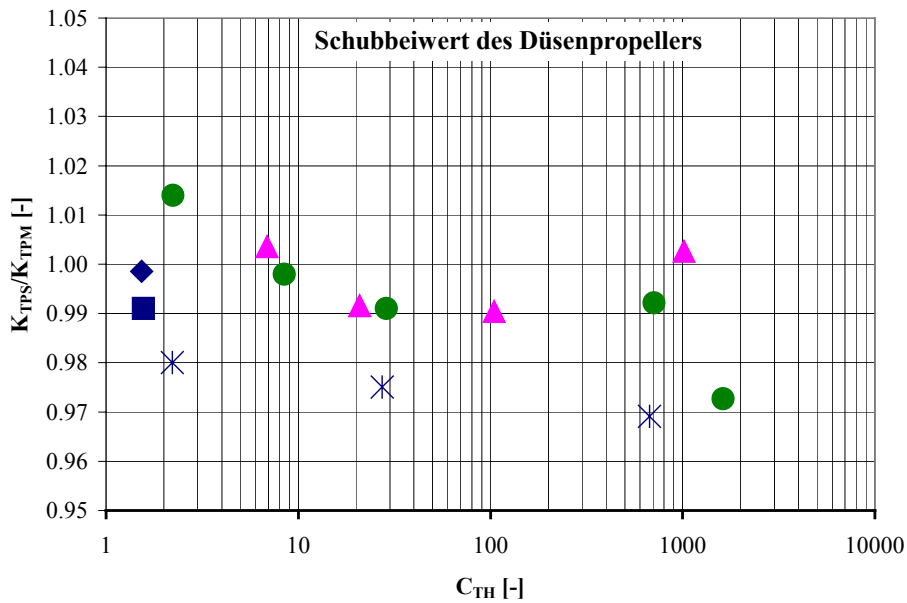
Die Schubbeiwerte des Propellers verändern sich nur geringfügig ( $K_{TPS}/K_{TPM} = 0,97$  bis  $1,02$ ). Die Drehmomentenbeiwerte des Propellers verringern sich mit der Erhöhung der Reynoldszahl deutlich ( $K_{QS}/K_{QM} = 0,95$  bis  $0,98$ ). Die Abnahme der Propellerkennwerte wird durch die Erhöhung der Geschwindigkeit in der Düse durch die verstärkte Düsenwirksamkeit bei hohen Reynoldszahlen bewirkt. Das Drehmoment des Propellers wird zusätzlich noch durch die Reduzierung der Reibung vermindert, so daß beim Düsenpropeller die Reynoldszahlkorrektur beim Drehmoment des Propellers stärker ausfällt als beim freien Propeller.

Das Bild 13 zeigt die Veränderung der Kennwerte unterschiedlicher Düsenpropellersysteme in Abhängigkeit vom Schubbelastungsgrad. Die Reynoldszahleffekte werden u.a. durch die Propellergeometrie (Flügelumriß, Steigungs- und Wölbungsverlauf) sowie das Düsenprofil (Düsenöffnungswinkel, Diffusorwinkel) beeinflusst.

## 5. Zusammenfassung

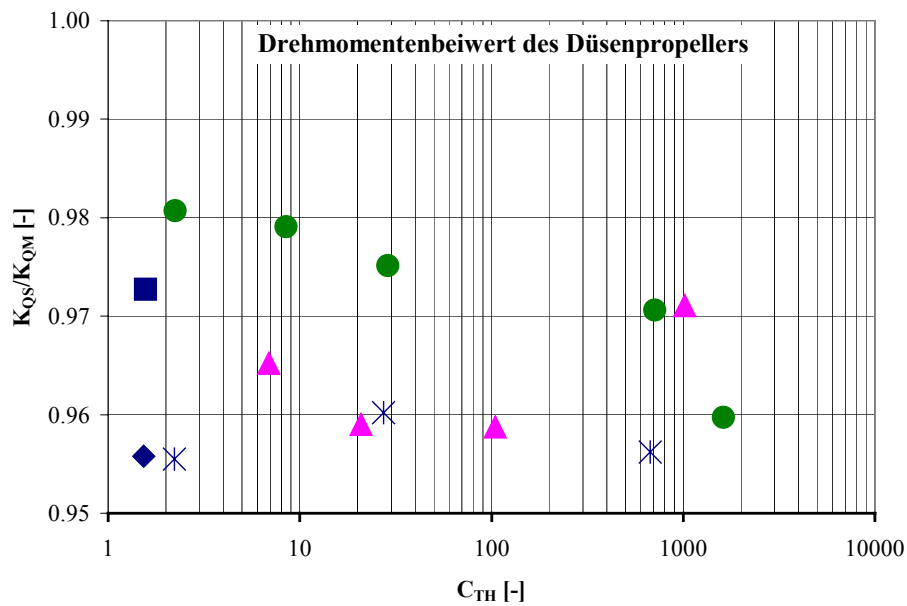
In der SVA Potsdam wurden die Grundlagen für die Berechnung der viskosen Umströmung von Düsenpropellersystemen im Modell- und Großausführungsmaßstab untersucht. Mit der Zunahme des Schubbelastungsgrades vergrößert sich der Einfluß der Rand- und Startbedingungen und der örtlichen Optimierung des Rechnengitters auf die Berechnungsergebnisse. Für Berechnungen in der Nähe des Pfahlzuges sind sehr große Rechengebiete notwendig. Weiterhin ist die Erfassung der abgelösten Strömung eine wichtige Voraussetzung für die Berechnungen. Es ist deshalb das SST-Turbulenzmodell anzuwenden.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit Messungen sowohl in Strömungsdetails wie auch in den integralen Kennwerten. Für verschiedene Düsenpropellersysteme wurden Berechnungen zur Ermittlung der Reynoldszahleffekte durchgeführt. Der Düsenschub nimmt mit der Erhöhung der Reynoldszahl deutlich zu. Der Propellerschub verringert sich überwiegend mit der Erhöhung der Reynoldszahl. Das Drehmoment des Propellers nimmt im untersuchten Reynoldszahlbereich um 2 bis 5% ab.

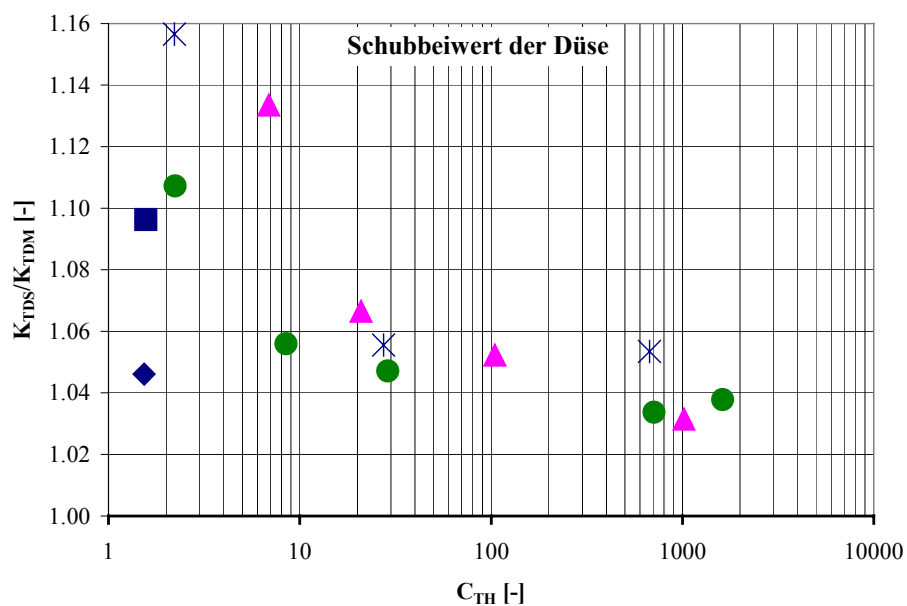


**Legende**

- \* - Düse Wag. 19A, Kaplanpropeller
- ◆ - Düse Wag. 19A, Designpropeller
- - Düse Wag. 19A, Skewpropeller
- - Düse mit kleinem Öffnungswinkel, Kaplanpropeller
- ▲ - Düse mit großem Öffnungswinkel, Kaplanpropeller



Reynoldszahlen  
Modellmaßstab  
4 bis  $9 \cdot 10^5$



Reynoldszahlen  
Großausführung  
1.2 bis  $4 \cdot 10^7$

**Bild 13:** Reynoldszahleinflüsse auf die Kennwerte von Düsenpropellersystemen

## 6. Symbolverzeichnis

$C_{TH}$	[ - ]	Schubbelastungsgrad des Düsenpropellersystems	$T_G/(0.5\rho\pi D^2/4V_A^2)$
$C_{TP}$	[ - ]	Schubbelastungsgrad des Düsenpropellers	$T_P/(0.5\rho\pi D^2/4V_A^2)$
$D$	[m]	Propellerdurchmesser	
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung	
$K_Q$	[ - ]	Drehmomentenbeiwert	$Q/(\rho n^2 D^5)$
$K_{TD}$	[ - ]	Düsenschubbeiwert	$T_D/(\rho n^2 D^4)$
$K_{TG}$	[ - ]	Gesamtschubbeiwert	$T_G/(\rho n^2 D^4)$
$K_{TP}$	[ - ]	Propellerschubbeiwert	$T_P/(\rho n^2 D^4)$
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	Drehzahl des Propellers	
$Q$	[Nm]	Drehmoment des Propellers	
$r$	[m]	Örtlicher Propellerradius	
$R$	[m]	Propellerradius	$D/2$
$T$	[N]	Propellerschub	
$T_D$	[N]	Düsenschub	
$t_S$	[s]	Simulationszeit	
$T_G$	[N]	Gesamtschub	
$V_A$	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit	
$M$		Modell	
$S$		Großausführung	

## 7. Quellenverzeichnis

### M. Abdel-Maksoud (2000)

Convergence Study of Viscous Flow Computations Around a High Loaded Nozzle Propeller

Numerical Towing Tank Symposium NuTTS 2000, Schweden, Sept. 2000

### M. Abdel-Maksoud, H.-J. Heinke (2000)

Untersuchung der viskosen Strömung um moderne Propulsionssysteme

95. STG Hauptversammlung, Hamburg, 22. - 25. November 2000

### H.-J. Heinke, K.-P. Mach (2000)

Freifahrtversuche und Geschwindigkeitsmessungen mit dem Düsenpropellersystem DVP 220-1303

Bericht Nr. 2645, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, November 2000 (unveröffentlicht)