

FACHBEREICH 10
VERKEHRSWESEN UND
ANGEWANDTE MECHANIK

Institut für Schiffs- und
Meerestechnik

Fachgebiet
Schiffshydromechanik

Berechnung der turbulenten Propellerumströmung

H. Brandt, K. Hochkirch

Unter Mitwirkung von
H. Nowacki, TU-Berlin

2. Zwischenbericht

DFG: Br 532/5-1

(Prof. Dr.-Ing. H. Brandt)

(Dipl.-Ing. K. Hochkirch)

Institut für Schiffs- und Meerestechnik
Salzufer 17 - 19, D-10587 Berlin
Fax: +49 (0) 30 - 314 - 22 885

Berlin, den 28. Juni 1996
ISM-Bericht Nr. 96/2

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Übersicht	1
1.2	Ziel der Arbeit	1
1.3	Ziele dieses Arbeitsabschnitts	2
2	Gittergenerierung	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Anwendung	5
3	Berechnungen	13
3.1	Grundlagen	13
3.2	Düsenpropeller	13
4	Zusammenfassung und Ausblick	15
5	Symbole	16
6	Literatur	17

1 Einleitung

1.1 Übersicht

Die Arbeit befaßt sich mit der numerischen Bestimmung der turbulenten Strömung im Bereich des Propellers. Es wird ein dreidimensionales Rechenverfahren eingesetzt, mit dessen Hilfe die zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) gelöst werden. Hierbei wird ein mit dem Propeller drehendes Bezugssystem verwendet.

Während im ersten Abschnitt dieses Forschungsvorhabens eine stark idealisierte Propellergeometrie untersucht wurde, werden in dem vorliegenden Zwischenbericht Verfahren zur Gittergenerierung für komplexere Propellergeometrien entwickelt und beschrieben. Mit Hilfe dieser Verfahren konnten erste Strömungsberechnungen an Propellern mit beliebigen Profilformen durchgeführt werden.

Zur Validierung der Ergebnisse wurden für einen Propeller mit geeigneter Geometrie die globalen Größen η , K_T und K_Q experimentell bestimmt und mit berechneten Werten verglichen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel des gegenwärtigen Vorhabens ist es, einen Beitrag zur Analyse der turbulenten Propellerströmung selbst und langfristig auch zu Wechselwirkungen zwischen Propeller und Schiff zu liefern. Nach dem gegenwärtigen Stand der Entwicklung zeichnen sich bei der numerischen Behandlung der viskosen Strömung am arbeitenden Propeller folgende Schwerpunkte ab:

- **Rechengitter:** Die geometrischen Eigenschaften eines Schiffspellers sind bekanntlich recht kompliziert. Hierzu gehören insbesondere Blattumriß, Steigung, Wölbung, Profilform und Hang, wobei verschiedene Größen auch noch über den Radius veränderlich sein können. Wegen der komplizierten 3-dimensionalen Geometrie im Bereich des Schiffshecks ist der Einsatz eines brauchbaren strukturierten Rechengitters nicht mehr möglich. Es kann nur mit unstrukturierten oder blockstrukturierten Gittern weitergearbeitet werden.

- **Kopplung des Geschwindigkeits- und Druckfelds:** Infolge der erheblichen Druck-, Zentripetal- und Corioliskräfte ist mit zunehmender Drehzahl des Propellers die Kopplung des Geschwindigkeits- und Druckfelds schwierig. Um überhaupt eine Konvergenz bei verzerrten Rechengittern zu erreichen, müssen die Iterationen stark unterrelaxiert werden. Das führt zu sehr langsamer Konvergenz und erhöht die Rechenzeit. Wie im ersten Abschnitt des Vorhabens gezeigt wurde, kann durch den Einsatz von impliziten Verfahren zur Integration rotierender Bereiche die Rechenzeit stark reduziert werden [1].

- **Turbulenz-Modellierung:** Die Grenzschicht am rotierenden Propel-

lerblatt wird von der Schubspannung in Umfangsrichtung stark beeinflusst, womit die Wirbelviskosität nicht mehr als homogen angenommen werden kann [2]. Außerdem arbeitet der Propeller hinter dem Schiffsheck nicht nur in einem komplizierten Nachstromfeld, sondern in vielen Fällen in einer dicken, teilweise abgelösten Grenzschicht. Die Turbulenzmodellierung spielt deshalb eine wichtige Rolle. Die bisher hierzu durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf Turbomaschinen, wo im Gegensatz zum Propeller nur die Innenströmung behandelt wird [3]. Wünschenswert ist es, den Einfluß unterschiedlicher Turbulenzmodelle auf die simulierte Strömung am Propeller zu analysieren.

1.3 Ziele dieses Arbeitsabschnitts

Im ersten Teil des Vorhabens [1] wurde eine sehr stark vereinfachte Geometrie mit unendlich dünnen Flügeln, unendlichem Anstellwinkel und ungewölbten, rechteckigen Flügelblättern untersucht. Dabei konnten erfolgreich verschiedene grundlegende Parameter zur Berechnung der Strömung am rotierenden Propellerblatt analysiert werden.

Das Strömungsverhalten um diese vereinfachte Geometrie konnte qualitativ gut bestimmt werden; insbesondere wurde der Spitzenwirbel, sowohl am Propellerblatt, wie auch im Nachstrom mit ausreichender Genauigkeit erfaßt.

Die bislang betrachtete Geometrie erforderte ein sehr einfach zu generierendes Gitter und bot sich deshalb für die Voruntersuchungen an. In dem vorliegenden Arbeitsabschnitt wurden nun Verfahren zur Erzeugung der Rechengitter für komplexere Propellergeometrien entwickelt. Während zunächst nur Rechnungen um einen Propeller mit unendlich dünnen ungewölbten Flügeln aber endlichem Steigungsverhältnis vorgesehen waren, zeigte sich, daß auch reale Profilformen mit oder ohne Wölbung durch das entwickelte Verfahren diskretisiert werden konnten und so physikalisch unrealistische Strömungsvorgänge an unendlich dünnen Flügeln vermieden werden konnten.

Um die Qualität der numerischen Ergebnisse beurteilen zu können, sollten zumindest die globalen Größen η , K_T und K_Q auch experimentell bestimmt werden.

2 Gittergenerierung

Um die komplizierte Geometrie eines Propellers richtig zu erfassen, wurden unterschiedliche Gittergenerierungsverfahren untersucht. Zum einen wurde ein Gittergenerierungsverfahren eingesetzt, daß durch Lösung einer elliptischen partiellen Differentialgleichung ein zunächst 2-dimensionales Gitter in einer Zylinder-Mantelfläche um die Propellerwelle erzeugt. Durch Interpolation kann aus diesen 2-D Gittern dann schließlich ein 3-dimensionales Gitter generiert werden.

Zum anderen wurde mit Hilfe eines kommerziellen Gittergenerierers ein blockstrukturiertes Gitter um einen realen Propeller erzeugt.

2.1 Grundlagen

Die Gittergenerierung mittels der Lösung elliptischer partieller Differentialgleichungen, kann als Lösung einer Randwertaufgabe in einem numerischen Bereich betrachtet werden, wobei die Punkte des physikalischen Bereichs - auf der Körperoberfläche und am äußeren Rand - festgelegt werden müssen. Die inneren Punkte genügen den Bedingungen der Differentialgleichung.

Für das vorliegende Problem bietet sich die Poisson-Gleichung

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial \eta^2} &= P(\xi, \eta) \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \eta^2} &= Q(\xi, \eta)\end{aligned}\tag{1}$$

an, da durch geeignete Wahl der Quellterme P und Q die Dichte der Gitterlinien und deren Orthogonalität beeinflußt werden kann.

Der Einsatz von elliptischen Differentialgleichungen zur Erzeugung der inneren Gitterpunkte bietet sich an, da die erzeugten Gitter eine hohe Qualität für numerische Rechnungen liefern. Insbesondere zeichnen sich diese Gitter aus folgenden Gründen aus:

- Die Gitterpunkte verteilen sich gleichmäßig über den Bereich. Unstetigkeiten der Randflächen übertragen sich nicht auf die inneren Gitterpunkte.
- Differentialgleichungen wie die Poissongleichung (1) erfüllen ein Maximum-Prinzip. Das bedeutet, daß die extremen Werte für ξ und η auf den Rändern auftreten müssen. Thompson [4] hat gezeigt, daß dies für moderate Werte für P und Q eine bijektive Abbildung garantiert.

Die Lösung der Poisson Gleichung wird in dem numerischen Bereich (ξ, η) durchgeführt. Die Gleichung (1) muß dazu transformiert werden, und

man erhält die folgende Formulierung:

$$\begin{aligned} \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \delta \left(P \frac{\partial x}{\partial \xi} + Q \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) &= 0 \\ \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} - 2\beta \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + \delta \left(P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

wobei

$$\begin{aligned} \alpha &= g_{22} \\ \beta &= g_{12} \\ \delta &= g \end{aligned} \quad (3)$$

die Komponenten, bzw. die Determinate des metrischen Tensors sind.

Die Wahl geeigneter Quellterme zur gezielten Kontrolle der Gitterstruktur ist nicht unproblematisch, da große Werte für P und Q die Konvergenz stark beeinträchtigen und gute Startwerte für x und y verlangen. Es bietet sich zunächst an, für die Quellterme $P = 0$ und $Q = 0$ anzusetzen und damit die Laplace-Gleichung

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

zu lösen, deren Lösung numerisch meist unproblematisch ist.

Für die Wahl der Quellterme hat Thompson [5] folgende Formulierung vorgestellt:

$$\begin{aligned} P(\xi, \eta) &= - \sum_{l=1}^L a_l \operatorname{sgn}(\xi - \xi_l) e^{-c_l |\xi - \xi_l|} \\ &\quad - \sum_{m=1}^M b_m \operatorname{sgn}(\xi - \xi_m) e^{-d_m \sqrt{(\xi - \xi_m)^2 + (\eta - \eta_m)^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q(\xi, \eta) &= - \sum_{l=1}^L a_l \operatorname{sgn}(\eta - \eta_l) e^{-c_l |\eta - \eta_l|} \\ &\quad - \sum_{m=1}^M b_m \operatorname{sgn}(\eta - \eta_m) e^{-d_m \sqrt{(\eta - \eta_m)^2 + (\xi - \xi_m)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

wobei die sgn -Funktion wie folgt definiert ist.

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x = 0 \\ -1 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Auf diese Weise ist eine gezielte Konzentration von Gitterpunkten zu bestimmten Punkten oder Gitterlinien möglich. Allerdings erfordert die Wahl der Faktoren (a_l, b_m, c_l, d_m) sehr viel Fingerspitzengefühl und Erfahrung: Zu große Quellterme führen zu divergierenden Lösungen, zu kleine Terme liefern nicht das gewünschte Ziel. Weiterhin hängt die Größe der Faktoren von der gesamten Konfiguration ab, so daß die Faktoren iterativ bestimmt werden müssen.

Meist sollen die Quellterme folgende Eigenschaften des Gitters liefern:

- Der Abstand der ersten Gitterlinie soll in einem vorgegebenen Bereich liegen. Insbesondere bei Rechnungen für turbulente Strömung mit einer Wandfunktion ist die Höhe der wandnahen Zelle von entscheidender Bedeutung, um physikalisch sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

Diese Bedingung kann mit

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (8)$$

formuliert werden.

- Das Gitter soll, insbesondere in Wandnähe, möglichst orthogonal sein. Dadurch kann Rechenzeit gespart werden und numerische Probleme, die bei stark verzerrten Netzen auftreten, vermieden werden. Der Winkel der Zellseiten kann aus

$$\nabla \xi \cdot \nabla \eta = |\nabla \xi| |\nabla \eta| \cos \phi \quad (9)$$

berechnet werden und man erhält die folgende Beziehung für den Winkel:

$$\cos \phi = -\frac{x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta}{\sqrt{(x_\eta^2 + y_\eta^2)(x_\xi^2 + y_\xi^2)}} \quad (10)$$

Für Orthonormalität muß $\phi = \pi/2$ gelten.

Unter der Annahme, daß die Wandseite des Gitters bei $\eta = 0$ liegt, und da nur für diese Wand die beiden oben genannten Bedingungen erfüllt werden sollen, haben die Quellterme, analog zu (5) und (6) die Form

$$P(\xi, \eta) = -a_\xi e^{-b_\xi \eta} \quad (11)$$

$$Q(\xi, \eta) = -c_\xi e^{-d_\xi \eta} \quad (12)$$

2.2 Anwendung

Steger und Sorenson [6] haben ein Verfahren vorgeschlagen, die Faktoren a_ξ , b_ξ , c_ξ und d_ξ direkt aus der Forderung eines vorgegebenen Abstands der ersten Gitterlinie und der Orthogonalität der ersten Zellebene zu bestimmen. Leider werden die Quellterme durch diese direkte Formulierung so groß, daß konvergente Lösungen nur mit extremer Unterrelaxation (Relaxationsfaktoren von 0.002) und hoher Iterationsanzahl zu erreichen sind. Für nicht equidistante Gitter sind unter Umständen gar keine Lösungen zu erzielen.

Während im vorliegenden Projekt zur Lösung der partiellen Differentialgleichung ebenfalls ein Standard SOR-Verfahren eingesetzt wurde, sind die Faktoren a_ξ , b_ξ , c_ξ und d_ξ mittels eines iterativen Verfahrens bestimmt worden.

Ausgehend von einer Laplace-Lösung (4) (siehe Bild 1) werden zunächst Schätzwerte für a_ξ , b_ξ , c_ξ und d_ξ angenommen. Aus der mit diesen Werten ermittelten Lösung werden mit (8) der Abstand und mit (10) der Winkel berechnet. Für jedes ξ wird aus der sich durch den neuen Quellterm ergebenden Änderung, eine Änderung der entsprechenden Faktoren durchgeführt. Zur Bestimmung der neuen Faktoren wird eine modifizierte *Regula-Falsi* eingesetzt. Der Faktor für die folgende Iteration wird dabei mit

$$a^{(n+1)} = a^{(n)} + \omega(\Delta s - \Delta s^{(n)}) \frac{a^{(n)} - a^{(n-1)}}{\Delta s^{(n)} - \Delta s^{(n-1)}} \quad (13)$$

bestimmt, wobei Δs der vorgegebene Wert für den Abstand der Gitterlinien, und ω ein Relaxationsparameter ist, der in der Größenordnung von (0.1...0.5) liegt. Für die anderen Faktoren gelten analoge Beziehungen.

Die Iterationen werden abgebrochen, wenn in einem vorgegebenen Anteil aller wandnahen Zellen die gestellten Forderungen mit einer vorgegebenen Toleranz erfüllt sind.

Konvergenzgeschwindigkeit und die Anzahl der Iterationen hängen stark von der Wahl der Relaxationsparameter und der Anfangswerte ab. Mit hinreichend kleinen Relaxationsparametern zeigt das Verfahren sehr robuste Eigenschaften und die erzeugten Gitter genügen den gestellten Forderungen.

Auf Bild 1 ist das Laplace-Gitter um ein *Munk-Profil* mit 1.3% Wölbung und 12% Dicke dargestellt. Bild 2 zeigt das Gitter nach der Optimierung mit dem beschriebenen Verfahren. Bild 3 und 4 bzw. Bild 5 und 6 zeigen vergrößerte Ausschnitte der Ein- und Austrittskanten. Die Verbesserung des Gitters bezüglich der Dichte der Gitterlinien und der Orthogonalität ist deutlich erkennbar.

Das Gitter hat 69x31 Gitterpunkte. Die Erzeugung des Gitters benötigte auf einer SunSparc 2 etwa 1 Minute, wobei 27 Iterationen durchgeführt werden mussten, um den gewünschten Gitterabstand in der ersten Zellebene zu gewährleisten.

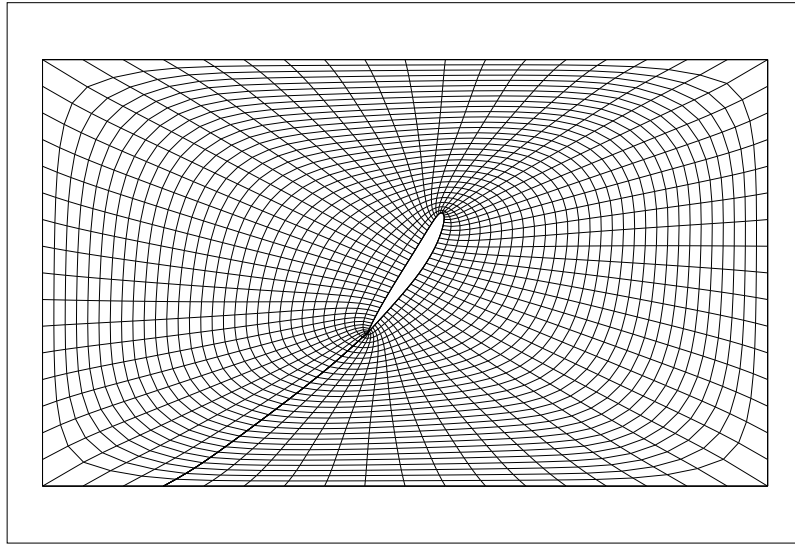


Bild 1: Laplace-Gitter

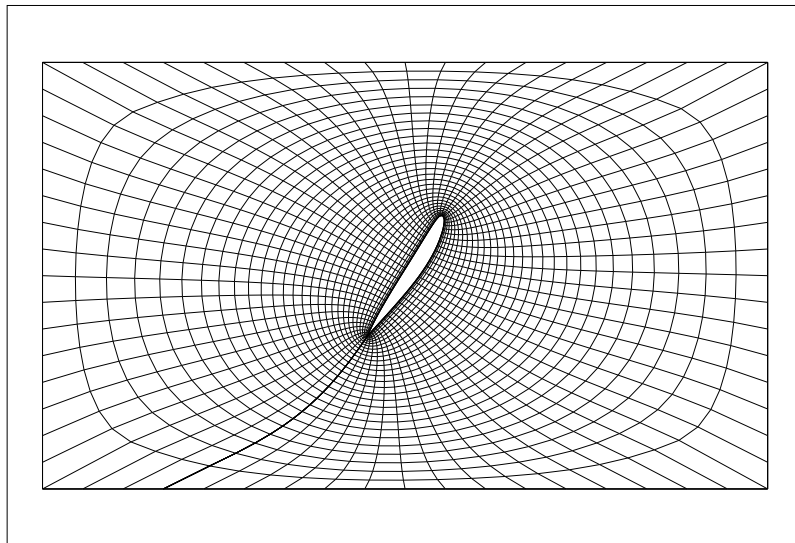


Bild 2: Poisson-Gitter

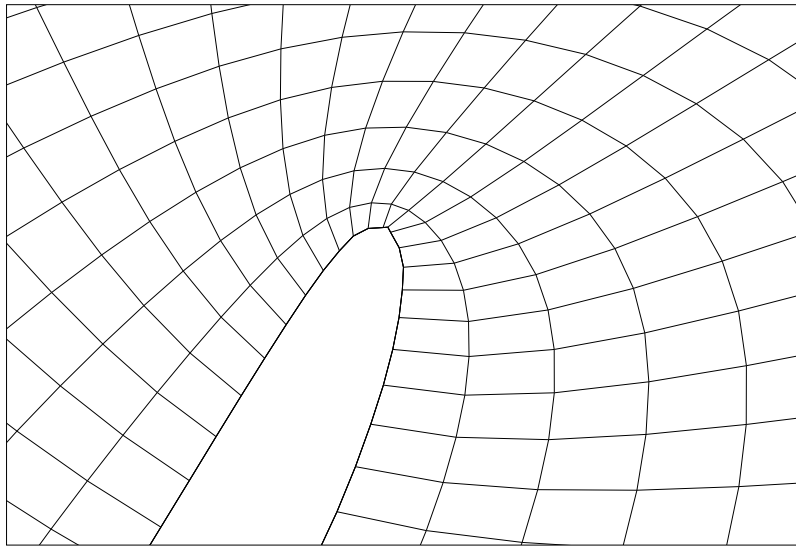


Bild 3: Eintrittskante beim Laplace-Gitter

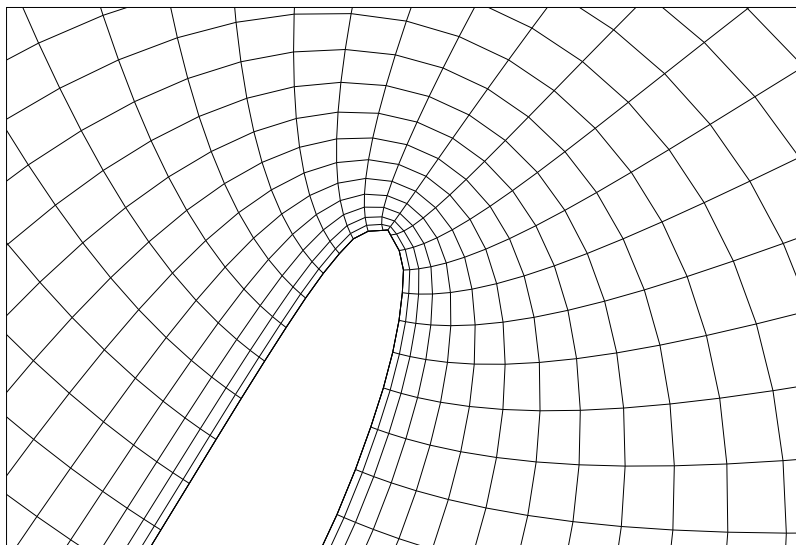


Bild 4: Eintrittskante beim Poisson-Gitter

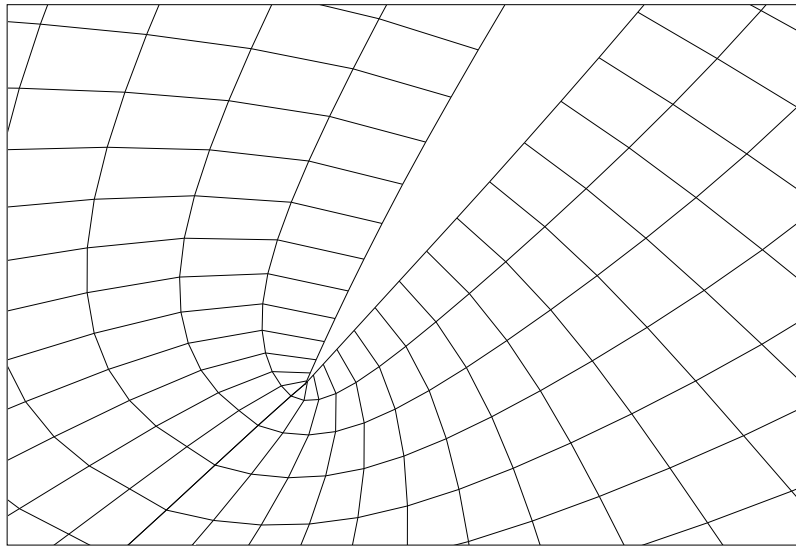


Bild 5: Austrittskante beim Laplace-Gitter

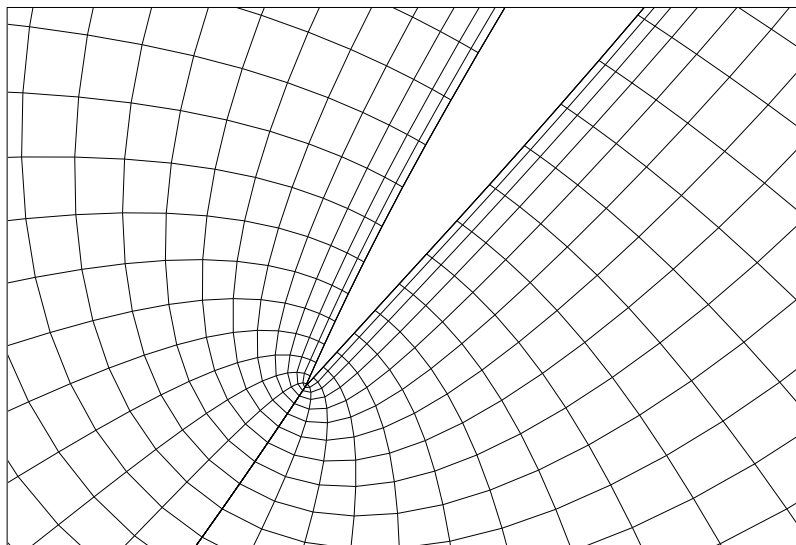


Bild 6: Austrittskante beim Poisson-Gitter

Aus den 2-dimensionalen Gittern wurde anschließend durch eine kubische Spline-Interpolation das 3-dimensionale Gitter für die gesamte Propellerkonfiguration erzeugt. Bild 7 zeigt einen Ausschnitt eines solchen Gitters mit verschiedene Gitterebenen.

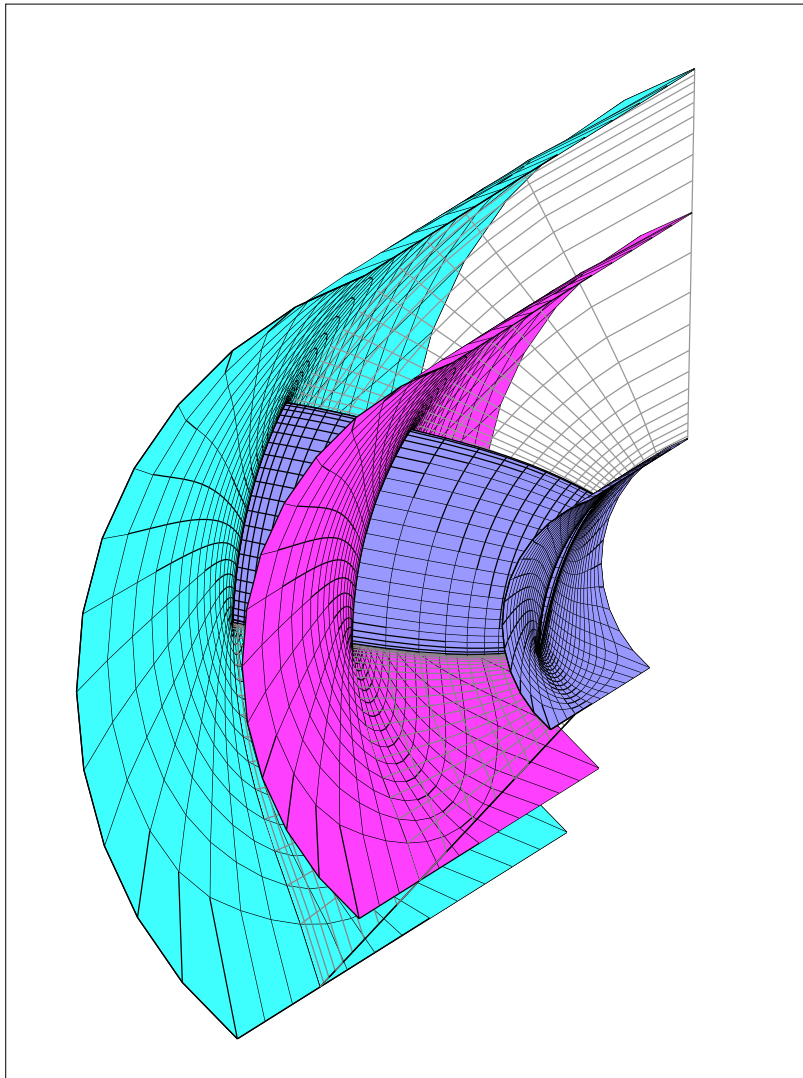


Bild 7: 3-dimensionales Gitter für eine Propellerkonfiguration

Parallel dazu wurde mit dem aus den Mitteln des Verlängerungsantrags angeschafften kommerziellen Gittergenerierers *P-Cube* ein dreidimensionales Gitter für den DTRC Propeller Nr. 4119 generiert. Es handelt sich dabei um ein blockstrukturiertes Gitter mit 30 einzelnen Blöcken. Bild 8 zeigt verschiedene Gitterebenen. In Bild 9 wird die Diskretisierung der Propeller- und Nabenoberfläche dargestellt. Dieser Propeller ist für die geplanten weiteren Untersuchungen ausgewählt worden, da von Jessup [7] ausführliche Modellversuche durchgeführt wurden und damit Vergleichswerte zur Verfügung stehen.

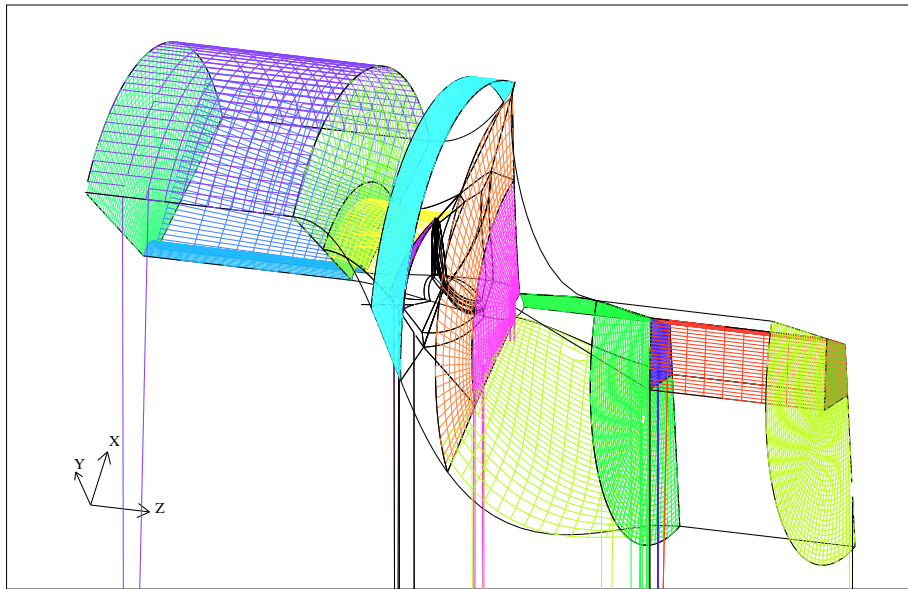


Bild 8: Blockstrukturiertes Gitter für den DTRC 4119 Propeller

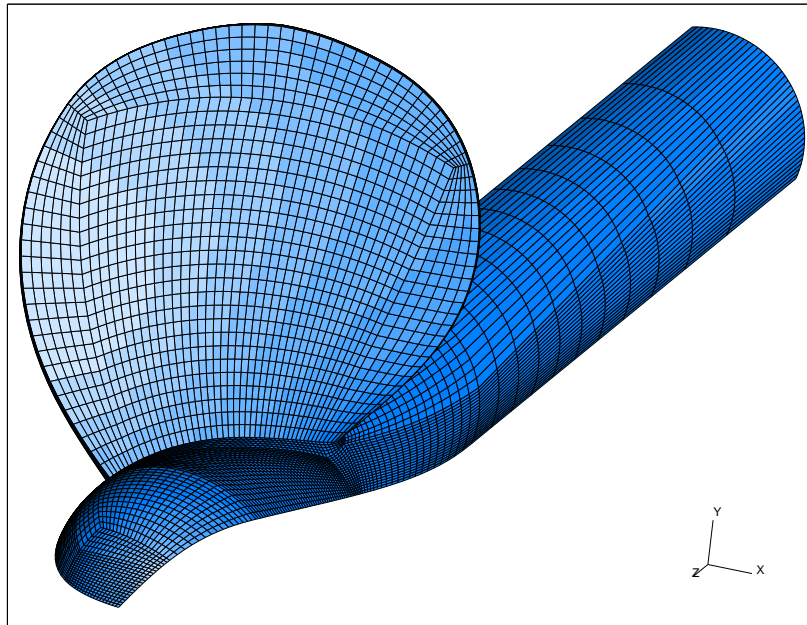


Bild 9: Diskretisierung der Flügel- und Nabenoberfläche

3 Berechnungen

3.1 Grundlagen

Die Simulation der viskosen Strömung im Bereich des Propellers wurde durch Lösung der zeitlich-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen durchgeführt. Zur Modellierung der Turbulenz wurde das Standard $k - \varepsilon$ -Modell eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens befindet sich in [1] und [8].

3.2 Düsenpropeller

Mit dem in 2.2 beschriebenen Verfahren wurde für den im VWS Projekt 1529 [9] eingesetzten 3-flügligen Düsenpropeller, zunächst ohne Düse, ein Gitter erzeugt und eine numerische Simulation durchgeführt.

Zur Validierung der numerischen Ergebnisse wurde der gleiche Propeller im Kavitationstank des ISM untersucht. Bild 10 zeigt das Freifahrt-Diagramm für diesen Propeller, wobei die Messwerte durch Linien dargestellt sind und die berechneten Werte mit Punkten gekennzeichnet sind.

Um den Einfluß der Diskretisierung zu untersuchen, wurde die Rechnung mit zwei unterschiedlichen Gittern durchgeführt: Zunächst wurde ein grobes Gitter mit etwa 70000 Zellen und später ein weiteres Gitter mit ca. 140000 Zellen eingesetzt.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß die Propellergeometrie nicht vollständig in das Rechenmodell übernommen werden konnte. Insbesondere ist auf den beim realen Propeller vorhandenen Hang zugunsten eines weniger stark verzerrten Gitters verzichtet worden.

Es zeigt sich, daß qualitativ die berechneten Werte mit den gemessenen zufriedenstellend übereinstimmen, jedoch weicht die absolute Größe des Moments und damit auch die der Wirkungsgrade von den meßtechnisch ermittelten Werten ab. Bei den Rechnungen mit dem feineren Gitter wurde hier besser Übereinstimmung erzielt, so daß durch eine weiteren Verfeinerung des Gitters eine noch größere Annäherung an die Meßwerte erwartet werden kann. Insbesondere können blockstrukturierte Gitter mit lokalen Gitterverfeinerungen helfen, den Rechenaufwand in einem erträglichen Rahmen zu halten, gleichzeitig aber die lokale Auflösung zu verbessern.

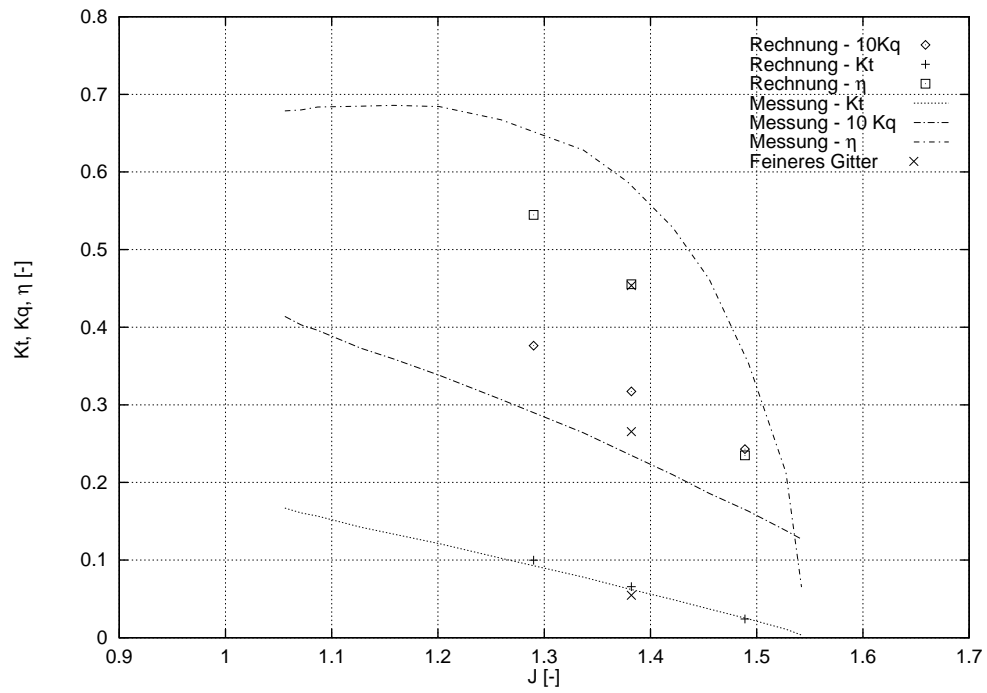


Bild 10: Freifahrt-Diagramm für den VWS-Propeller 1529 und numerische Ergebnisse

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Bericht des Forschungsvorhabens wurden im wesentlichen unterschiedliche Verfahren zur Gittergenerierung für Propellerkonfigurationen untersucht. Es zeigt sich, daß mit elliptischen Gittergenerierungsverfahren qualitativ sehr gute Gitter erzeugt werden können. Eine Erweiterung des bestehenden Verfahrens für den drei-dimensionalen Fall ist bereits in Arbeit.

Alternativ können auch gute blockstrukturierte Gitter mit kommerziellen Gittergenerierern verwendet werden. Hier ist jedoch die automatische Erzeugung der Gitter für verschiedene Propellerkonfigurationen problematisch, da umfangreiche interaktive Arbeiten notwendig sind, um die Orthogonalität für unterschiedliche Propeller zu gewährleisten.

Die Genauigkeit der numerischen Ergebnisse ist stark abhängig von der Feinheit und Qualität des Gitters. Blockstrukturierte Gitter im Zusammenhang mit elliptischen Gittergenerierungsverfahren und lokalen Verfeinerungen liefern gute Ergebnisse.

Im weiteren Verlauf des Projekts ist deshalb vorgesehen, die bestehenden Verfahren entsprechend zu erweitern, um auch damit realistische Propellergeometrien erfassen zu können. Insbesondere soll eine Kopplung der Gittergenerierung mit dem am ISM entwickelten Propellerentwurfsprogramm CAPD realisiert werden.

Weiterhin soll im nächsten Schritt dieses Vorhabens der bereits erwähnte VWS-Propeller auch mit der Düse diskretisiert werden. Die komplizierte Randumströmung, die bei höheren Belastungsgraden die numerische Lösung an der Flügelspitze instabil macht, ist bei der Berücksichtigung der Düse nicht in diesem Maße vorhanden.

5 Symbole

a, b, c, d	Faktoren in den Quelltermen
c	Propellersehnenlänge
C_F	Reibungswiderstandsbeiwert = $2R_F/(\rho \cdot V_{nom}^2 \cdot A)$
C_P	Druckkoeffizient = $2p/(\rho V^2)$
g	Gravitationsbeschleunigung = $9.81 m/s^2$
J	Fortschrittsziffer = $V/(nD)$
k	turbulente kinetische Energie
K_T	Schubbeiwert = $T/(\rho D^4 n^2)$
K_Q	Momentenbeiwert = $Q/(\rho D^5 n^2)$
n	Drehzahl
P, Q	Quellterme in der Poissongleichung
Q	Propellerdrehmoment
R	Propellerradius
Re	Reynoldszahl bezogen auf die Propellerwelle = $u \cdot l/\nu$
Re_c	Reynoldszahl bezogen auf die Propellersehne = $u \cdot c/\nu$
R_F	Reibungswiderstand
T	Propellerschub
V	Anströmgeschwindigkeit
x, y	kartesische Koordinaten
ε	Dissipationsrate
μ	molekulare Viskosität
η	Freifahrtwirkungsgrad = $K_T J / (2 K_Q \pi)$
ξ, η	Koordinaten im numerischen Raum
ν	kinematische Viskosität = μ/ρ
ϕ	Winkel der Zellkanten
ρ	Dichte
ω	Relaxationsparameter

6 Literatur

- [1] **H. Brandt, M. Abdel-Maksoud und K. Hochkirch:** *Berechnung der turbulenten Strömung um einen vereinfachten Propeller*, ISM-Bericht Nr. 95/4, Technische Universität Berlin, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, 1995
- [2] **G. J. Yoo, R. M. C. So und B. C. Hwang:** *Calculation of developing turbulent flows in a rotating pipe*, *Journal of Turbomachinery*, 113, 1991
- [3] **J. Zhang und B. Lakshminarayana:** *Computation and turbulence modelling for three-dimensional boundary layers including turbomachinery rotor flows*, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 11, 1990
- [4] **J. F. Thompson und Z. U. A. Warsi:** *Three-Dimensional Grid Generation from Elliptic Systems*, AIAA-83-1905, Mississippi State University, 1983
- [5] **J. F. Thompson, F. C. Thames und C. W. Mastin:** *TOMCAT - A Code for Numerical Generation of Boundary-Fitted Curvilinear Coordinate Systems on Fields Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies*, 24, Department of Aerophysics and Aerospace Engineering, Mississippi State University, 1977
- [6] **J. L. Steger und R. L. Sorenson:** *Automatic Mesh-Point Clustering Near a Boundary in Grid Generation with Elliptic Partial Differential Equations*, *Journal of Computational Physics*, 33, 1979
- [7] **S. D. Jessup, C. Scott, M. Jeffers und S. Kobayashi:** *Local Propeller Blade Flows in Uniform and Sheared Onset Flows Using LDV Techniques*, , David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1985
- [8] **Computational Dynamics Ltd.:** *Star-CD Manual Version 2.3*, Computational Dynamics Ltd., 1995
- [9] **M. Schmiechen, V. Goetz, A. Voss und H. Engler:** *Entwurf und Bewertung von Düsenpropellern*, FDS-Bericht Nr. 245/1993, Forschungszentrum des Deutschen Schiffbaus, 1993