

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***An veränderliche Wassertiefen angepasste Konzepte zur Energieeinsparung durch
Vergleichmäßigung des Propellerzustroms***

der Forschungsstelle(n)

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

Das IGF-Vorhaben 17034 N der Forschungsvereinigung Schiffstechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Duisburg, 30.11.2015

Ort, Datum

Dipl.-Ing. Sven List

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'S. List', written over a horizontal line.



AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

WAKE

An veränderliche Wassertiefen angepasste Konzepte zur
Energieeinsparung durch Vergleichmäßigung des Propellerzustroms

Bericht 2162 - im November 2015

von

Dipl.-Ing. S. List
Dr. rer. nat. K. Rügner
Dipl.-Ing. B. Friedhoff

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kurzdarstellung des Vorhabens	1
1.2	Stand der Technik	2
1.3	Eingesetzte CFD-Methoden	3
1.4	PIV-Techniken und Hardware	7
1.5	Nachstrom in der Schiffshydrodynamik	9
2	Modellversuche	14
2.1	Versuchsanlagen des DST	14
2.2	Maßstabseffekte	15
2.3	Verwendete Modelle	19
2.4	Propeller	20
2.5	PIV-Messungen	21
3	CFD-Modellierung und -Validierung	26
3.1	Einleitung	26
3.2	Voruntersuchungen	30
3.3	Validierung nomineller Nachstrom	33
3.4	Validierung effektiver Nachstrom	44
4	Entwurf und Analyse adaptiver Anhänge	47
4.1	Untersuchungen mit NACA-Profilen	47
4.2	Positionierung von Vortex-Generatoren am Hinterschiff	51
4.3	Numerische Untersuchungen mit Vortex-Generator	58
4.4	Numerische Untersuchungen für die Großausführung	74
5	Nachweis der Funktion im Modellversuch	79
5.1	PIV-Messungen zur Flossenwirkung	79
5.2	Propulsionsversuche	84
6	Zusammenfassung und Ausblick	88
6.1	Verwendung der Zuwendung	89
6.2	Voraussichtliche Nutzung und Verwertung der Ergebnisse	90
6.3	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	90

6.4 Veröffentlichungen	90
Literaturverzeichnis	91

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zusatzgeschwindigkeiten durch Kraftscheibenmodell	5
1.2	Zusatzgeschwindigkeiten durch Frozen-Rotor	6
1.3	Zusatzgeschwindigkeiten durch drehenden Propeller	6
1.4	Wirkung des Fluoreszenzlacks zur Minimierung von Reflexionen am Modell	8
2.1	Versuchsanlagen des DST	15
2.2	Maßstabseffekte an einem Tragflügel geringer Streckung	17
2.3	Abhängigkeit der Reynoldszahl vom Maßstab	18
2.4	Maßstabseffekte im Nachstrom	19
2.5	CAD-Darstellung der Schiffsgeometrien	20
2.6	Asymmetrisches PIV-Setup zur Messung des Nachstroms	22
2.7	Fotografie asymmetrischer PIV-Aufbau	22
2.8	Symmetrisches PIV-Setup mit Spiegeln im Tank	23
2.9	Nachstromverteilung effektiv ohne Flosse M1927	24
2.10	Nachstromverteilung nominell ohne Flosse M1926	25
3.1	Aufteilung des Lösungsgitters in Nah- und Fernfeld	28
3.2	Gitter KSM	28
3.3	Gitter für Propeller	28
3.4	Schematische Darstellung des Lösungsgebietes	29
3.5	Nachstromverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe M1926 I	31
3.6	Nachstromverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe M1926 II	31
3.7	Nachstromverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe M1927 I	31
3.8	Nachstromverteilung in Abhängigkeit von der Wassertiefe M1927 II	32
3.9	Wassertiefenabhängigkeit Nachstromziffer auf Propellerdrehkreis	32
3.10	Verformung der Wasseroberfläche	33
3.11	Darstellung der Koordinatensysteme	35
3.12	Vergleich Nachstrom PIV mit CFD ($k - \epsilon$ - Turbulenzmodell)	36
3.13	Vergleich Nachstrom PIV mit CFD (RSM-SSG Turbulenzmodell)	36
3.14	Vergleich Nachstrom PIV mit CFD (RSM-BSL Turbulenzmodell)	36
3.15	Vergleich Nachstrom PIV mit CFD (SST Turbulenzmodell 5% Intensität)	37
3.16	Vergleich Nachstrom PIV mit CFD (SST Turbulenzmodell 10% Intensität)	37
3.17	Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf Propellerradien I	38
3.18	Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf Propellerradien II	38

3.19	Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf Propellerradien III	39
3.20	Gittervarianten - Verfeinerungen in der Propellerebene	40
3.21	Gittervariation mit RSM - Nachstromziffer auf Radius $r/R = 0,7$	41
3.22	Gittervariation SST - Nachstromziffer in PE Modell M1926	42
3.23	Vergleich Gittervariation SST - Nachstromziffer auf Propellerradien I	42
3.24	Vergleich Gittervariation SST - Nachstromziffer auf Propellerradien II	43
3.25	Gittervariation SST - Nachstromziffer in PE Modell M1927	43
3.26	Nachstromziffer effektiv M1927 PIV vs. KSM	45
3.27	CFD-Nachstromziffer effektiv für Propeller P258 (0°)	45
3.28	CFD-Nachstromziffer effektiv für Propeller P258 (45°)	45
3.29	CFD-Nachstromziffer effektiv für Propeller P258 (60°)	46
4.1	Geometrie NACA 0018 Profil	48
4.2	Auswerteebenen hinter Profil A	48
4.3	Ausdehnung der Wirbel hinter dem Profil A	49
4.4	Geschwindigkeitsfeld hinter Profil A	49
4.5	Ausdehnung der Wirbel und normierte Geschwindigkeit hinter dem Profil B	50
4.6	Geschwindigkeitsfeld hinter Profil B	50
4.7	M1926 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,025 m über Rumpf	52
4.8	M1926 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,05 m über Rumpf	52
4.9	M1926 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,075 m über Rumpf	52
4.10	M1926 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,1 m über Rumpf	52
4.11	M1927 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,025 m über Rumpf	53
4.12	M1927 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,05 m über Rumpf	53
4.13	M1927 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,075 m über Rumpf	53
4.14	M1927 - Geschwindigkeitsfeld in Offsetebene 0,1 m über Rumpf	53
4.15	Auswahl der Flossenposition Y-Ansicht und Z-Ansicht	54
4.16	Auswahl der Flossenposition X-Ansicht - Flossenwinkel schematisch	54
4.17	Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 20°	55
4.18	Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 25°	55
4.19	Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 30°	56
4.20	Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 35°	56
4.21	Vergleich Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel $r/R = 0,7$	57
4.22	Hinterschiffsgeometrie mit Teilgitter für Profil.	58
4.23	Definition der Anstellwinkel Flosse	59
4.24	Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1926 $h = 0,35$ m	61
4.25	Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1926 $h = 0,35$ m	62
4.26	Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1926 $h = 0,5$ m	64
4.27	Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1926 $h = 0,5$ m	65
4.28	Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1927 $h = 0,35$ m	67
4.29	Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1927 $h = 0,35$ m	68
4.30	Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1927 $h = 0,50$ m	69

4.31	Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1927 $h = 0,50$ m	70
4.32	Positionierung der Drucksonden am Rumpf (CFD)	72
4.33	Druckimpulse am Schiffsrumpf Sonde A	73
4.34	Druckimpulse am Schiffsrumpf Sonde B	73
4.35	Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel GA-M1926 $h = 3,5$ m . . .	74
4.36	Nachstromziffer für ausgewählte r/R GA-M1926 $h = 3,5$ m	75
4.37	Nachstromziffer - Flossenlängen GA-M1926 $h = 3,5$ m	77
4.38	Nachstrom GA - Längenvariation Flosse	78
5.1	Nachstromverteilung nominell in Abhängigkeit des Anstellwinkels I	81
5.2	Nachstromverteilung nominell in Abhängigkeit des Anstellwinkels II	83
5.3	Einfluss der Flosse auf den Leistungsbedarf des Modells	85
5.4	Zeitverlauf des gemessenen Schubs bei $h = 350$ mm.	86
5.5	Schwankungen im Schub mit Blattfrequenz nach Fourier-Analyse	86

Tabellenverzeichnis

2.1	Propellereigenschaften	21
2.2	Messreihe nomineller Nachstrom ohne Flosse	25
3.1	Gittervarianten - Anzahl der Zellen im Lösungsgebiet Modell M1926	40
3.2	Gittervarianten - Anzahl der Zellen im Lösungsgebiet Modell M1927	44
4.1	Flossenpositionen im Modellmaßstab	57
4.2	Beschreibung Berechnungsfälle mit Vortex-Generator für $\lambda = 10$	59
4.3	Gütegrade des Nachstroms M1926 $h = 0,35$ m	63
4.4	Widerstände im Modellmaßstab M1926 $h = 0,35$ m	63
4.5	Widerstände im Modellmaßstab M1926 $h = 0,5$ m	64
4.6	Gütegrade des Nachstroms M1926 $h = 0,50$ m	66
4.7	Gütegrade des Nachstroms M1927 $h = 0,35$ m	66
4.8	Widerstände im Modellmaßstab M1927 $h = 0,35$ m.	67
4.9	Widerstände im Modellmaßstab M1927 $h = 0,50$ m	70
4.10	Gütegrade des Nachstroms M1927 $h = 0,35$ m	71
4.11	Gütegrade des Nachstroms GA-M1926 $h = 3,5$ m	76
4.12	Vergleich Gütegrade - Flossenlängen GA-M1926 $h = 3,5$ m	77
5.1	Messreihe nomineller Nachstrom	80
5.2	Gütegrade des nominellen Nachstroms I	82
5.3	Gütegrade des nominellen Nachstroms II	84

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschriftung	Dimension
Lateinische Symbole		
A	Flügelfläche	m^2
B	Kanalbreite	m
B	Schiffsbreite	m
c_D	Widerstandsbeiwert	-
c_L	Auftriebsbeiwert	-
D	Propellerdurchmesser	m
F_a	Auftriebskraft	N
Fr	Froudezahl	-
Fr_h	Tiefenfroudezahl	-
F_x	Widerstand	N
g	Erdbeschleunigung	m s^{-2}
h	Wassertiefe	m
h	Profilhöhe	m
J	Fortschrittsgrad	-
L	Schiffslänge	m
L	Profillänge (Flosse)	m
M	Ungleichförmigkeit	-
n	Drehzahl	s^{-1}
P	Steigung (Propeller)	m
P_E	Schleppleistung	W
P_D	Drehleistung	W
q	Staudruck	N m^{-2}
Q	Drehmoment	N m
r	radiale Koordinate (Polarkoordinatensystem)	m
R	Propellerradius	m
R_T	Gesamtwiderstand	N
Re	Reynoldszahl	-
t	Sogziffer	-
T	Schub	N
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$

T	Tiefgang	m
V	Geschwindigkeit	m s^{-1}
v_A	Anströmgeschwindigkeit	m s^{-1}
V_M	Modellgeschwindigkeit	m s^{-1}
V_S	Schiffsgeschwindigkeit	m s^{-1}
w	Nachstromziffer	-
x	Kartesische Koordinate (Länge)	m
y	Kartesische Koordinate (Breite)	m
z	Kartesische Koordinate (Höhe)	m

Griechische Symbole

β	hydrodynamischer Anstellwinkel	rad
η_D	Propulsionsgütegrad	-
η_H	Schiffseinflussgrad	-
η_N	gesamter Nachstromgütegrad nach Fahrbach	-
η_R	radialer Anteil Nachstromgütegrad nach Fahrbach	-
η_R	Gütegrad der Anordnung	-
η_{SVA}	Nachstromgütegrad nach der SVA Methode	-
η_U	Umfangsgütegrad (Nachstrom) nach Fahrbach	-
Θ	Polarwinkel (Koordinate)	°
λ	Maßstabsfaktor	-
ν	Kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
ϕ	Polarwinkel (Koordinate)	rad

Indizes

M	Modell
pp	zwischen den Loten
$Prop$	Propeller
S	Schiff

Abkürzungen

BSL	Baseline Turbulenzmodell
CFD	Computational Fluid Dynamic
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
DST	Development Centre for Ship Technology and Transport Systems
DNS	Direkte Numerische Simulation
KSM	Kraftscheibenmodell
LDV	Laser Doppler Velocimetry
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
Nd:YAG	Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
PIV	Particle Image Velocimetry
RANSE	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
RSM	Reynolds-Stress-Modell
SSG	Speziale-Sarkar-Gatski Turbulenzmodell
SST	Shear Stress Transport Turbulenzmodell
SVA	Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam
VOF	Volume-of-Fluid

1 Einleitung

1.1 Kurzdarstellung des Vorhabens

Besonders bei völligen Schiffen arbeiten Propeller infolge der viskosen Umströmung des Schiffsrumpfs in der Regel in einem stark inhomogenen Zustromfeld. Jedes Propellerblatt erfährt im Umlauf entsprechend periodisch schwankende Anströmbedingungen. Dies führt zu propellerinduzierten Schwingungen mit entsprechenden Komforteinbußen. Der Wirkungsgrad des Propellers im inhomogenen Strömungsfeld ist deutlich geringer als bei ungestörter Zuströmung. Die Fehlanströmung in den Winkel-Segmenten außerhalb der Entwurfsanströmung erhöht unter anderem das Risiko von Kavitation, wobei entsprechende Gegenmaßnahmen den Wirkungsgrad ebenfalls verringern. Die geringste Anströmgeschwindigkeit und damit der größte Anströmwinkel des Propellerblatts treten häufig im höchsten Punkt des Umlaufs auf, wo der geodätische Druck und der Freischlag zum Schiffskörper ihr Minimum besitzen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Kavitation und die Wirkung von Druckimpulsen.

Zunehmend werden Maßnahmen zu einer gezielten Vergleichmäßigung des Propellerzustroms ergriffen. Die bekannten Ansätze sind statisch und zielen auf Verbesserungen bei Entwurfsbedingungen ab. Das Zustromfeld ist jedoch empfindlich gegenüber Veränderungen des Fahrtzustands und besonders der Wassertiefe. Für Schiffe, die überwiegend unter variablen Flachwasserbedingungen operieren, wurden daher im Rahmen des hier dokumentierten Vorhabens adaptive Maßnahmen zur Vergleichmäßigung des Propellerzustroms untersucht.

Zunächst wurden für zwei verschiedene Rumpfformen numerische Simulationen und Modellversuche zur Identifikation der Nachstromfelder bei verschiedenen Wassertiefen durchgeführt. Bei den Modellversuchen wurde die Umströmung der Hinterschiffe sowohl mit als auch ohne laufende Propeller mit aufwändigen Methoden der sogenannten Particle Image Velocimetry (PIV) aufgemessen. Die Messergebnisse erlaubten eine sorgfältige Validierung und Verbesserung der eingesetzten CFD-Methoden. Die so ausgewählte Turbulenzmodellierung und die optimierte Vernetzungstechnik kamen beim numerisch gestützten Entwurf der neuartigen Anhänge zum Einsatz. Im Anschluss an die Simulationen mit verschiedenen Positionen und Formen ruderähnlicher Flossen wurde ein exemplarisches Konzept experimentell im großen Flachwassertank des DST analysiert. Hier wurde die Funktionsweise

sowohl mit PIV-Messungen als auch mit weiteren Messungen im Propulsionsversuch bei zwei repräsentativen Wassertiefen kontrolliert.

1.2 Stand der Technik

Bei Schiffen, die bei konstanter Wassertiefe oder im Tiefwasser operieren, können stromaufwärts vor dem Propeller positionierte Strömungskörper wie Düsen oder Flossen zu einer Vergleichmäßigung des Propellerzustroms führen. Bekannte Beispiele hierzu sind Zustromdüsen, wie sie von v. d. Stein und Schneekluth [25, 26] vorgeschlagen wurden, Grothues-Spoiler [9] unmittelbar vor dem Propeller oder Vortex Generator Fins (VGF) im Bereich der hinteren Schulter [4] und die Mewis Duct [18]. Mit diesen statischen Anbauten können Wirkungsgradverbesserungen um bis zu 10 % beziehungsweise Reduktionen der vom Propeller erzeugten Druckschwankungen im Hinterschiff um bis zu 50 % erreicht werden [19, 20]. Bei der Auslegung wird in der Regel entweder auf eine gesteigerte Effizienz oder im Fall der VGF auf eine reduzierte Kavitation und verringerte Schwingungserregung abgezielt.

Untersuchungen des nominellen Nachstromfelds bei Entwurfsbedingungen gehören ebenso wie die Abschätzung der Maßstabseinflüsse auf die Bedingungen der Großausführung zum Standardrepertoire der Schiffbauversuchsanstalten. Am DST (vormals VBD) wurde von 1986 bis 1988 ein durch die AiF gefördertes Forschungsvorhaben mit entsprechenden Untersuchungen an einem getunnelten Binnenschiff bei verschiedenen Wassertiefen bearbeitet [8]. Die Messungen erfolgen in der Regel mit Pitotrohren und für die gleichzeitige Erfassung der Querströmung mit Fünflochsonden. Aufgrund der beschränkten räumlichen Zugänglichkeit und der Beeinflussung der Strömung durch diese Sonden wird das effektive Nachstromfeld mit arbeitendem Propeller nach wie vor nur in seltenen Fällen gemessen.

Moderne berührungslose Verfahren basierend auf Lasertechnik wie die Particle Image Velocimetry eröffnen seit einigen Jahren neue Möglichkeiten. Hiermit können im Gegensatz zur Laser Doppler Velocimetry (LDV) ganze Querschnitte simultan aufgemessen werden. Lee et al. [13] konnten mittels PIV beispielsweise den erheblichen Einfluss der Schwimm-lage auf das nominelle Nachstromfeld eines Seeschiffs aufzeigen. PIV-Messungen hinter laufenden Propellern werden in vielen Kavitationstanks durchgeführt [14, 22]. Felice et al. führten auch Messungen hinter einem voll ausgerüsteten Modell mit Propulsion durch [3]. Messungen des effektiven Nachstroms zwischen Rumpf und Propeller sind dem Antragsteller dagegen bislang nur von Bugalski [2] bekannt. Gerade hier besteht jedoch ein großer Bedarf an Daten für ein tieferes Verständnis der komplexen Interaktion von Rumpf, Anhängen und Propeller sowie die Validierung der numerischen Modelle.

Maßstabseffekte auf den Nachstrom von Schiffen mit Nachstromausgleichsdüse und/oder Vortex Generator Fins wurden mit CFD-Methoden durch Ok [21] und Heinke et al. [10]

untersucht. Die durch experimentelle Untersuchungen gewonnenen Informationen über das Nachstromfeld beziehungsweise über die Wirkung von Anhängen können nicht einfach auf die Großausführung übertragen werden. Die CFD-Methoden haben den Vorteil, dass sie ohne großen Mehraufwand bei beliebigen Maßstäben einsetzbar sind. Aus diesem Grund bieten die numerischen Verfahren, neben teuren Großversuchen, die einzige Möglichkeit, den Maßstabeffluss zu identifizieren und gleichzeitig eine Vielzahl von Informationen zu liefern, die helfen, die Strömungsverhältnisse unter der Wirkung von Anhängen im Zustrom zum Propeller zu bewerten. Die veränderte Umströmung des Schiffsrumpfes, wie sie sich zum Beispiel bei Änderung der Wassertiefe einstellt, ist zwar bekannt, jedoch bislang nur lückenhaft untersucht. Bei der Entwicklung von Binnenschiffen wurden viele Maßnahmen entwickelt, die es erlauben, den Propellerantrieb bei sehr geringen Wassertiefen einzusetzen [27]. Diese anspruchsvollen Entwicklungen konzentrieren sich darauf, eine ausreichende Zuströmung zum Propeller zu gewährleisten und Lufteinbrüche zu verhindern. Gleichzeitige Maßnahmen zur Vergleichmäßigung des Propellerzustroms konnten dabei, der Komplexität der Aufgabe geschuldet, lediglich eine untergeordnete Rolle spielen.

Lange vor der oben genannten Arbeit von Grollius [8] wurden in der VBD Untersuchungen des Nachstromfeldes bei Binnenschiffen durchgeführt. Hier sind beispielsweise die Arbeiten von Graff [7], Schmidt-Stiebitz und Luthra [15, 16, 23, 24] zu nennen. In diesen Arbeiten wurden stets alle wesentlichen Einflüsse auf das Nachstromfeld berücksichtigt. Teilweise wurde sogar der Einfluss der Gewässerströmung, die durch die Wirkung der Bodenreibung das Nachstromfeld beeinflusst, untersucht. Das vorrangige Ziel der Untersuchungen war es, eine Verbesserung der Rumpfform – v. a. im Hinterschiff – für einen engen Arbeitsbereich (Wassertiefe, Tiefgang, Geschwindigkeit) zu erzielen. Wenngleich diese Forschungsergebnisse eine wertvolle Ausgangsbasis bilden, stehen heute moderne Methoden zur Verfügung, die sowohl experimentell als auch im Bereich der numerischen Simulationen eine tiefergehende Untersuchung erlauben.

1.3 Eingesetzte CFD-Methoden

In Verbindung mit experimentellen Methoden haben sich die numerischen Verfahren zur Untersuchung der Schiffsumströmung als ein wichtiges Element im Entwurfsprozess von Schiffen durchgesetzt. Der Vorteil der numerischen Verfahren ist, dass eine Vielzahl von Varianten durch einfache Anpassungen, wie zum Beispiel die Veränderung der Form oder des Anstellwinkels einer Flosse, realisiert werden kann. Diese Flexibilität kann die Erfolgsaussichten des Projektes wesentlich erhöhen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Berechnungen der Schiffsumströmung ohne erheblichen Mehraufwand für einen beliebigen Maßstab oder für die Großausführung durchgeführt werden können. Dadurch lassen sich Maßstabs-effekte, wie sie insbesondere aufgrund der verletzten Reynold'schen Ähnlichkeit bei der

Umströmung von Schiffsanhängen und im Zustrom des Propellers auftreten, identifizieren. Mit sogenannten Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANSE)-Codes können die viskosen Effekte und die Wirkung des drehenden Propellers abgebildet werden. Hinsichtlich der physikalischen Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität bestehen jedoch trotz großer Fortschritte in den vergangenen Jahren noch große Unsicherheiten. Insbesondere die Modellierung der turbulenten Erscheinungen stellt eine große Herausforderung an die numerischen Methoden. Unterschiedliche Ansätze zur Modellierung der Turbulenzen müssen getestet und auf ihre Eignung hinsichtlich der Abbildung der Realität geprüft werden. Aus diesem Grund werden die CFD-Verfahren an Hand von Berechnungen im Modellmaßstab mit experimentellen Untersuchungen verglichen.

Für die Berechnung inkompressibler, reibungsbehafteter und turbulenter Strömungen wird am DST standardmäßig das kommerzielle Programmpaket ANSYS-CFX eingesetzt. Der in diesem Paket eingesetzte Löser basiert auf den Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations und beschreibt die Strömungen im Fluid mit den Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls.

Reale Strömungen sind durch räumliche und zeitliche Schwankungen des Druckes und der Geschwindigkeit gekennzeichnet. Eine Auflösung dieser Schwankungen ist nur möglich, wenn alle auftretenden Turbulenzen räumlich und zeitlich komplett beschrieben werden können. Die vollständige räumliche und zeitliche Auflösung der turbulenten Wirbel ist für technisch relevante Problemstellungen auf Grund der begrenzten Ressourcen aktuell nicht möglich. Eine Lösung dieser Problematik ist die Anwendung sogenannter statistischer Modelle zur Beschreibung der turbulenten Erscheinungen. Hierbei wird die turbulente Strömung durch einen gemittelten und einen Schwankungswert für die Feldgrößen (Druck und Geschwindigkeit) modelliert. Standardmäßig wird am DST das $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell [17] eingesetzt. Die Berechnung der Zwei-Phasenströmung zur Ermittlung der Verformung der freien Wasseroberfläche erfolgt mit der Volume-of-Fluid (VOF) Methode.

Durch den angewandten Löser werden die Erhaltungsgleichungen nach der Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Ausführlich werden die angewandten Verfahren in [1] beschrieben.

Neben den numerischen Untersuchungen zum nominellen Nachstrom soll der effektive Nachstrom am Schiff numerisch ermittelt werden. Um die Wirkung des Propellers zu realisieren, können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Die Methoden unterscheiden sich neben der rein physikalischen Umsetzung der Wirkung des Propellers auch in ihrem Aufwand für Gittergenerierung und Rechenzeit.

1. Kraftscheibenmodell (KSM)
2. Frozen-Rotor mit realer Propellergeometrie
3. Drehender Propeller mit realer Propellergeometrie

Mit vergleichbar geringem Preprocessingaufwand lässt sich das Kraftscheibenmodell implementieren. Bei diesem Modell wird der reale Propeller durch eine Zylinderscheibe ersetzt, die den Propellerquerschnitt abdeckt. In diesem Zylinder werden zusätzliche Volumenkräfte vorgegeben, die den Schub und das Drehmoment des Propellers repräsentieren. Mit der aus dem numerischen Widerstandsversuch berechneten mittleren Geschwindigkeit am Ort des Propellers können der Schub und das Drehmoment aus dem Freifahrtdiagramm des Propellers zugeordnet werden. Eine radiale Verteilung der Kräfte kann entsprechend der Propellercharakteristik vorgenommen werden. Entsprechend der Aufteilung der Kraftkomponenten in der Propellerscheibe werden korrespondierende Zusatzgeschwindigkeiten vor und hinter dem Propeller induziert. Hierdurch ändert sich auch die Druckverteilung am Hinterschiff. Abbildung 1.1 zeigt die Wirkung des Kraftscheibenmodells. Dargestellt ist die axiale Komponente der normierten Geschwindigkeit in einer y-Ebene mittig im Propeller.

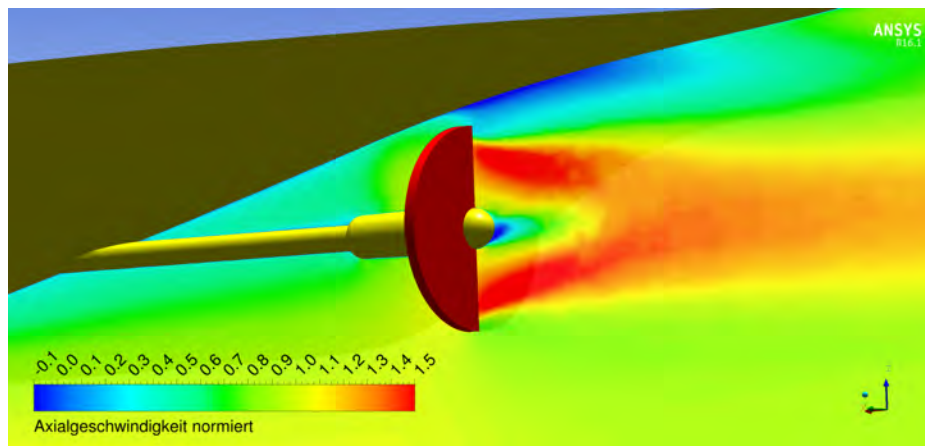


Abb. 1.1: Zusatzgeschwindigkeiten durch Kraftscheibenmodell

Nachteile dieses Verfahrens sind zum einen, dass die Zuordnung von Schub und Drehmoment indirekt aus dem numerischen Widerstandsversuch übernommen werden muss und dass die Interaktion des Schiffs mit dem Propeller nur mit entsprechendem Aufwand iterativ möglich ist. Die instationären Effekte des arbeitenden Propellers, wie zum Beispiel Druckimpulse am Rumpf, werden nicht berücksichtigt.

Bei den Verfahren unter Einbeziehung der realen Propellergeometrie müssen Schub und Drehmoment nicht festgelegt werden, sie ergeben sich aus der Umströmung der Propellerprofile bei einer gewählten Drehzahl. Bei der Anwendung des Frozen-Rotor-Interfaces werden die Strömungsverhältnisse am Hinterschiff in einer gewählten Flügelstellung berechnet. Dies ist begründet darin, dass das stationäre Teilgitter (Wasser mit Schiff) eine festgelegte Position zum rotierenden Propellergitter hat. Durch eine Transformation werden die Effekte, die sich aus der Rotation des Propellergitters ergeben, erfasst und liefern stationäre Ergebnisse für eine gewählte Flügelstellung (Abbildung 1.2). Der zeitliche Aufwand für

die numerische Simulation unterscheidet sich nur unwesentlich vom Kraftscheibenmodell. Jedoch ist der Aufwand im Preprocessing durch die Erstellung eines Volumengitters für den realen Propeller deutlich größer.

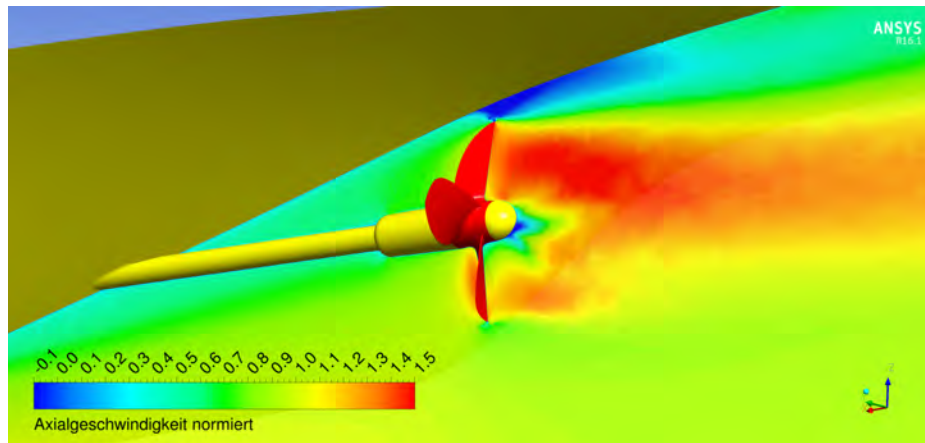


Abb. 1.2: Zusatzgeschwindigkeiten durch Frozen-Rotor

Im Gegensatz zum Frozen-Rotor liefert die transiente Berechnung des drehenden Propellers detaillierte Informationen über die Wirkung des Propellers und erfasst die transienten Effekte, die sich aus der Rotation des Propellers ergeben. Nachteil der Simulation des rotierenden Propellers ist der um ein Vielfaches erhöhte Zeitaufwand für die Realisierung der Berechnung.

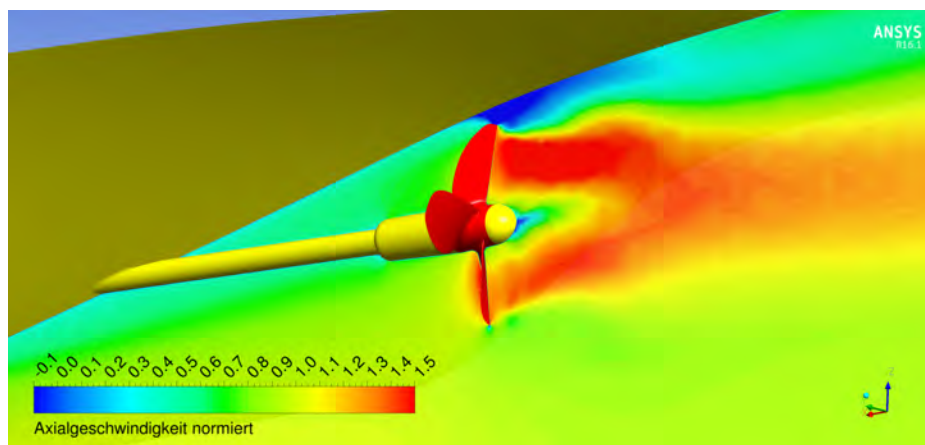


Abb. 1.3: Zusatzgeschwindigkeiten durch drehenden Propeller

Für das Finite-Volumen-Verfahren muss das gesamte Lösungsgebiet in eine Vielzahl von Kontrollvolumen unterteilt und dabei die Geometrie eindeutig beschrieben werden. Im

Rahmen dieses Projektes wurden unterschiedliche Ansätze der Strukturierung der Lösungsgebiete verfolgt. Dies dient dem Ziel, den Rechenaufwand deutlich zu reduzieren ohne die Qualität der Lösung zu beeinflussen.

1.4 PIV-Techniken und Hardware

Bei der Particle Image Velocimetry wird die Bewegung von Tracer- oder Seeding-Partikeln in einem Lichtschnitt, der von einem gepulsten Laser aufgespannt wird, innerhalb eines definierten Zeitraums zur quantitativen Erfassung von Strömungsfeldern genutzt. Das an den Partikeln gestreute Licht wird jeweils in den nur wenige Nanosekunden andauernden Pulsen des Lasers von Digitalkameras aufgezeichnet. Eine Kalibrierung des Bildausschnitts erlaubt eine Umrechnung der in Bildpunkten ausgewerteten Partikelbewegung in reale Längeneinheiten. Mit dem zeitlichen Abstand zwischen den Lichtpulsen können so die zugehörigen Geschwindigkeitskomponenten berechnet werden. Dies geschieht nicht für einzelne Partikel, sondern mittels einer Kreuzkorrelation für Teilgebiete wählbarer Größe innerhalb der Abbildung. Aus jedem Doppelbild resultieren daher Vektorfelder der Geschwindigkeiten auf einem festen Raster.

Klassische 2C-PIV-Methoden verwenden eine einzelne Kamera und lösen nur die Geschwindigkeiten in der Lichtschnittebene auf. Wenn auch die Komponente normal zu dieser Ebene gemessen werden soll und ein geeigneter optischer Zugang zum Messbereich besteht, können sogenannte Stereo- oder 3C-PIV-Setups diese anhand der endlichen Dicke des Lichtschnitts durch die scheinbare Verschiebung der Partikelsignale aus verschiedenen Blickwinkeln (Parallaxe) auswerten. Analog zu den 2-Komponenten Systemen werden hier für einen Zeitschritt zwei Bilder je Kamera ausgewertet. Ein Quadrupel aus vier Bildern liefert also ein dreidimensionales Vektorfeld.

Das am DST eingesetzte PIV-System des Instituts für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen arbeitet mit einer nominellen Doppelpulsfrequenz des Lasers von 100 Hz und beinhaltet zwei Hochgeschwindigkeitskameras mit je zwei Megapixel Auflösung und sechs Gigabyte internem Speicher. Bei der Pulsfrequenz von 100 Hz und einer Modellgeschwindigkeit von 1,00 m/s entspricht der Abstand der gemessenen Vektorfelder 10 mm. Um die Modellposition den Vektorfeldern eindeutig zuordnen zu können, ist eine komplexe Triggerung notwendig. Weitere Details des Systems enthält die folgende Aufstellung:

Laser InnoLas SpitLight PIV Compact 100: Frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit zwei mittels Dioden gepumpten Kavitäten, einer Pulsenergie von 60 mJ bei 532 nm und einer Frequenz von 100 Hz. Gegenüber Blitzlampengepumpten Lasern gestattet dieser Laser einen flexiblen Aufbau ohne ausgeprägte Abhängigkeit der Strahlqualität von der Lage.

Kameras Zwei VisionResearch Phantom v9.1 CMOS Kameras mit je 2 MP und 6 GB integriertem Speicher. Mit einer Farbtiefe von 14 bit erlauben diese Kameras auch bei schwierigen Belichtungssituationen hinreichend kontrastreiche Aufnahmen. Die Datenübertragung erfolgt mit Gigabit-Ethernet Verbindungen.

Optisches Zubehör Verschiedene Objektive mit 24, 35 und 50 mm Brennweite stehen zur Verfügung. Diese Objektive können mit verschiedenen optischen Filtern sowie Scheimpflugadaptern für die Fokussierung auf eine relativ zum Sensor gekippte Bildebene eingesetzt werden.

Steuerung und Datenaufzeichnung HighSpeed Controller für flexible externe und interne Triggeroptionen und PC mit der Software LaVision DaVis.

Postprocessing Die finale Auswertung der Daten erfolgt ebenfalls mit LaVision DaVis sowie DST-eigenen Werkzeugen.

Partikel Als Tracer-Partikel wurden Partikel aus Polyamid mit einem Durchmesser von $100\ \mu\text{m}$ verwendet. Es wurde eine Dichte von etwas mehr als $1000\ \text{kg/m}^3$ angestrebt.

An den Modelloberflächen treten starke Reflexionen des Lasers auf, welche die wandnahe Identifikation der Partikelsignale stören. Daher wurden die Hinterschiffe der Modelle mit einem Fluoreszenzlack behandelt. So fluoresziert die Rumpfoberfläche mit einer anderen Wellenlänge des Lichts als die Partikel oder die gewöhnliche Reflexion. Diese Wellenlänge kann mit einem optischen Bandpass weitgehend herausgefiltert werden. Die Reduzierung der abgebildeten Lichtintensität ist in Abbildung 1.4 deutlich erkennbar.



Abb. 1.4: Mit einem pinken Fluoreszenzlack können die Reflexionen des Laserlichts an der Modelloberfläche stark reduziert werden. Das Licht mit der Fluoreszenzwellenlänge kann optisch herausgefiltert werden.

1.5 Nachstrom in der Schiffshydrodynamik

1.5.1 Allgemein

Als Nachstrom bezeichnet man den Geschwindigkeitsunterschied zwischen der ungestörten Strömung und der durch das Schiff veränderten Strömung hinter dem Schiff. Diese veränderte Strömung nimmt enormen Einfluss auf die Funktion des Propellers. Durch Reibungsverluste am Schiff wird die Strömung meist stark inhomogen und führt daher zu Beeinträchtigungen im Betrieb des Propellers. Diese Beeinträchtigungen äußern sich in Effizienzeinbußen und Komfortverlusten. Der Komfort wird zum Beispiel durch propellerinduzierte Schwingungen beeinträchtigt, die durch die inhomogene Anströmung verursacht werden und sich auf verschiedenen Wegen auf den Schiffskörper übertragen. Besonders starke Vibrationen können zudem die Schiffssicherheit gefährden. Eine ungleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeiten im Nachstrom wird bei gegebener Schiffsgeometrie durch die Schiffsgeschwindigkeit, die Schwimmlage und die Wassertiefe beeinflusst. Der Nachstrom wird meist durch die Nachstromziffer w (Taylor wake fraction) beschrieben, die sich aus der auf die Schiffsgeschwindigkeit normierten Anströmgeschwindigkeit des Propellers ergibt:

$$w = 1 - \frac{v_A}{V_S} \quad (1.1)$$

Man unterscheidet zwischen dem nominellen und effektiven Nachstrom. Unter dem nominellen Nachstrom versteht man den Nachstrom am Ort des Propellers, ohne dass dieser anwesend ist. Unter dem effektiven Nachstrom versteht man den durch den Propeller beeinflussten Zustrom des Propellers. Der effektive Nachstrom ist eigentlich die relevantere Größe, da sie die reale Situation im Schiffsbetrieb beschreibt. Allerdings lässt sich der effektive Nachstrom sowohl bei Computersimulationen als auch in Modellversuchen nur schwer bestimmen. Daher greift man in der Regel auf die Beschreibung durch den nominellen Nachstrom zurück.

Die Bewertung des Nachstroms beruht meist auf der optischen Beurteilung des Nachstromplots bzw. der Auftragung von Geschwindigkeitskomponenten oder des Gleitwinkels über dem Umlaufwinkel. Ein objektiveres Verfahren zur Bewertung der Güte eines Nachstromfeldes wurde von der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) entwickelt und soll im Folgenden vorgestellt werden.

1.5.2 Bewertung der Güte von Nachstromfeldern

Für die Bewertung des Nachstroms wurde hier das Verfahren der SVA sowie die erweiterte Methode nach Fahrbach [5] angewandt.

Nachstromanalyse nach der Methode der SVA

Die SVA-Methode zur Nachstromanalyse betrachtet allein die axiale Anströmgeschwindigkeit des Propellers und kann damit auch für Nachstromfelder, die mit einer gewöhnlichen Nachstromharke aufgemessen wurden, eingesetzt werden. Hierzu wird zunächst die Anströmgeschwindigkeit auf die Schiffsgeschwindigkeit normiert:

$$v' = \frac{v_A}{V_S} \quad (1.2)$$

Aus der normierten Anströmgeschwindigkeit werden der Mittelwert $v'_m(r)$ und die mittlere Abweichung vom Mittelwert $\delta(r)$ auf den normierten Propellerradien (r/R) gebildet:

$$v'_m(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v'(r, \phi) d\phi \quad (1.3)$$

$$\delta(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |v'(r, \phi) - v'_m(r)| d\phi \quad (1.4)$$

In die Bewertung eingehen muss auch die Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta(r)$ zwischen der maximalen und minimalen Anströmgeschwindigkeit auf den einzelnen Radien:

$$\Delta(r) = v'_{max}(r) - v'_{min}(r) \quad (1.5)$$

Aus der mittleren Abweichung von Mittelwert und Geschwindigkeitsdifferenz lässt sich die sogenannte Ungleichförmigkeit $M(r)$ auf jedem Radius bestimmen:

$$M(r) = \sqrt{2 \cdot \delta(r) \cdot \Delta(r)} \quad (1.6)$$

Gemittelt über alle Radien, ergibt sich daraus die mittlere Ungleichförmigkeit $\overline{M}$, die den Nachstromgütegrad bestimmt:

$$\overline{M} = \frac{1}{(r/R)_{max} - (r/R)_{min}} \int_{(r/R)_{min}}^{(r/R)_{max}} M(r) dr \quad (1.7)$$

Für geringe Schwankungen und eine damit verbundene niedrige Ungleichförmigkeit soll sich eine hohe Nachstromgüte ergeben. Der Nachstromgütegrad η_{SVA} ist demnach definiert als:

$$\eta_{SVA} = 1 - \overline{M} \quad (1.8)$$

Der ideale Gütegrad von $\eta_{SVA} = 1$ würde sich für ein vollständig rotationssymmetrisches Nachstromfeld ergeben. Weist das Nachstromfeld starke Geschwindigkeitsschwankungen

auf, sinkt der Gütegrad. Aus Erfahrungswerten der SVA wurde ein Gütegrad von $\eta_{SVA} \geq 0,7$ als gut eingestuft.

Die klassische SVA-Methode weist allerdings einige Schwachpunkte auf. Sie berücksichtigt nur die axiale Geschwindigkeit und lässt die tangentielle Geschwindigkeitskomponente außer Acht. Auch das Vorhandensein von Gradienten wird nicht mit in die Bewertung einbezogen, wodurch lokale Effekte nicht berücksichtigt werden. Alle Messradien werden gleich stark gewichtet, obwohl die äußeren Radien entscheidend für die Nachstromqualität sind. Daher wurde ein verbessertes Kriterium entwickelt, das im Folgenden vorgestellt werden soll.

Verbessertes Kriterium nach Fahrbach

Die verbesserte Methode zur Nachstromanalyse nach Fahrbach betrachtet an Stelle von Anströmgeschwindigkeiten den hydrodynamischen Anstellwinkel, dadurch lässt sich auch die Tangentialkomponente der Strömung in die Rechnung mit einbeziehen. Der hydrodynamische Anstellwinkel lässt sich für jeden Messradius wie folgt bestimmen:

$$\beta(r, \phi) = \arctan\left(\frac{v'_T(r, \phi)}{2\pi \frac{r}{R} + v'_T(r, \phi)}\right) \quad (1.9)$$

v'_T ist die auf die Schiffsgeschwindigkeit normierte tangentielle Geschwindigkeitskomponente. Nun wird der mittlere Anstellwinkel auf jedem Radius bestimmt und auf den maximalen Anstellwinkel auf dem Radius normiert. Dieser wird im Weiteren mittlerer radialer Anstellwinkel $\beta'_m(r)$ genannt:

$$\beta'_m(r) = \frac{1}{\beta_{max}} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta(r, \phi) d\phi \quad (1.10)$$

Um die Schwankung des Anstellwinkels zu erfassen, wird die Differenz $\Delta\beta'(r)$ zwischen dem normierten größten und kleinsten Anstellwinkel auf einem Radius bestimmt:

$$\Delta\beta'(r) = \left(\frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{\beta_{max}}\right) \quad (1.11)$$

Um auch lokale Effekte mit in die Bewertung einzubeziehen, wird der Gradient des Anstellwinkels berechnet und das Maximum davon bestimmt:

$$\left(\frac{d\beta}{d\phi}(r)\right)_{max} \quad (1.12)$$

Aus diesen Größen lassen sich nun zwei Anteile berechnen, zum einen der radiale Gütegrad und zum anderen der Umfangsgütegrad.

Für den radialen Gütegrad wird zunächst die Differenz $D\beta'_m$ zwischen dem größten und kleinsten auftretenden Wert des mittleren radialen Anstellwinkels auf den einzelnen Radius berechnet:

$$D\beta'_m = (\beta'_m(r))_{max} - (\beta'_m(r))_{min} \quad (1.13)$$

Nun werden der Mittelwert $\overline{\beta'_m}$ des mittleren radialen Anstellwinkels über alle Radien sowie die mittlere Abweichung $d\beta'_m$ vom Mittelwert bestimmt:

$$\overline{\beta'_m} = \frac{1}{(r/R)_{min} - (r/R)_{max}} \int_{(r/R)_{min}}^{(r/R)_{max}} \beta'_m(r) dr \quad (1.14)$$

$$d\beta'_m = \frac{1}{(r/R)_{max} - (r/R)_{min}} \int_{(r/R)_{min}}^{(r/R)_{max}} |\beta'_m(r) - \overline{\beta'_m}| dr \quad (1.15)$$

Der radiale Gütegrad setzt sich dann wie folgt zusammen:

$$\eta_R = 1 - \sqrt{D\beta'_m \cdot d\beta'_m} \quad (1.16)$$

Je kleiner die Differenz und die mittlere Abweichung des mittleren radialen Anstellwinkels, desto größer ist die radiale Güte.

Für den Umfangsgütegrad wird aus den Anstellwinkelschwankungen zunächst ein mit dem Radius gewichteter Mittelwert $\Delta\beta'$ gebildet:

$$\overline{\Delta\beta'} = \frac{1}{(r/R)_{max} - (r/R)_{min}} \int_{(r/R)_{min}}^{(r/R)_{max}} \frac{r}{R} \cdot \Delta\beta'(r) dr \quad (1.17)$$

Analog dazu wird ein gewichteter Mittelwert $\overline{\left(\frac{d\beta}{d\phi}\right)_{max}}$ des maximalen Anstellwinkel-Gradienten gebildet:

$$\overline{\left(\frac{d\beta}{d\phi}\right)_{max}} = \frac{1}{(r/R)_{max} - (r/R)_{min}} \int_{(r/R)_{min}}^{(r/R)_{max}} \frac{r}{R} \cdot \left(\frac{d\beta}{d\phi}(r)\right)_{max} dr \quad (1.18)$$

Der Umfangsgütegrad η_U ergibt sich dann aus:

$$\eta_U = 1 - \sqrt{2 \cdot \overline{\Delta\beta'} \cdot \overline{\left(\frac{d\beta}{d\phi}\right)_{max}}} \quad (1.19)$$

Auch hier gilt, je kleiner die Anstellwinkelschwankung und je kleiner der Anstellwinkel-Gradient, desto größer ist der Umfangsgütegrad.

Der Gesamtgütegrad ergibt sich aus dem Produkt der beiden Anteile:

$$\eta_N = \eta_R \cdot \eta_U \quad (1.20)$$

Auch hier wurden die Gütegrade durch Erfahrungswerte eingestuft, ein gutes Nachstromfeld sollte die folgenden Gütegrade aufweisen:

radialer Gütegrad	$\eta_R \geq 0,920$
Umfangsgütegrad	$\eta_U \geq 0,670$
Gesamtgütegrad	$\eta_N \geq 0,620$

2 Modellversuche

Im Projekt wurden für zwei Schiffsformen konventionelle Widerstands- und Propulsionsversuche bei verschiedenen Wassertiefen durchgeführt. Für ausgewählte Konfigurationen hieraus wurden mit verschiedenen PIV-Anordnungen die Strömungsfelder im Hinterschiff aufgemessen. Die erste Versuchsreihe wurde sehr früh im Projektverlauf zunächst ohne die später entworfenen Anhänge zur adaptiven Beeinflussung des Nachstroms durchgeführt. Hierbei wurden bereits verschiedene Anordnungen des PIV-Systems getestet und Nachstromfelder für die Validierung der numerischen Methoden aufgemessen. Später im Projekt dienten die Versuche mit verstellbaren Anhängen dann der Validierung der Funktion dieser Flossen.

2.1 Versuchsanlagen des DST

Sämtliche Modellversuche in diesem Vorhaben wurden im großen Flachwassertank des DST (siehe Abbildung 2.1) durchgeführt. Dieser Schlepptank besitzt eine Länge von 200 m und eine Breite von 9,8 m. Die Wassertiefe ist zwischen 0 und ca. 1,2 m frei einstellbar. Hierfür wird das Wasser zwischen diesem Tank und dem mit dem Manövrierbecken zusammenhängenden kleinen Tief- und Flachwassertank umgepumpt. Die Pumpenanlage kann auch zur Erzeugung einer umlaufenden Strömung in den Tanks genutzt werden. Des Weiteren können Wellen in den Anlagen erzeugt werden. Eine elementare Einrichtung für die hier dargestellten Versuche ist der sogenannte Beobachtungstunnel unter der Fahrspur der Modelle, die hier vom konventionellen Schleppwagen aus geführt wurden. Dieser optische Zugang wurde für die Installation der PIV-Anlage verwendet.

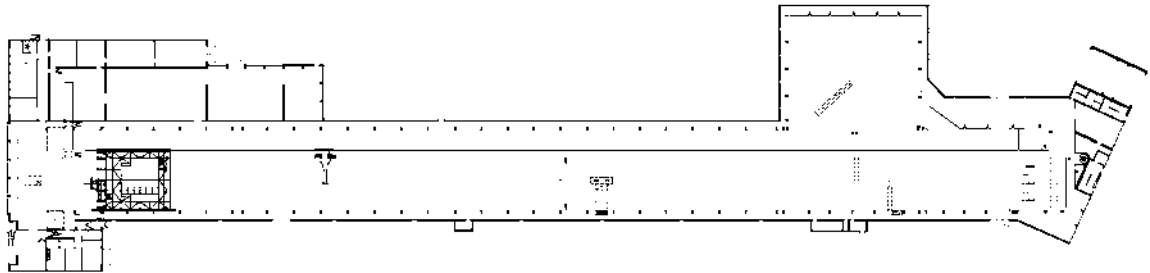


Abb. 2.1: Die Versuchsanlagen des DST in der Draufsicht. Zu erkennen sind die parallelen Versuchsbecken, beide Schleppwagen sowie der Beobachtungstunnel, der für Unterwasseraufnahmen und auch PIV-Messungen genutzt wird.

2.2 Maßstabseffekte

Für die Durchführung von Modellversuchen in Schiffbauversuchsanstalten werden geometrisch ähnliche und genau gefertigte, verkleinerte Modelle genutzt. Die Wahl des Maßstabs hängt von verschiedenen, teils konträren Gesichtspunkten ab. Grundsätzlich sind für die üblichen Widerstands- und Propulsionsversuche verschiedene Ähnlichkeitsgesetze relevant. Am wichtigsten sind hier die Ähnlichkeit bezüglich der viskosen Effekte, die durch die Reynoldszahl ausgedrückt wird, und die mit der Froudezahl beschriebene Ähnlichkeit bezüglich der durch Massenkräfte dominierten Effekte. Eine Einhaltung von Froude'scher und Reynold'scher Ähnlichkeit zugleich ist nur für den theoretischen Fall $\lambda = 1$, also Modellgröße gleich Schiffsgröße, möglich. Dies wird bei Betrachtung der folgenden Gleichungen offensichtlich.

Es gilt für die Froudezahlen im Modell:

$$Fr_M = \frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} \quad (2.1)$$

und in der Großausführung:

$$Fr_S = \frac{V_S}{\sqrt{gL_S}} \quad (2.2)$$

Die Froude'sche Ähnlichkeit setzt gleiche Froudezahlen für das Modell und die Großausführung voraus:

$$Fr_M = Fr_S \quad (2.3)$$

Daraus folgt für die Geschwindigkeit:

$$\Rightarrow V_M = V_S \frac{\sqrt{gL_M}}{\sqrt{gL_S}} = V_S \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.4)$$

Entsprechendes gilt für die Reynoldszahlen im Modell:

$$Re_M = \frac{V_M L_M}{\nu_M} \quad (2.5)$$

Und in der Großausführung:

$$Re_S = \frac{V_S L_S}{\nu_S} \quad (2.6)$$

Die Reynold'sche Ähnlichkeit setzt voraus, dass die Reynoldszahlen im Modell und in der Großausführung gleich sind:

$$Re_M = Re_S \quad (2.7)$$

Unter der Annahme, dass die kinematische Viskosität des Wassers im Modell ν_M und für die Großausführung ν_S in erster Näherung gleich ist, folgt daraus für die Geschwindigkeit:

$$\Rightarrow V_M = V_S \frac{L_S}{L_M} = V_S \lambda \quad (2.8)$$

Die Froude'sche Ähnlichkeit wird also bei einem kleineren Modell eingehalten durch eine im Vergleich zum Original um den Faktor $\sqrt{\lambda}$ geringere Geschwindigkeit, während zur Gewährleistung von Reynold'scher Ähnlichkeit eine um den Faktor λ höhere Geschwindigkeit, verbunden mit einer praktisch nicht realisierbaren Schleppleistung, gefahren werden müsste. Eine gleiche Reynoldszahl bedeutet in einem gegebenen Medium unabhängig von der Größe der Geometrie die gleiche Kraft. Da die Geschwindigkeit bei dem kleineren Modell entsprechend größer ist, ist die Leistung im Modellmaßstab sogar deutlich größer als in der Großausführung.

Die gleichzeitige Einhaltung der Ähnlichkeit nach Froude und nach Reynolds ist im schiffbaulichen Kontext entsprechend in den allermeisten Fällen nicht zu realisieren. Die Versuche werden daher in der Regel mit Froude'scher Ähnlichkeit durchgeführt, wobei die Fehler durch die bei kleineren Reynoldszahlen zu große Viskosität rechnerisch korrigiert werden. Da diese Korrekturen nur mit einer begrenzten Genauigkeit möglich sind, sollten die Modelle einerseits so groß wie möglich sein. Allerdings verringern sich durch ein größeres Modell die Einflüsse von Ungenauigkeiten in Fertigung und Messung. Andererseits aber sind der Modellgröße praktische Grenzen gesetzt. So müssen die Gegebenheiten der zur Verfügung stehenden Versuchsanlagen berücksichtigt werden. Bei einem größeren Modell steigt die erforderliche Schleppleistung mit etwa der 3,5-fachen Potenz des Maßstabs. Zusätzlich ist die Geschwindigkeit beim größeren Modell um den Faktor der Quadratwurzel des Maßstabs höher, wodurch bei beschränktem Messweg durch eine endliche Tanklänge

die Messzeit kleiner und auch ein größerer Anteil der Tanklänge für Beschleunigungsstrecken "verbraucht" wird. Hinzu kommt der Faktor, dass mit zunehmender Modellmasse und Versperrung des Tankquerschnitts auch der Einfluss des Schlepptanks zunimmt.

Insbesondere an auftriebserzeugenden Flächen dürfen die viskosen Effekte nicht vernachlässigt werden. Es ist daher angebracht, die Maßstabeffekte für die geplante Anbringung einer Flosse zu überprüfen. Dazu wurden mittels CFD-Simulationen die auf die Flosse wirkenden Kräfte für das später verwendete Profil der Flosse (NACA 0018) bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten bzw. Reynoldszahlen bestimmt. Aus den Kräften lassen sich der Widerstandsbeiwert und der Auftriebsbeiwert bestimmen. Da für die Beeinflussung des Nachstroms in diesem Projekt der Auftrieb in Form des induzierten Wirbels nur mittelbar relevant ist, wurde für diese Parameterstudie ein kurzer Flügel von fast quadratischer Grundfläche verwendet. Dieser Flügel mit einem Streckungsverhältnis von 0,75 schließt einseitig an einer Wand mit Haftbedingung ab, während am anderen Ende der Randwirbel erzeugt und durch das Rechengebiet transportiert wird.

Für eine übersichtliche Darstellung der Maßstabeffekte werden dennoch die dimensionslosen Beiwerte für Auftrieb und Widerstand herangezogen. Der Widerstandsbeiwert ist definiert als:

$$c_D = \frac{F_x}{qA} = \frac{2F_w}{\rho V^2 A} \quad (2.9)$$

Der Auftriebsbeiwert ist definiert als:

$$c_L = \frac{F_a}{qA} = \frac{2F_a}{\rho V^2 A} \quad (2.10)$$

Dabei ist A die Flügelfläche und ergibt sich aus $A = L \cdot h$. In Abbildung 2.2 ist der Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes und der Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit des Flossenwinkels dargestellt.

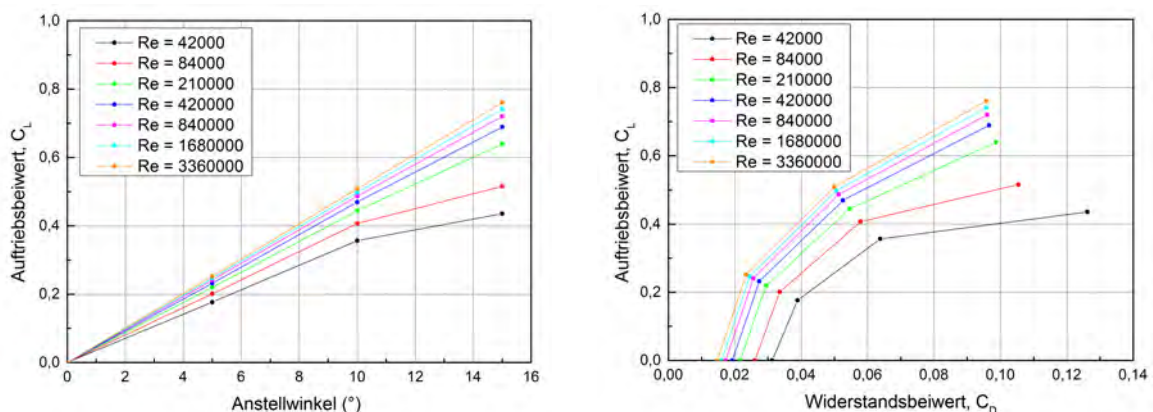


Abb. 2.2: Auftriebswerte eines Tragflügels mit geringer Streckung bei verschiedenen Reynoldszahlen als Funktion des Anstellwinkels (links) sowie aufgetragen über dem Widerstandsbeiwert (rechts).

Aus diesen Polardiagrammen lässt sich erkennen, dass Maßstabseffekte verstärkt unterhalb von ca. $Re = 2 \cdot 10^5$ auftreten. Im Rahmen der gegebenen Randbedingungen sollte daher das Modell für den Versuch so groß wie möglich gewählt werden. Die Geschwindigkeit des Modells kann nur sehr eingeschränkt zur Steigerung der Reynoldszahl herangezogen werden. Dies ist zum einen in den Flachwassereffekten begründet und zum anderen darin, dass die Geschwindigkeit für die PIV-Messungen moderat gewählt sein sollte. Anderenfalls ist die zur Mittelung erforderliche hohe Zahl der Wiederholungsfahrten in gegebenem Zeitrahmen nicht erreichbar. Die konkrete Wahl des Maßstabs lässt sich nun mit Bezug auf die im Versuch erreichbaren Reynoldszahlen treffen. Betrachtet man hierzu die Reynoldszahlen für zwei exemplarische Geschwindigkeiten von 12 und 14 km/h (bei Froude'scher Ähnlichkeit) in Abhängigkeit vom Maßstabsfaktor (Abbildung 2.3), erkennt man die Abnahme mit steigendem Maßstab. Die rote horizontale Linie markiert den Fall aus der oben aufgeführten Parameterstudie von $Re = 84000$. Der am DST für Binnenschiffe übliche Maßstab von 1:16 würde zu deutlich kleineren Reynoldszahlen und damit zu ausgeprägten Maßstabseffekten führen. Es wurde daher für die Modellversuche der Maßstab 1:10 gewählt, dies stellt einen Kompromiss zwischen den im Versuch realisierbaren Bedingungen und der Minimierung von Maßstabseffekten dar.

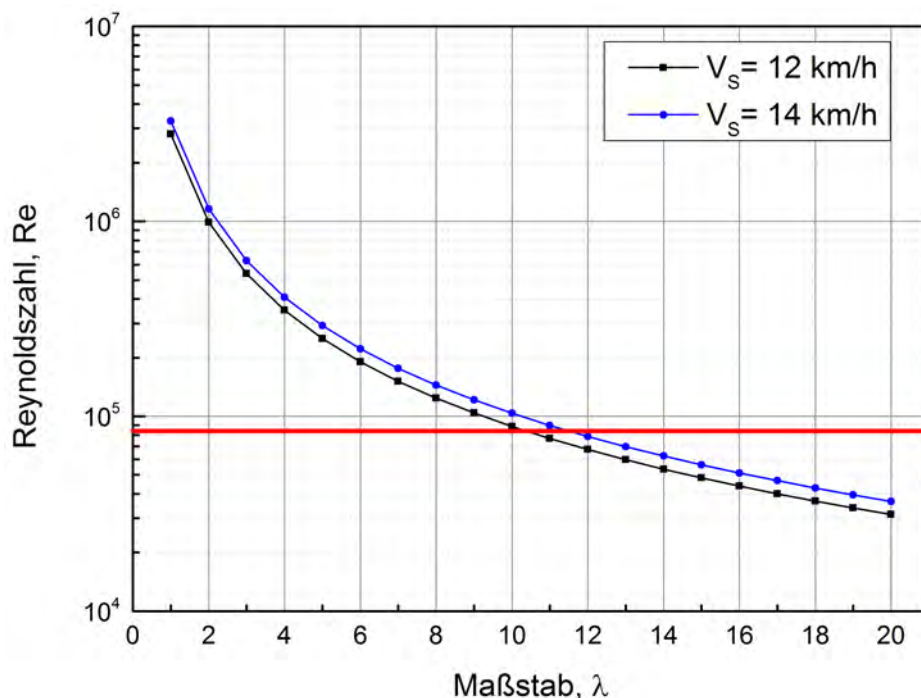


Abb. 2.3: Abhängigkeit der Reynoldszahl vom Maßstab für zwei typische Geschwindigkeiten in der Großausführung. Die Seilenlänge des Profils in Großausführung beträgt $L_{GA} = 0,75$ m.

Der Einfluss der Maßstabseffekte wird zudem dadurch gemindert, dass sich die Zustromverbessernden Anhänge am Hinterschiff befinden, wo die Zuströmung durch die Umströ-

mung des Rumpfes bereits eine gewisse Turbulenz aufweist. Durch die geeignete Wahl des Maßstabes sind daher keine weiteren Korrekturen für Maßstabseffekte notwendig.

Die Maßstabseffekte lassen sich nicht nur an der Flosse bestimmen, sondern auch für das gesamte Modell. Hierzu vergleiche man CFD-Simulationen der Nachstromverteilung für die Großausführung und das Modell mit dem Maßstab $\lambda = 10$. Dieser Vergleich ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

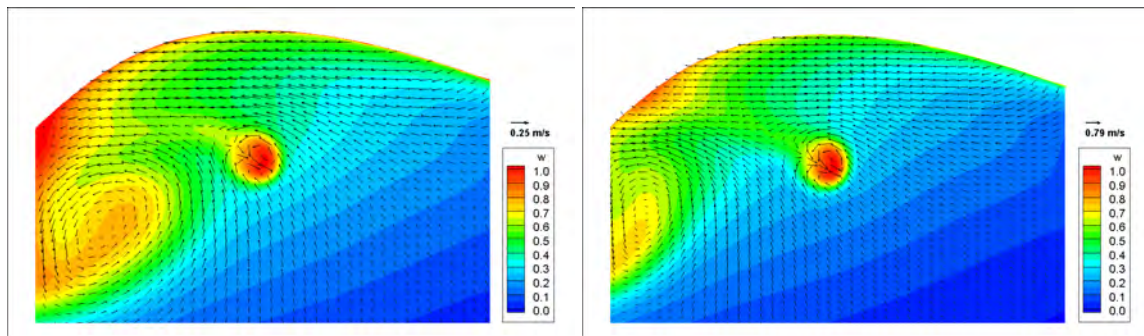


Abb. 2.4: Maßstabseffekte im Nachstrom bei CFD-Simulation für ein Modell mit Maßstab $\lambda = 10$ (links) und die Großausführung (rechts).

2.3 Verwendete Modelle

Die Untersuchungen von Nachstromfeldern mit experimentellen und numerischen Methoden sollten einerseits an einem Hinterschiff erfolgen, das repräsentativ für die große Bandbreite an Rumpfformen der Flotte ist. Andererseits sollte der Propellerzustrom nicht zu stark von der Rumpfform vorherbestimmt sein, was eine positive Beeinflussung erschwert hätte. Zudem erfordern die geplanten PIV-Messungen bei verschiedenen Wassertiefen einen optischen Zugang für zwei Kameras und den Lichtschnitt aus verschiedenen Winkeln. Bei Seeschiffen mit einem einzelnen Propeller ist bekannt, dass aufgrund des Dralls eine unterschiedliche Behandlung zwischen der Backbord- und der Steuerbordseite erfolgen sollte. Die so genannten Pre-Swirl-Statoren werden bei rechtsdrehenden Propellern meist nur an der Backbordseite angeordnet, da der erforderliche Anstellwinkel einer Flosse zur Erzeugung des gewünschten Vordralls auf der Steuerbordseite zu einem erhöhten Widerstandsbeitrag führen würde. Daher fiel die Wahl in diesem Projekt auf Zweischrauber-Binnenschiffe.

Im Rahmen des EU-Projekts Streamline (FP7-233896) wurden am DST bereits verschiedene Hinterschiffe entworfen. Diese dienten als Referenz zu einem neuartigen Distributed-Thrust Konzept, bei dem der Schub auf sechs Ruderpropeller aufgeteilt wurde. Das erste Modell (M1926, Abbildung 2.5 (links)) besitzt ein modernes Hinterschiff mit ausgeprägten Tunneln. Das zweite Modell (M1927, Abbildung 2.5 (rechts)) besitzt eine Geometrie ohne

Tunnel, wie man sie heute aufgrund der Gefahr von Lufteinbruch im Ballastfall oder beim Stoppmanöver und entsprechendem Schubeinbruch nur für Fahrzeuge mit weitgehend konstantem Tiefgang bauen würde. Solche Schiffe besitzen jedoch einen günstigen Widerstand und bieten im Kontext des hier dokumentierten Projekts eine besonders gute Beeinflussbarkeit des Zustroms sowie einen erleichterten optischen Zugang für das PIV-System. In Großausführung sind die Schiffe 110 m lang und 11,40 m breit. Die Modelle wurden, wie im Abschnitt 2.2 auf Seite 15 begründet, im Maßstab $\lambda = 10$ angefertigt. Die Verdrängung der Modelle beträgt 2,717 t und der Tiefgang 0,25 m.

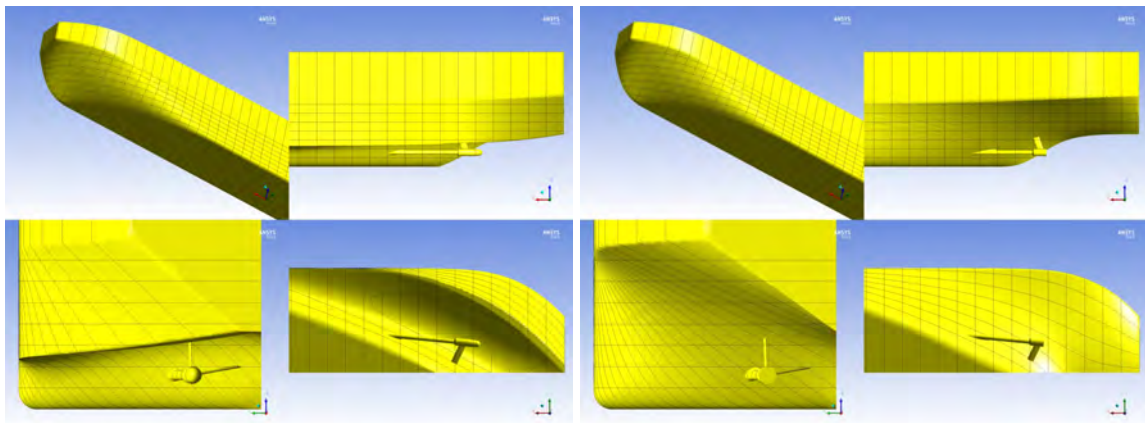


Abb. 2.5: CAD-Darstellung der Schiffsgeometrien. M1926 mit getunneltem Hinterschiff (links) sowie M1927 mit ungetunneltem Hinterschiff für Zweischauber (rechts).

2.4 Propeller

Bei dem verwendeten Propeller handelt es sich um den Typ P258. Die relevanten Kenngrößen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tab. 2.1: Propellereigenschaften

Propellertyp	Wageninger B Serie
Propellerdurchmesser	180 mm
Steigung	147,42 mm
P/D	0,819
Flächenverhältnis	0,550
Nabendurchmesser	35 mm
Nabenverhältnis	0,194
Flügelzahl	4
Neigung der Erzeugenden	12,5°
Blattprofillänge auf 0,7R	53,08 mm

2.5 PIV-Messungen

Während in den meisten anderen Versuchsanstalten das PIV-System in einem wasserdichten Gehäuse neben dem Modell vom Schleppwagen mitgeführt wird, ist dies bei den üblichen Flachwasserbedingungen im DST nicht möglich. Dies liegt einerseits am optischen Zugang und andererseits an der im begrenzten Fahrwasser verstärkten hydrodynamischen Interaktion mit der Umströmung des Modells. Der große Flachwassertank des DST besitzt einen Beobachtungstunnel mit 60 mm dicken Acrylglasscheiben unter der Fahrspur der Modelle. In diesem kann ein stationärer Stereo PIV-Aufbau untergebracht werden. Prinzipiell können Lichtschnitt und Kameras recht flexibel zueinander angeordnet werden. Hierbei können die Kameras entweder auf derselben oder verschiedenen Seiten des Lichtschnitts angeordnet werden. Wichtig sind hier die unterschiedlichen, nicht rechtwinklig zum Lichtschnitt stehenden Blickachsen für die Ausnutzung des Stereoeffekts. In der Praxis sind aufgrund des optischen Zugangs und der Brechung des Lichts beim Übergang zwischen optisch unterschiedlich dichten Medien nur wenige Anordnungen möglich.

Um mit einem einzigen Aufbau sowohl den Zustrom vor dem laufenden Propeller als auch den nominellen Nachstrom messen zu können, wurde zunächst ein unsymmetrischer Aufbau installiert. Hierbei sitzen beide Kameras auf der gleichen Seite des quer zur Fahrtrichtung aufgespannten Lichtschnitts. Der Aufbau ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt.

Für die Messung des effektiven Zustroms wurde das Modell entgegen der Blickrichtung der Kameras geschleppt. Die optische Versperrung durch Stevenrohre und Wellenböcke wurde hierbei in Kauf genommen. Um bei der Messung des nominellen Nachstroms jedoch freien Blick auf die Propellerebene zu haben, wurde das Modell für diese Messungen am Schleppwagen um 180° gedreht und so geschleppt, dass die Kameras von hinten auf den Lichtschnitt blicken. Abbildung 2.7 zeigt ein Foto des entsprechenden Aufbaus.

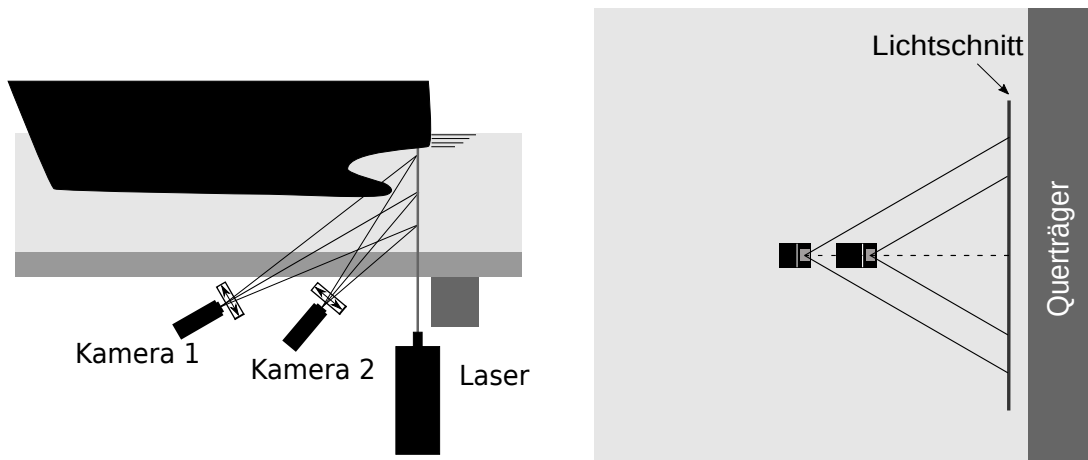


Abb. 2.6: Asymmetrischer Aufbau des PIV-Systems im Fototunnel des großen Flachwassertanks unter der Fahrspur der Modelle. Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts).



Abb. 2.7: Asymmetrischer Aufbau des PIV-Systems. Beide Kameras befinden sich hinter dem Lichtschnitt. Während die Scheimpflug-Bedingung bei der rechten Kamera nicht erfüllt werden kann, so dass eine optimale Fokussierung nicht möglich ist, leidet das Bild der linken Kamera unter einer erheblichen Stauchung.

Im Versuch zeigte sich jedoch, dass die optische Verzerrung durch den Strahlengang im relativ spitzen Winkel durch Luft, Acrylglas und Wasser ungünstiger ausfiel als in Vorversuchen mit einem Tankbehälter mit dünnerem Acrylglas. Besonders beim nominellen Nachstrom erforderte die Validierung der numerischen Methoden eine höhere Qualität der

PIV-Messungen. Bemühungen zur Reduktion des spitzen Winkels beim Eintritt in das optisch dichtere Medium mit wassergefüllten Prismen aus Acrylglas scheiterten an Luftblasen in der horizontalen Grenzfläche zwischen Prisma und Scheibe des Beobachtungstunnels.

Für die zweite Messkampagne wurde daher mit Fokus auf die präzise Messung des nominalen Nachstroms ein alternativer Versuchsaufbau installiert. Hierbei sitzen beide Kameras symmetrisch auf einer Seite des Lichtschnitts und blicken lotrecht durch die Acrylglasscheibe. Darüber sind neben der Fahrspur des Modells Oberflächenspiegel im Wasser installiert, welche die Blickachse der Kameras zum Lichtschnitt umlenken. Der Aufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

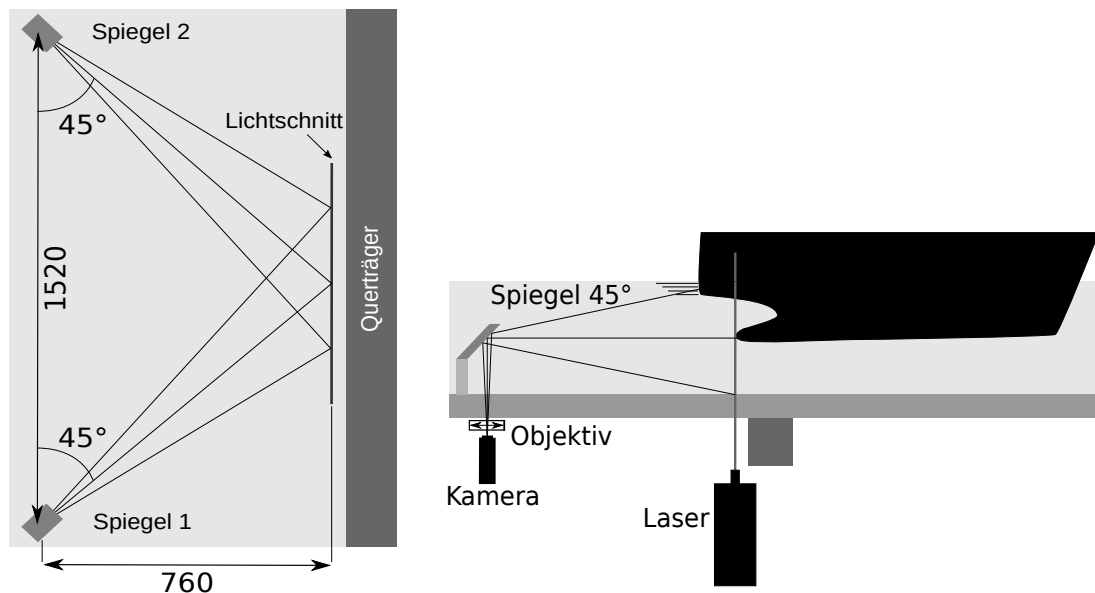


Abb. 2.8: Symmetrischer Aufbau des PIV-Systems mit Spiegeln im Tank neben der Fahrspur der Modelle. Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts).

Während der Messungen zeigte sich eine erhebliche Instationarität der Strömungen im Bereich des Propellers. Hier kommt es zu ausgeprägten Wirbelstrukturen in verschiedenen Längenskalen, die in RANSE-Simulationen analog zu einer zeitlichen Mittelung abgebildet werden. Da die Modelle den stationären PIV-Aufbau passieren, ist eine zeitliche Mittelung aus einer einzelnen Messfahrt nicht möglich. So musste jede Konfiguration rund ein Dutzend mal gemessen werden, um die jeweiligen Vektorfelder mitteln zu können. Aufgrund der verhältnismäßig hohen zeitlichen Auflösung des 100 Hz PIV-Systems konnte zudem eine räumliche Mittelung von zwei bis drei Vektorfeldern je Messfahrt genutzt werden. Somit kann jeder Strömungszustand als Durchschnitt von rund dreißig Vektorfeldern abgebildet werden. Bei laufendem Propeller tritt eine zusätzliche Schwankung der Strömung mit Blattfrequenz auf. Dieser Effekt erfordert ebenfalls eine Mittelung, da die PIV-Messung mit der

verwendeten Versuchstechnik nur entweder mit dem Propellerwinkel oder alternativ, wie hier verwendet, mit der Modellposition synchronisiert werden kann.

Für gewöhnlich sind lange Wartezeiten zwischen den einzelnen Versuchsfahrten nötig, damit die erzeugten Wellen und Strömungen abklingen können und die nächste Fahrt nicht beeinflussen. Bei den PIV-Messungen ist man allerdings davon abhängig, eine ausreichend hohe Dichte an Partikeln im Messvolumen zu haben. Während zu langer Wartezeiten sinken die Partikel auf den Boden und minimieren damit die Dichte im Messvolumen, zusätzlich beeinträchtigen die auf der Scheibe liegenden Partikel den Laser und die Sicht der Kameras. Daher sind lange Wartezeiten für die PIV-Messungen inakzeptabel. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Versuche mit einem gefesselten Modell durchgeführt, so konnte der Einfluss von Wellen aus vorheriger Fahrt unterdrückt werden und die Fahrten zügig hintereinander durchgeführt werden.

Trotz der mäßigen Qualität der Rohbilder aufgrund der starken optischen Verzerrung bei einer der beiden Kameras konnten exemplarische Vektorfelder im Propellerzustrom an dem ungetunnelten Modell (M1927) ausgewertet werden. Bei einem h/T -Verhältnis von 2 wurden Modellgeschwindigkeiten von 1,054 m/s und 1,230 m/s entsprechend 12 und 14 km/h in der Großausführung gefahren. Es wurde jeweils über drei aufeinanderfolgende Bilder vor dem Propeller gemittelt, dies entspricht einer räumlichen Mittelung über 24,60 mm bzw. 21,08 mm (für $V_M = 1,230$ m/s bzw. $V_M = 1,054$ m/s) und einer zeitlichen Mittelung über 20 ms. Die Phasenlage des Propellers ändert sich in diesem Zeitraum um 72° bzw. 66° (für $V_M = 1,230$ m/s bzw. $V_M = 1,054$ m/s). Des Weiteren wurde über mehrere Fahrten gemittelt, die Phasenlage des Propellers ist dabei unbestimmt.

Abbildung 2.9 zeigt die effektive Nachstromverteilung bei den zwei genannten Geschwindigkeiten aber der gleichen Wassertiefe. Der Einfluss der Geschwindigkeit auf den effektiven Nachstrom ist erwartungsgemäß gering. Es lassen sich nur leichte Unterschiede in der Ausprägung des Gebiets zwischen Rumpf und Propeller erkennen.

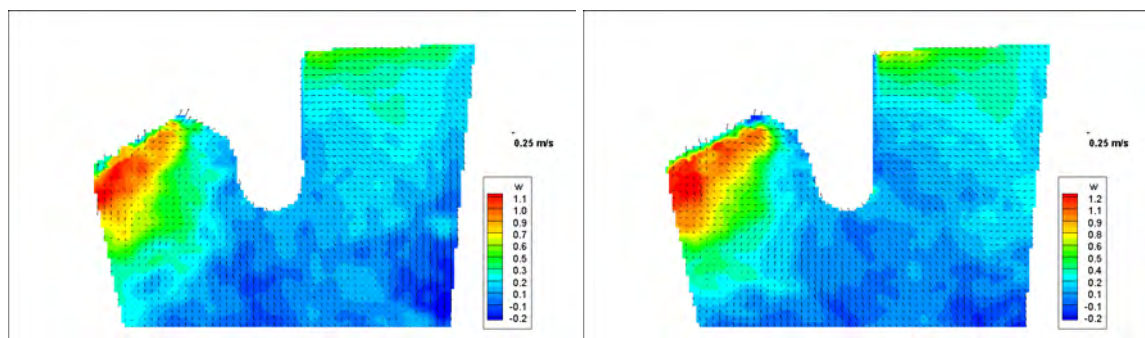


Abb. 2.9: Effektiver Nachstrom für das Modell M1927 ohne Flosse bei einem h/T -Verhältnis von 2 und unterschiedlichen Geschwindigkeiten (links 1,054 m/s, rechts 1,230 m/s).

Die Messungen des nominellen Nachstroms mit dem zweiten PIV-Aufbau wurden am getunnelten Hinterschiff (M1926) durchgeführt. Hierzu wurden zwei Fahrtzustände mit verschiedenen Wassertiefen und dazugehörigen Geschwindigkeiten gewählt. Die erste Messung wurde für eine Geschwindigkeit von 1,230 m/s, entsprechend 14 km/h, und ein h/T -Verhältnis von 2 (5,0 m in der Großausführung) ohne Flosse durchgeführt. Der zweite Fahrtzustand entsprach einer Geschwindigkeit von 1,054 m/s, entsprechend 12 km/h, und einem h/T -Verhältnis von 1,4 (d.h. 3,5 m in der Großausführung) ohne Flosse. Die Bedingungen wurden so gewählt, dass sie ähnlichen Tiefen-Froudezahlen entsprechen (0,555 bzw. 0,569). Die Messreihen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Für jede Messung wurden je zwei Vektorbilder in der Propellerebene gemittelt, was einer räumlichen Mittelung über 12,30 mm bzw. 10,54 mm (für $V_M = 1,230$ m/s bzw. $V_M = 1,054$ m/s) und einer zeitlichen Mittelung von 10 ms entspricht. Pro Messbedingung wurden bis zu zwölf Fahrten durchgeführt, über die wiederum gemittelt wurde.

Tab. 2.2: Übersicht der durchgeführten Messreihen zur Bestimmung des nominellen Nachstroms ohne Flosse

Modell-Nr.	V_M [m/s]	Winkel der Flosse	h/T
M1926	1,230	ohne	2
M1926	1,054	ohne	1,4

Die Nachstromverteilung der beiden Betriebspunkte ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Der nominelle Nachstrom unterscheidet sich trotz ähnlicher Tiefen-Froudezahlen stark voneinander. Für den Fall reduzierter Wassertiefe ist die Anströmgeschwindigkeit besonders im wandnahen Bereich deutlich geringer. Die geringere Anströmung reicht bis zur Propellernabe und ist damit flächenmäßig deutlich ausgeprägter als bei größerer Wassertiefe. Die Geschwindigkeit unterhalb der Propellernabe ist bei der geringen Wassertiefe deutlich reduziert, hier lässt sich bereits ein Einfluss des Gewässerbodens erkennen.

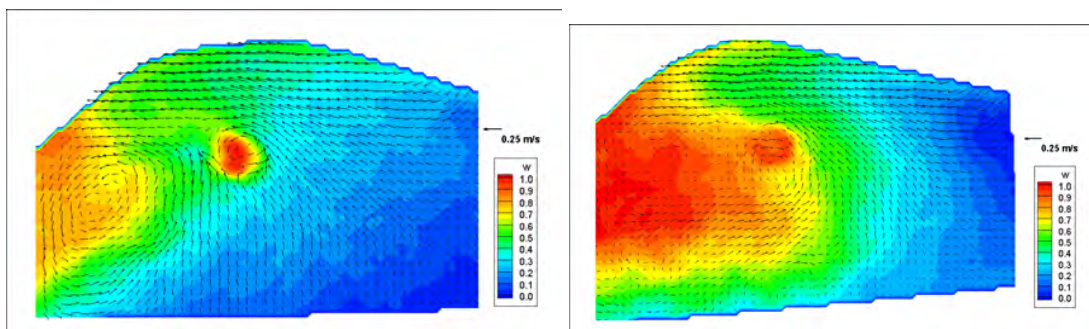


Abb. 2.10: Nachstromverteilung des nominellen Nachstroms für das Modell M1926 ohne Flosse für zwei verschiedene Wassertiefen (links: $h=5,0$ m, $V_M = 1,230$ m/s und $h/T = 2$, rechts: $h=3,5$ m, $V_M = 1,054$ m/s und $h/T = 1,4$).

3 CFD-Modellierung und -Validierung

3.1 Einleitung

Trotz der rasanten Entwicklung sowohl der Rechenleistung von Hochleistungscomputern als auch bei den numerischen Verfahren zur Strömungssimulation bestehen auch heute noch erhebliche Unsicherheiten bezüglich der besten Modellierung konkreter Strömungsphänomene. Daher wurden in dem hier dargestellten Vorhaben PIV-Messungen am Modell im Schlepptank durchgeführt. Die so ermittelten Geschwindigkeitsfelder wurden verwendet, um die passenden Simulationsparameter und Methoden auszuwählen. Im Anschluss an die Validierung wurde der Ansatz, der die turbulenten Erscheinungen am besten abbildet, im Optimierungsprozess der adaptiven Zustromeinrichtungen eingesetzt.

Die Validierung der CFD-Rechnungen erfolgte in 3 Schritten: In einem ersten Schritt wurden für 2 unterschiedliche Schiffsformen die nominellen Nachstromfelder für eine Wassertiefe und je 2 Tiefgänge ermittelt. Die berechnete Schiffsumströmung wurde in unterschiedlichen Spantebenen und Längsebenen mit Ergebnissen aus den PIV-Messungen verglichen. Nach erfolgreicher Validierung der CFD-Methoden für diesen Teilschritt, wurden im 2. Entwicklungsschritt die effektiven Nachstromfelder berechnet und verglichen. Diese Berechnungen wurden mit einem sich drehenden Propeller in voller geometrischer Auflösung durchgeführt. Der numerische Aufwand (sehr lange Rechenzeit) für die instationären Berechnungen mit Propellergeometrie ist erheblich. Aus diesem Grund wurden die Berechnungen für beide Schiffe jedoch bei nur einer Wassertiefe durchgeführt.

Weitere Simulationen wurden mit einem Kraftscheibenmodell, welches die Wirkung des Propellers für die Zustromoptimierung hinreichend modelliert, durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Anpassungen des Modells für die bestmögliche Nachbildung der inhomogenen Zuströmung vorgenommen. Diese Untersuchungen wurden mit einem Schiff bei einer Wassertiefe durchgeführt mit dem Ziel, bei erfolgreicher Validierung die aufwendigen instationären Propellerberechnungen für die Optimierungsphase zu ersetzen.

3.1.1 Gittergenerierung zur Validierung

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes lag ein Schwerpunkt auf einer hohen Effizienz bei der Gittergenerierung. Das heißt, dass für ein Schiff ein Gitter so generiert wird, dass es für

unterschiedliche Wassertiefen, mit/ohne „echten“ Propeller, mit/ohne Propellermodell und unterschiedliche Tiefgänge eingesetzt werden kann. Dadurch erhöht sich zwar der Aufwand für die Erstellung des Grundrechengitters. Aber alle weiteren Gitter sind mit einem Bruchteil des Aufwandes erstellt. Dadurch ergeben sich für die Vielzahl der durchzuführenden Berechnungen folgende Grundgitter:

<i>A</i>	Grundgitter für Schiff A
<i>B</i>	Grundgitter für Schiff B
<i>C</i>	Gitter für „echten“ Propeller
<i>D</i>	Gitter für Propellermodell

Alle Berechnungsgitter ergeben sich aus Kombinationen und Anpassungen der Grundgitter. Diese Art der Gittergenerierung reduziert den Aufwand für die Diskretisierung der Berechnungsgitter erheblich.

Die Erzeugung der notwendigen blockstrukturierten bzw. unstrukturierten Volumengitter und deren Kombination (Hybridgitter) wurde mit den Programmpaketen ANSYS-ICEM-CFD realisiert. Für das angewandte Finite-Volumen-Verfahren muss das Berechnungsgebiet in endlich viele Volumenelemente aufgeteilt werden. Die Aufteilung in Volumenelemente kann unstrukturiert mit Tetraederelementen oder blockstrukturiert mit Hexaedern umgesetzt werden. Bezüglich der Rechenzeit liegen die Vorteile bei blockstrukturierten Gittern, deren Erstellung für komplexe Geometrien jedoch deutlich aufwendiger als bei unstrukturierten Gittern ist. Aus diesem Grund wurde für die hier durchgeführten Berechnungen eine Gitterstruktur gewählt, die sich aus einer definierten Anzahl von Teilgittern zusammensetzt. Geometrisch komplexe Teilbereiche wurden mit Tetraedern und Prismenelementen gefüllt. Weniger komplexe Bereiche, wie das Fernfeld und das Vorschiff, wurden mit Hexaedern erzeugt (Abbildung 3.1). Um den Aufwand bei der Gittergenerierung für die unterschiedlichen Betriebszustände mit geometrischen Abhängigkeiten (Wassertiefe, Propellermodelle) zu minimieren, wurden die Teilgitter so gewählt, dass bei einer Veränderung des Betriebszustandes nur das durch diese Veränderung beeinflusste Teilgitter neu erzeugt werden muss. Durch dieses Verfahren konnte die Effizienz des Preprocessings gesteigert werden.

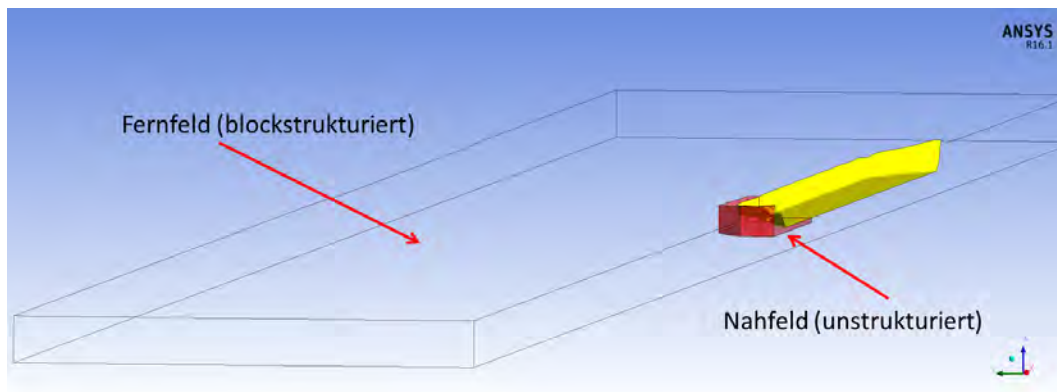


Abb. 3.1: Aufteilung des Lösungsgitters in Nah- und Fernfeld

Die Verfeinerungen im Lösungsgebiet wurden so gewählt, dass Bereiche in denen mit hohen Gradienten der Feldgrößen in der Strömung zu rechnen ist. Die notwendige räumliche Auflösung wurde jedoch durch die Zellenanzahl dahingehend variiert, dass diese Gradienten erfasst werden. Dies betrifft insbesondere die Bereiche im Zustrom zum Propeller.

Die Wirkung des Propellers wird mit unterschiedlichen Verfahren realisiert, die in Kapitel 1.3 näher beschrieben werden. Für alle drei hier angewandten Verfahren wurden jeweils Teilgitter erzeugt, die in das Nahfeldgitter implementiert werden können. Die Abbildung 3.2 zeigt das Teilgitter (rot eingefärbt) für das KSM. Bei der Realisierung der Propellerwirkung durch das „Frozen-Rotor-Verfahren“ und den real drehenden Propeller wurde der Propeller geometrisch aufgelöst (Abbildung 3.3), und ein Teilgitter, bestehend aus Tetraeder und Prismenelementen, wurde erzeugt. Die Prismenschichten dienen der Auflösung der Grenzschicht in Wandnähe (Abbildung 3.2).

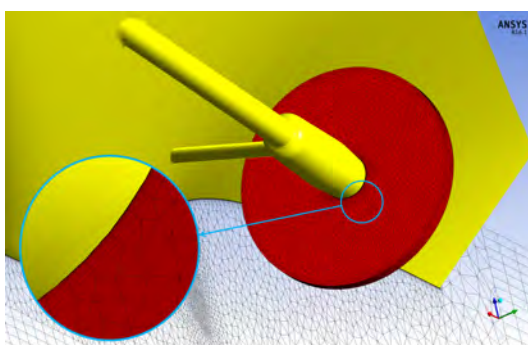


Abb. 3.2: Gitter KSM

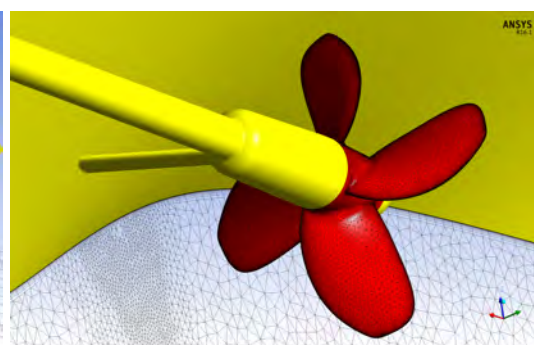


Abb. 3.3: Gitter für Propeller

3.1.2 Randbedingungen

Neben der geometrischen Beschreibung des physikalischen Problems durch randangepasste Gitter, müssen an den Grenzen des Lösungsgebietes Bedingungen vorgegeben werden, die die Physik hinreichend beschreiben. Dabei wird unterschieden zwischen Begrenzungen, die durch die physikalische Beschreibung des Betriebszustandes festgelegt werden, wie zum Beispiel die vorhandene Geometrie (Schiff, Gewässerboden) und Begrenzungen, die die Unendlichkeit reduzieren (Anfang und Ende des Lösungsgebietes). An allen Rändern müssen Bedingungen definiert werden. Das können Werte der Lösung im Definitionsbereich sein (Dirichlet-Bedingungen) oder auch Anforderungen an die Ableitungen der Werte in Normalenrichtung zum Rand (Neumann-Bedingungen). Die geometrischen Grenzen, an denen die Randbedingungen gesetzt werden, sind so anzuordnen, dass die Zellenanzahl nicht unnötig maximiert wird und es zu keinen ungewünschten Wechselwirkungen mit den frei gewählten Grenzen (Ausdehnung des Lösungsgebietes) kommt. Die Abbildung 3.4 zeigt schematisch das modellierte Lösungsgebiet mit den gewählten Randbedingungen.

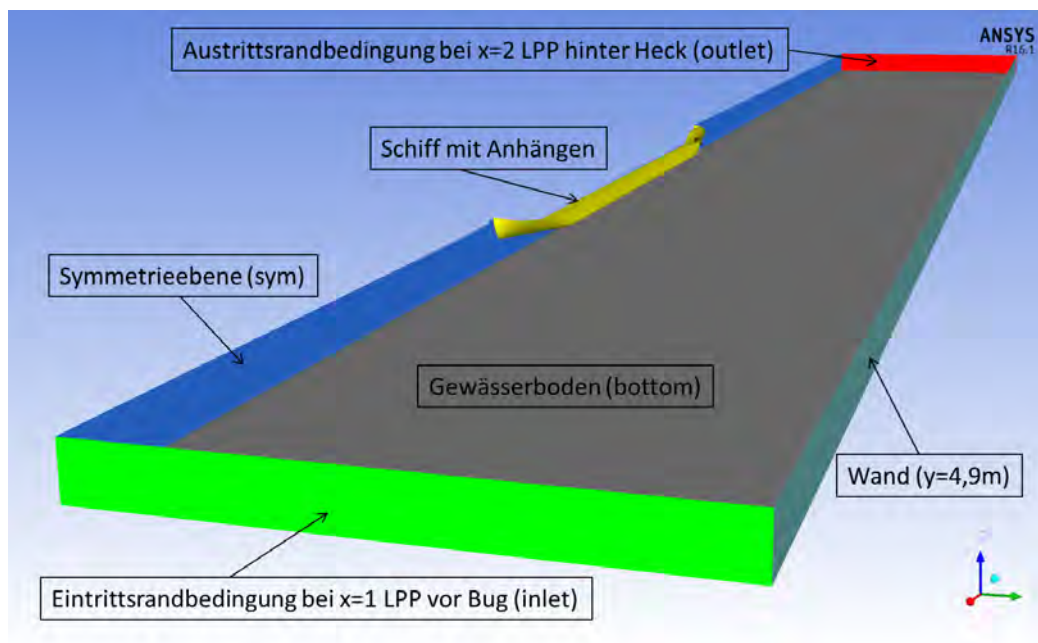


Abb. 3.4: Schematische Darstellung des Lösungsgebietes

INLET Der Einströmrand ist eine Dirichlet-Randbedingung, an dem eine homogene Anströmung vorgegeben wird, die der Schiffsgeschwindigkeit entspricht. Die Richtung der Geschwindigkeit ist normal zur Inlet-Fläche. Weitere Parameter, wie die Intensität der Turbulenz, können am Inlet definiert werden, um die Strömung im Lösungsgebiet gezielt zu beeinflussen.

OUTLET Als Ausströmrand wird die stromabwärts senkrecht zur Mittellängsachse liegende Fläche definiert. Die Änderung des Druckes wird an dieser Fläche zu Null gesetzt. Die hier verwendete OPENING-Randbedingung ermöglicht ein ungehindertes Ein- bzw. Ausströmen des Fluids. Dadurch kann die Stabilität der Rechnung verbessert werden.

Schiff, Anhänge Reibungsbehaftete Wände, an denen die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP).

WAND Die seitliche Begrenzung des Lösungsgebietes wird als reibungsbehaftete Wand definiert, an der die Haftbedingung erfüllt ist (WALL NO SLIP).

Wasseroberfläche Die Wasseroberfläche (verformt, unverformt) wird als reibungsfreie Wand definiert.

Die Ausdehnung des Rechengebietes wurde auf eine Schiffslänge vor dem Bug der Schiffe und zwei Schiffslängen hinter dem Heck festgelegt. Die Lage der seitlichen Begrenzung ergibt sich aus der Breite des Versuchskanals im DST. Unter Ausnutzung der Symmetrie der Zweischauber beträgt der Abstand zur Wand 4,9 m aus der Mittschiffsebene.

3.2 Voruntersuchungen

Binnenschiffe fahren im Gegensatz zu Seeschiffen, deren Operationsgebiet hauptsächlich im Tiefwasser ist, unter ständig wechselnden Betriebsbedingungen hinsichtlich der Gewässertiefe. Dies kann zu einer veränderten Zuströmung zum Propeller führen. Welchen Einfluss die unterschiedlichen h/T -Verhältnisse bei den in diesem Projekt untersuchten Schiffsmodellen haben, wurde durch CFD-Berechnungen ermittelt.

Im Vorfeld der Untersuchungen mit adaptiven Anhängen zur Verbesserung des Propellerzustroms wurden bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen Berechnungen zum Nachweis des Einflusses der Wassertiefe auf die Umströmung des Rumpfes durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 3.5 bis 3.9 zusammengefasst und zeigen deutlich, wie sich das Geschwindigkeitsfeld im Propellerzustrom verändert.

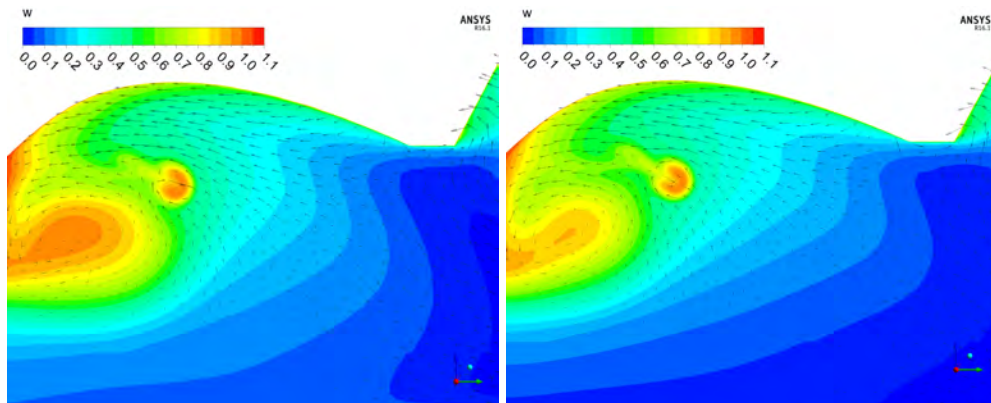


Abb. 3.5: Nachstromverteilung Modell M1926 für $h/T = 1,4$ (links) und $h/T = 1,6$ (rechts)

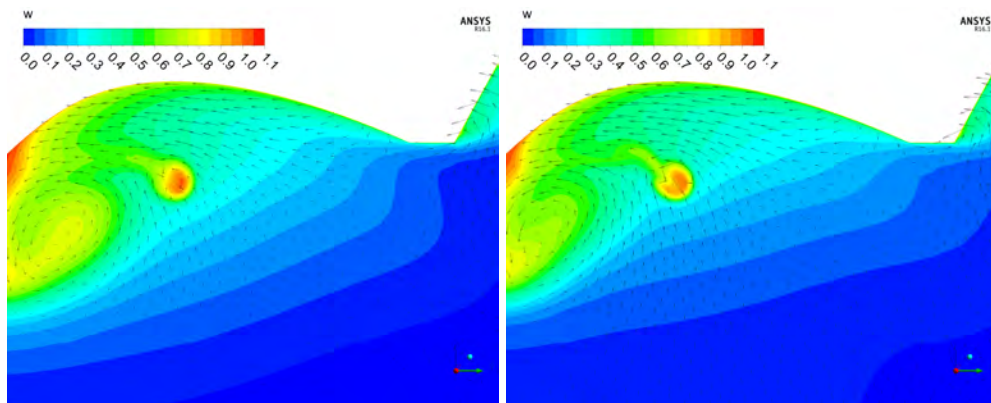


Abb. 3.6: Nachstromverteilung Modell M1926 für $h/T = 2,0$ (links) und $h/T = 4,0$ (rechts)

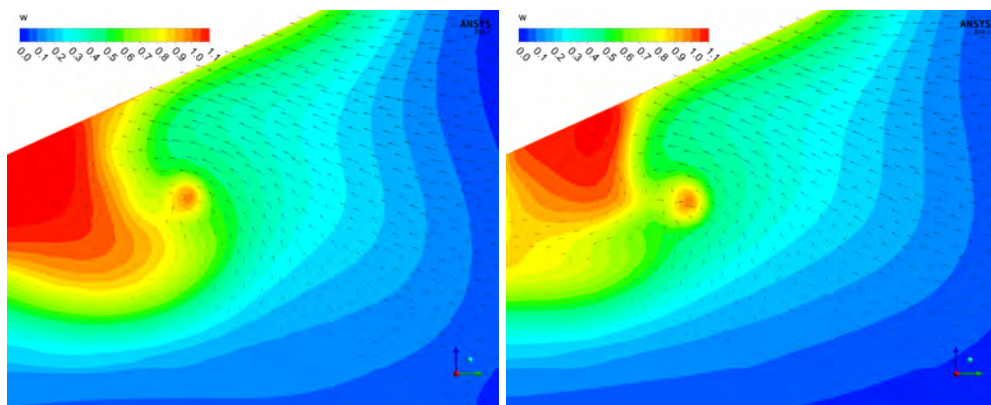


Abb. 3.7: Nachstromverteilung Modell M1927 für $h/T = 1,4$ (links) und $h/T = 1,6$ (rechts)

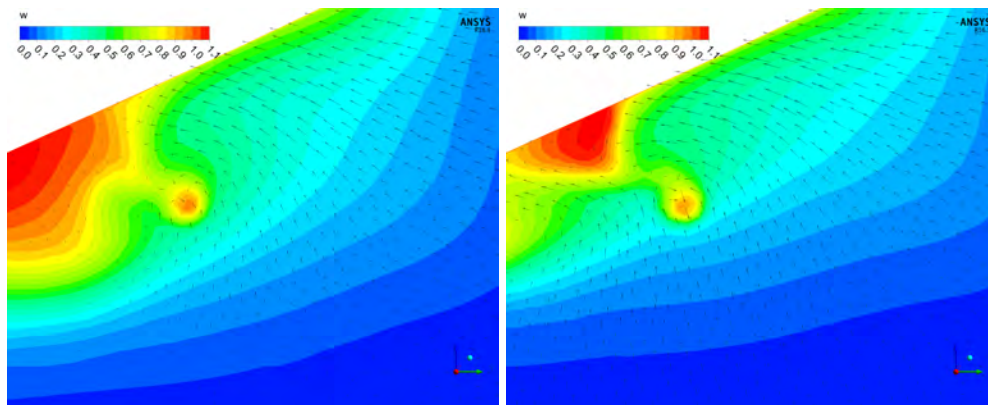


Abb. 3.8: Nachstromverteilung Modell M1927 für $h/T = 2,0$ (links) und $h/T = 4,0$ (rechts)

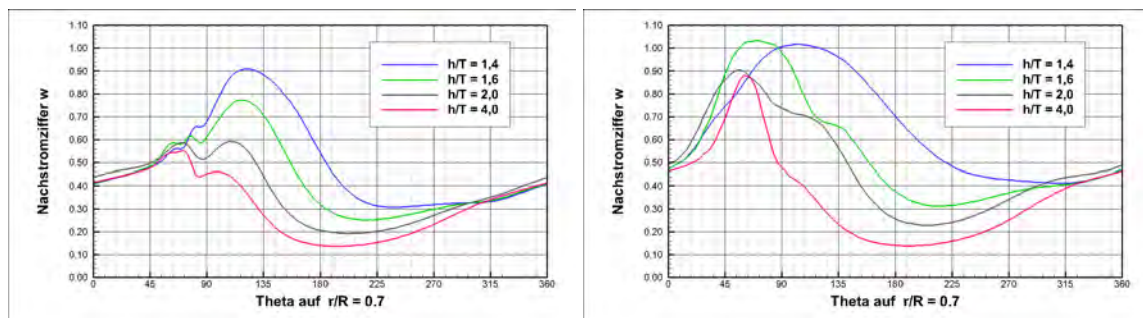


Abb. 3.9: Wassertiefenabhängigkeit Nachstromziffer auf Propellerdrehkreis $r/R = 0,7$ links: M1926 rechts: M1927

Schiffspropeller werden in der Regel für ein definiertes Nachstromfeld entworfen. Dieses Geschwindigkeitsfeld gilt nur für einen definierten Betriebszustand, für den der Antrieb hinsichtlich Effizienz und Minimierung der Druckschwankungen optimiert wird. Bei jedem anderen Betriebszustand arbeitet der Propeller nicht mehr optimal. Die Ergebnisse zeigen deutlich einen Handlungsbedarf auf, den Zustrom zum Propeller betriebspunktabhängig zu beeinflussen.

Die numerische Berechnung der Umströmung eines Schiffskörpers unter Berücksichtigung der Verformung der freien Wasseroberfläche ist sehr rechenintensiv. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch die Implementierung von adaptiven Anhängen am Hinterschiff keine signifikante Änderung des Wellenbildes hervorgerufen wird. Aus diesem Grund wurde die Verformung der freien Wasseroberfläche ohne adaptive Anhänge im Vorfeld berechnet. Diese Verfahrensweise ermöglicht eine Reduzierung der Rechenzeit um ein Vielfaches.

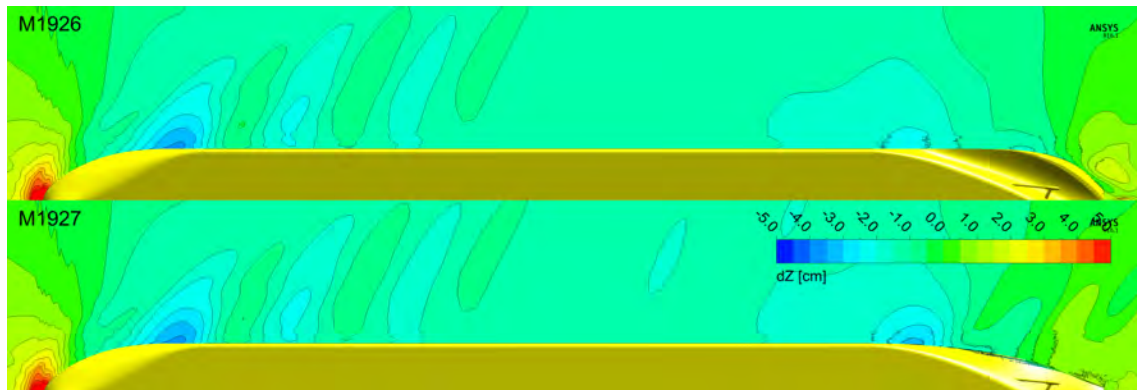


Abb. 3.10: Verformung der Wasseroberfläche

Für eine Schiffsgeschwindigkeit von $V_S = 1,23 \text{ m/s}$ sind für beide untersuchten Modelle die induzierten Wellenbilder in Abbildung 3.10 dargestellt. Da sich die Vorschiffe beider Modelle nicht unterscheiden, ist das Wellenbild bis zum Heck fast identisch. Das Wellental an der hinteren Schulter des Schiffes ist unterschiedlich ausgeprägt. Für beide Schiffsmodelle gilt aber, dass die Verformung der Oberfläche am Heck relativ gering ist. Eine Interaktion mit den adaptiven Anhängen scheint auf Grund der Positionierung im Propellerzustrom ausgeschlossen. Die berechneten Wellenbilder wurden exportiert und in die Berechnungen der Nachstromfelder als geometrische Randbedingung implementiert.

3.3 Validierung nomineller Nachstrom

In einem ersten Schritt wurden die numerischen Verfahren zur Ermittlung des Zustromes zum Propeller unter Nutzung der in Modellversuchen ermittelten nominellen Nachstromfelder validiert. Diese Nachstromfelder wurden mit der im Kapitel 5 beschriebenen PIV-Methode für zwei ausgewählte Schiffe bei unterschiedlichen Schiffsgeschwindigkeiten und Wassertiefen ermittelt.

Praxisrelevante Schiffsumströmungen im Modellmaßstab bzw. in der Großausführung sind gekennzeichnet durch hohe Reynoldszahlen, bei denen die Trägheitskräfte im Vergleich zu den viskosen Kräften dominieren.

$$Re = \frac{V_S \cdot L}{\nu} \quad (3.1)$$

Bei hohen Reynoldszahlen kann davon ausgegangen werden, dass die Strömung voll turbulent ist. Es kommt zu Schwankungen der Feldgrößen (Druck und Geschwindigkeit) in Raum und Zeit. Die Bandbreite der auftretenden Schwankungen kann sehr groß sein. Es

existieren sowohl sehr kleine als auch große Turbulenzballen, die sich zeitlich ändern. Eine vollständige Erfassung der Turbulenz erfordert eine Auflösung aller Schwankungen in Zeit und Raum in allen drei Dimensionen. Durch eine direkte Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen ist eine Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes unter Einbeziehung der Turbulenz möglich. Dies ist aber mit einem extrem hohen numerischen Aufwand verbunden und praktisch nicht möglich. Für eine Direkte Numerische Simulation (DNS) ergeben sich folgende Anforderungen beim Aufsetzen eines Berechnungsfalles:

- sehr kleine Zellen in allen drei Dimensionen im gesamten Berechnungsgebiet
- Berechnung muss transient ausgeführt werden
- sehr kleiner Zeitschritt Δt zur Erfassung hochfrequenter Schwankungen

Die hohen Anforderungen an die räumliche und zeitliche Diskretisierung sind ein Ausschlusskriterium für die in diesem Projekt durchzuführenden numerischen Untersuchungen. Zur Zeit und in naher Zukunft wird die DNS unter Anwendung der strömungsmechanischen Grundgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen und Kontinuitätsgleichung) nicht möglich sein. Weitere Details zur Anwendung der DNS in der numerischen Strömungsmechanik werden durch [6] beschrieben.

Auf Grund der nicht zu realisierenden direkten Berechnung der Turbulenz werden Verfahren eingesetzt, die die Auswirkung der Turbulenz modellieren. Eine Methode ist die Anwendung der RANS-Simulation, bei denen die mittleren Feldgrößen durch die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equation (RANSE) berechnet werden. Die turbulenten Erscheinungen werden bei diesem Verfahren durch sogenannte Turbulenzmodelle simuliert. Diese Verfahren sind weit verbreitet und werden durch die meisten CFD-Programme erfolgreich für ingenieurtechnische Aufgaben eingesetzt.

Im Rahmen dieses Projektes wurden bei den Berechnungen der Umströmung der Schiffmodelle verschiedene im Programmpaket ANSYS-CFX implementierte Turbulenzmodelle angewendet und ihre Auswirkung auf den Nachstrom des Schiffes verglichen.

Als geeignetes Modell zur Beschreibung der Wirkung der Turbulenz auf die Strömung hat sich neben dem $k-\epsilon$ -Modell [12], das von Menter [17] beschriebene $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell durchgesetzt. Das $k-\omega$ -SST-Modell kombiniert das $k-\epsilon$ - und das $k-\omega$ -Modell und wird im DST erfolgreich zur Modellierung der Schiffsumströmung eingesetzt.

Neben den beiden oben genannten Turbulenzmodellen wurden Untersuchungen mit zwei weiteren Turbulenzmodellen durchgeführt, die für drallbehaftete Strömungen geeignet erscheinen. Diese sogenannten Reynolds-Stress-Modelle basieren auf den oben genannten Zweigleichungsmodellen, wobei bei diesen Modellen die Turbulenzeigenschaften in allen Raumrichtungen berechnet werden. Dadurch ist der numerische Aufwand deutlich größer als bei den herkömmlichen Zweigleichungsmodellen. In ANSYS-CFX sind die Reynolds-Stress-Modelle BSL und SSG implementiert. Diese Modelle werden ausführlich in [1] beschrieben.

Für beide untersuchten Schiffsmodelle wurde bei zwei Wassertiefen der nominelle Nachstrom berechnet und mit den Ergebnissen aus den in Kapitel 5 beschriebenen PIV-Messungen gegenübergestellt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Turbulenzmodelle und der Einfluss der Anzahl der Volumenelemente im Lösungsgebiet auf die Berechnungsergebnisse untersucht.

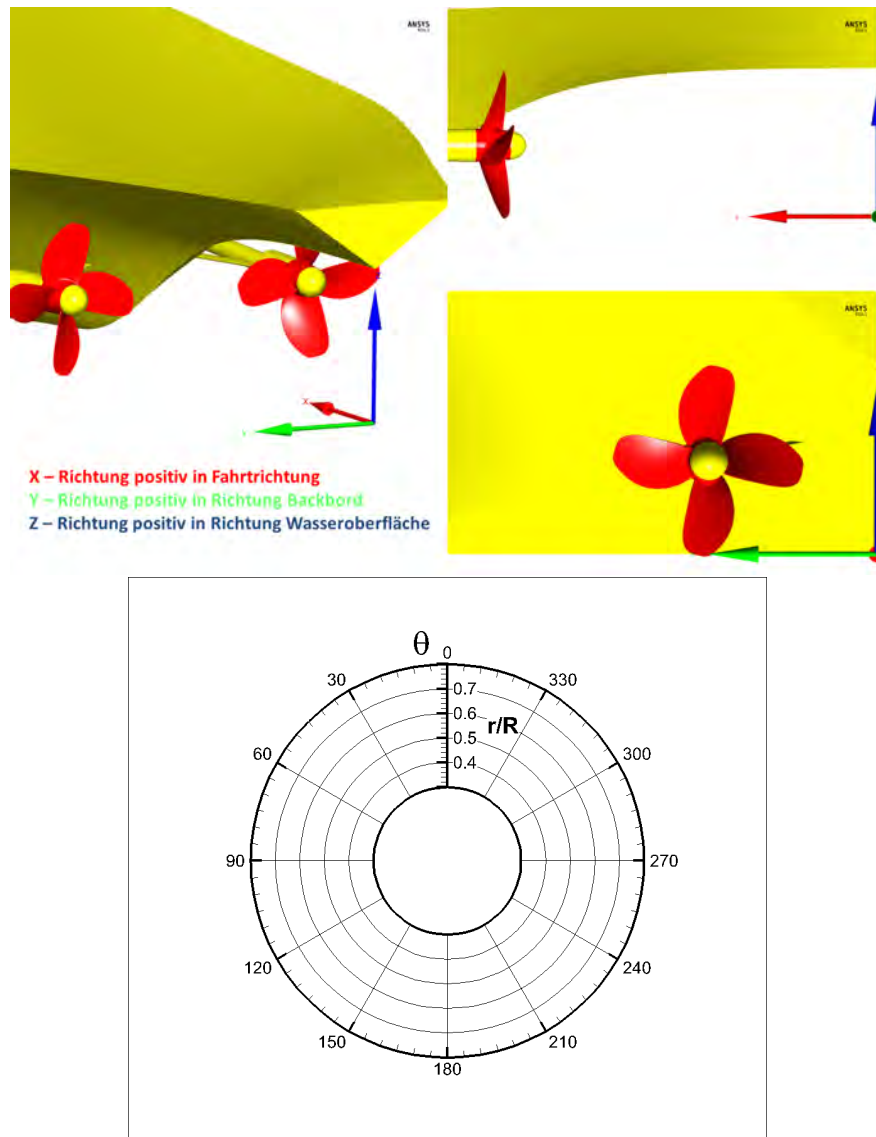


Abb. 3.11: Darstellung der Koordinatensysteme: Bezogen auf das Schiff (links) und den Radien und Winkeln in der Propellerscheibe (rechts)

Für die Visualisierung der Ergebnisse aus den CFD-Berechnungen werden die in Abbildung 3.11 dargestellten Koordinatensysteme genutzt.

In den folgenden Abbildungen werden die durch CFD-Methoden berechneten Nachstromfelder auf Basis unterschiedlicher Turbulenzmodelle den Ergebnissen aus den Modellversuchen beispielhaft für das Modell M1926 bei einer Wassertiefe von $h = 5,0$ m im Modellmaßstab $\lambda = 10$ gegenübergestellt. In einer gewählten X-Ebene (Propellerebene) wird die Nachstromziffer als Contourplot und die Richtung der Geschwindigkeit als Vektor dargestellt.

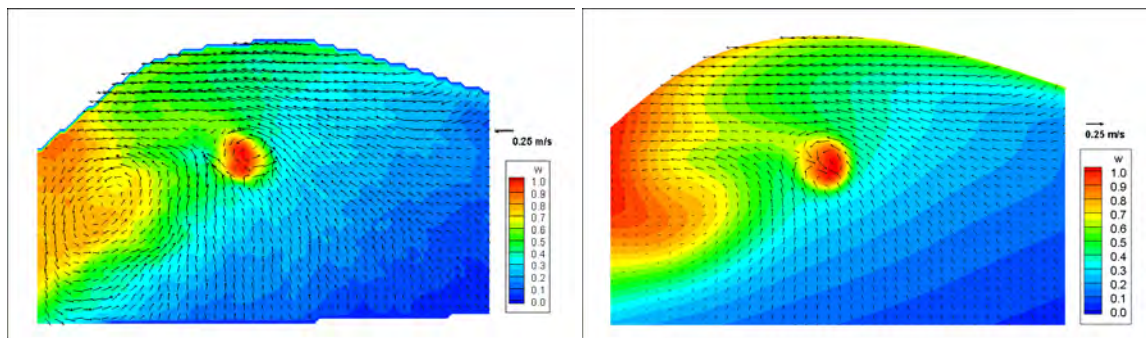


Abb. 3.12: Vergleich Nachstrom PIV (links) mit CFD $k - \epsilon$ - Turbulenzmodell (rechts)

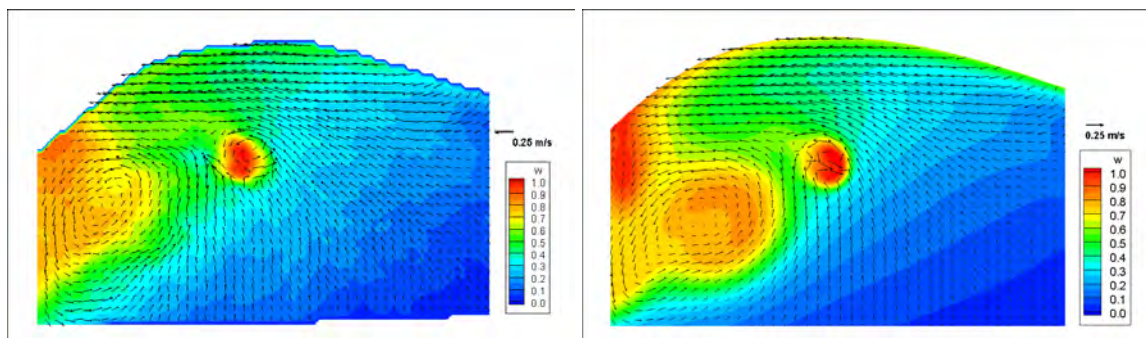


Abb. 3.13: Vergleich Nachstrom PIV (links) mit CFD RSM-SSG Turbulenzmodell (rechts)

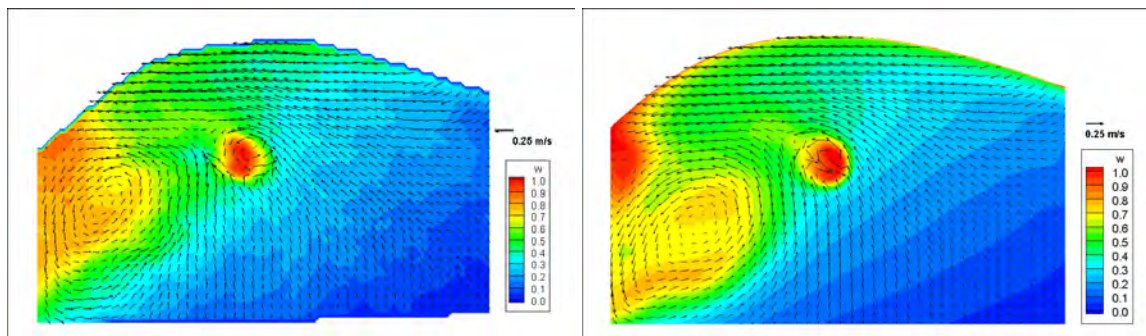


Abb. 3.14: Vergleich Nachstrom PIV (links) mit CFD RSM-BSL Turbulenzmodell (rechts)

Bei allen Turbulenzmodellen konnte das Nachstromfeld in Richtung Außenbordseite neben der Welle zufriedenstellend simuliert werden. Jedoch werden die Bereiche mit hoher Nachstromziffer neben der Welle in Richtung Mittschiff unterschiedlich wiedergegeben. Eine relativ gute Übereinstimmung mit den experimentellen Nachstromziffern konnte durch die Berechnungen mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell erzielt werden. Der visuelle Vergleich der Nachstromfelder zeigte keine Verbesserung der Simulationsergebnisse durch die Anwendung der rechenintensiven Reynolds-Stress-Modelle.

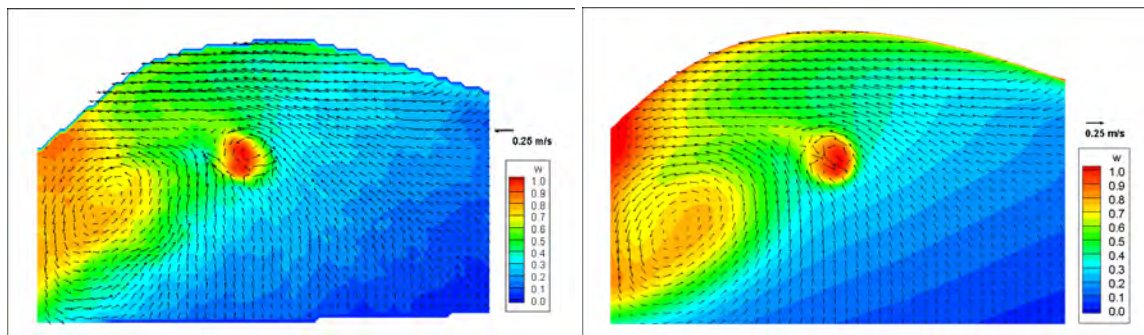


Abb. 3.15: Vergleich Nachstrom PIV (links) mit CFD SST Turbulenzmodell 5% Intensität (rechts)

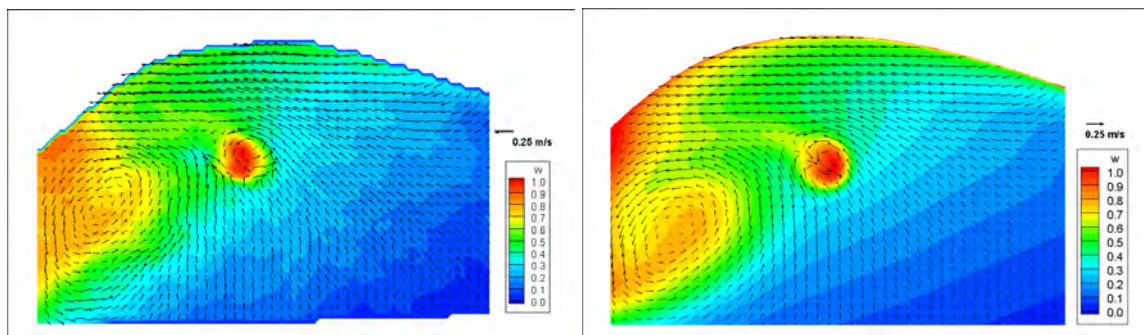


Abb. 3.16: Vergleich Nachstrom PIV (links) mit CFD SST Turbulenzmodell 10% Intensität (rechts)

Des Weiteren wurden Berechnungen mit veränderter Turbulenzintensität durchgeführt. Die Veränderung der Intensität von 5% auf 10% hatte keinen wesentlichen Einfluss auf die Nachstromverteilung.

Für den erfolgreichen Propellerentwurf wesentlich ist die Auswertung der auf ausgewählten Propellerradien dargestellten Geschwindigkeitskomponenten. Dadurch können die am Propellerblattprofil wirkenden Geschwindigkeiten identifiziert und die daraus resultierenden Kräfte am Profil berechnet werden, mit denen der Gesamtschub des Propellers bei vorgegebener Geschwindigkeit und Drehzahl ermittelt wird. Vorteil der numerischen Verfahren zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit im Propellerzustrom gegenüber Modellversuchen mit optischen Verfahren (PIV) bzw. Verfahren, die auf Drucksonden basieren

(Kugellochsonden, Nachstromrechen) ist der geringere Aufwand bei der Einrichtung und Durchführung der numerischen Versuche sowie die Vielzahl von Informationen über das Druck- und Geschwindigkeitsfeld im gesamten Lösungsgebiet. Es ist jedoch festzustellen, dass für den Entwurf eines Propellers eine möglichst exakte Bestimmung der Geschwindigkeit in der Propellerebene unabdingbar ist. Da sich die experimentellen Verfahren in der Vergangenheit bei der Ermittlung der Geschwindigkeit in der Propellerebene bewährt haben, wurden die numerisch ermittelten Nachstromfelder auf der Propellerkreisfläche mit den PIV-Ergebnissen validiert.

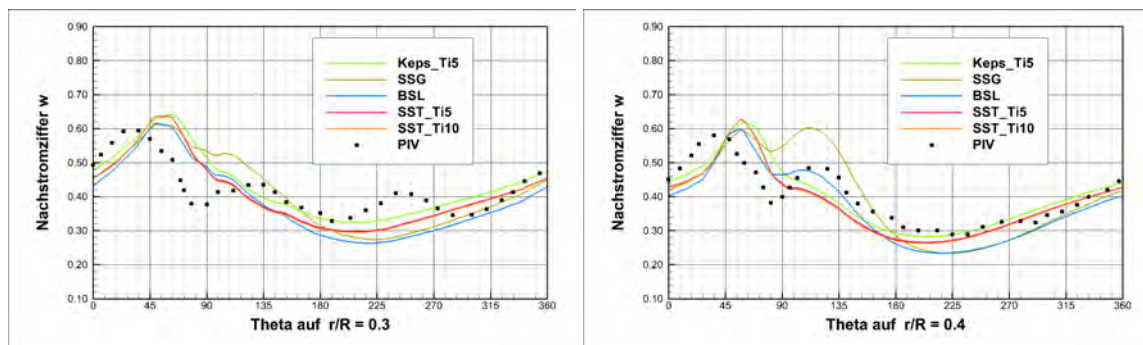


Abb. 3.17: Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf $r/R = 0,3$ (links) und $r/R = 0,4$ (rechts)

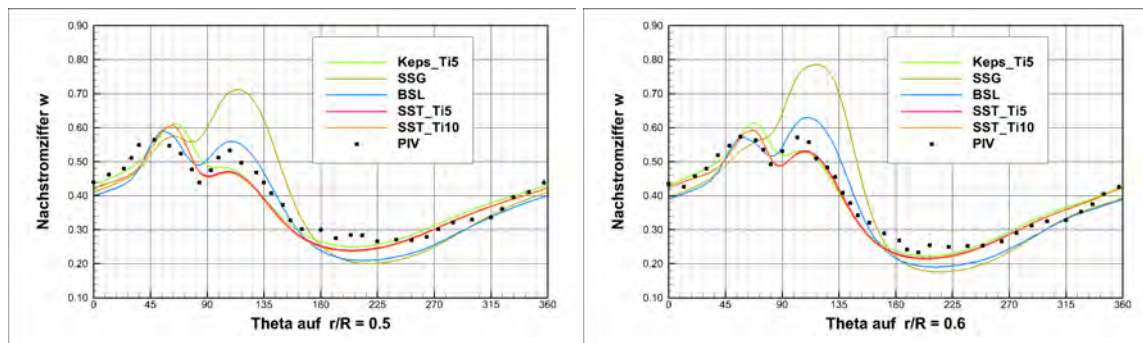


Abb. 3.18: Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf $r/R = 0,5$ (links) und $r/R = 0,6$ (rechts)

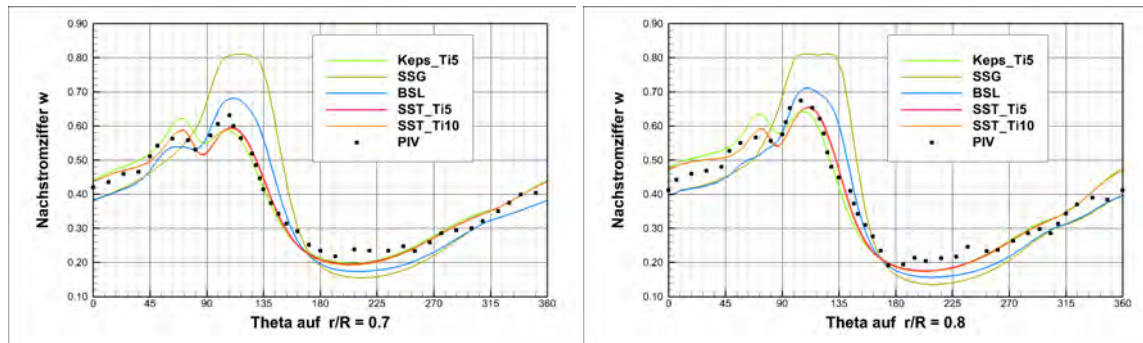


Abb. 3.19: Vergleich Turbulenzmodelle - Nachstromziffer auf $r/R = 0,7$ (links) und $r/R = 0,8$ (rechts)

In den Abbildungen 3.17 bis 3.19 werden die berechneten Nachstromziffern auf ausgewählten Propellerradien über den Propellerdrehkreiswinkel Theta quantitativ mit den Ergebnissen aus den PIV-Versuchen verglichen. Die quantitative Gegenüberstellung der Ergebnisse bestätigt die Aussage, dass die Berechnungsergebnisse mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell die beste Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen liefern. Insbesondere für den Propellerradius $r/R = 0,7$, der bei den meisten Propellern repräsentativ für die Ausbildung des Gesamtschubes ist, werden die gemessenen Ergebnisse aus den PIV-Untersuchungen recht gut wiedergegeben. In den nabennahen Bereichen $r/R = 0,3$ entspricht der Verlauf der Nachstromziffer über dem Propellerkreiswinkel nicht exakt den gemessenen PIV-Nachstromziffern. Dies kann daran liegen, dass durch die numerischen Untersuchungen nicht alle Effekte der wandnahen Umströmung erfasst werden oder dass die PIV-Messungen durch wandnahe Abschattungen fehlerbehaftet sind.

Um den Einfluss der Auflösung des Berechnungsgebietes auf die Ergebnisse auszuschließen, wurden für alle Turbulenzmodelle Volumengitter mit unterschiedlicher Verfeinerungen am Hinterschiff generiert. Bei der Nutzung zu grober Volumengitter ist es möglich, dass nicht alle Gradienten in der Strömung erfasst werden und die Realität nicht wiedergegeben wird. Eine zu feine, nicht unbedingt erforderliche Auflösung des Berechnungsgebietes kann zu einem unnötigen Anstieg der Rechenzeit führen und dadurch die Anzahl der Optimierungsvarianten erheblich reduzieren. Die Verfeinerungen im Lösungsgebiet konzentrieren sich auf die Bereiche in der Zuströmung zum Propeller. Dabei wurde die Ausdehnung der Verfeinerung variiert. Das Lösungsgitter des Fernfeldes wurde bei allen Berechnungen konstant gehalten.

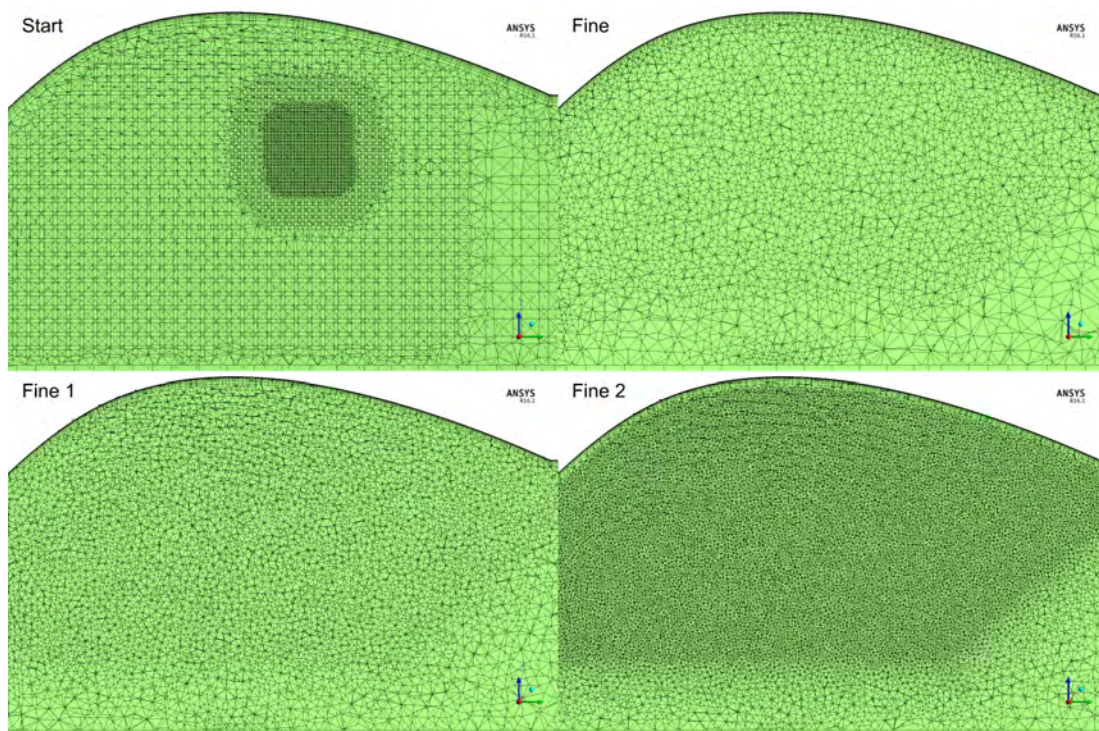


Abb. 3.20: Gittervarianten - Verfeinerungen in der Propellerebene

In der Tabelle 3.1 ist die Anzahl der Volumenelemente für die Berechnungen mit dem Modell M1926 zusammengefasst. Für unterschiedliche Tiefgänge und durch die Implementierung der adaptiven Anhänge weicht die Anzahl der Elemente von der in Tabelle 3.1 aufgeführten Anzahl der Volumenelemente geringfügig ab.

Tab. 3.1: Gittervarianten - Anzahl der Zellen im Lösungsgebiet Modell M1926

Gittervariante	Volumenelemente	Knotenanzahl
Start	10.245.099	4.096.050
Fine	9.201.902	4.265.033
Fine 1	10.324.670	4.452.598
Fine 2	20.979.801	6.240.763

Wie die Querschnitte des Berechnungsgitters in Abbildung 3.20 zeigen, ist eine Verfeinerung der Gitter nicht unbedingt verbunden mit einer Erhöhung der Gesamtzellanzahl. Dies ist bedingt dadurch, dass lokale Verfeinerungen im Zustrom zum Propeller zu Gunsten von globalen Verfeinerungen aufgelöst wurden.

Die Auswertung der Berechnungen mit den auf dem Reynolds-Stress-Modell basierenden Verfahren (BSL,SSG) zeigte, dass die Variation der Anzahl der Volumenelemente im Lösungsgebiet keine wesentlichen Verbesserungen bei der Simulation der Strömungsverhält-

nisse am Hinterschiff brachte (Abbildung 3.21), die den erhöhten Rechenaufwand bei der Anwendung dieser Verfahren rechtfertigen.

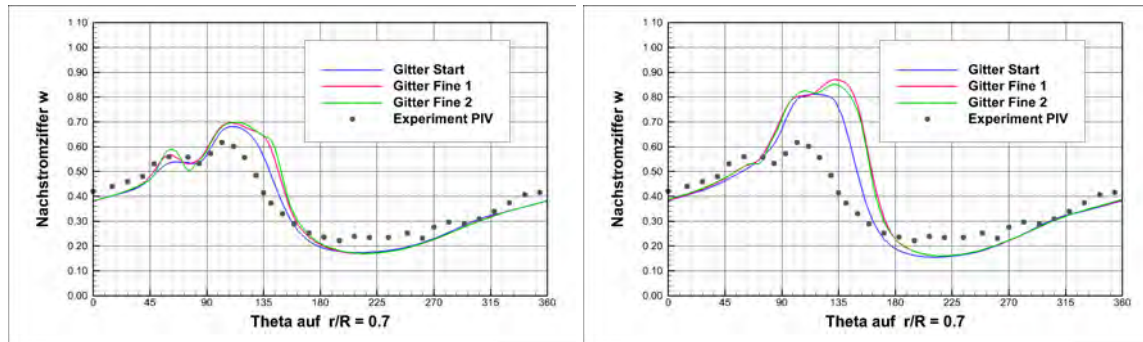


Abb. 3.21: Gittervariation mit RSM - Nachstromziffer auf Radius $r/R = 0,7$ links: BSL rechts: SSG

Die Ergebnisse der Gittervariation mit dem $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell für das Modell M1926, korrespondierend zu den in Abbildung 3.20 auf Seite 40 dargestellten Verfeinerungen des Gitters zeigen, dass schon das relativ grobe Gitter eine gute Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen liefert (Abbildung 3.22).

Eine genauere Betrachtung der Nachstromziffer auf den einzelnen Propellerradien r/R zeigt aber, dass durch die globalen Verfeinerungen am Hinterschiff mehr Strömungsdetails erfasst werden. Dies zeigt sich insbesondere auf den Radien in der Nähe der Propellernabe.

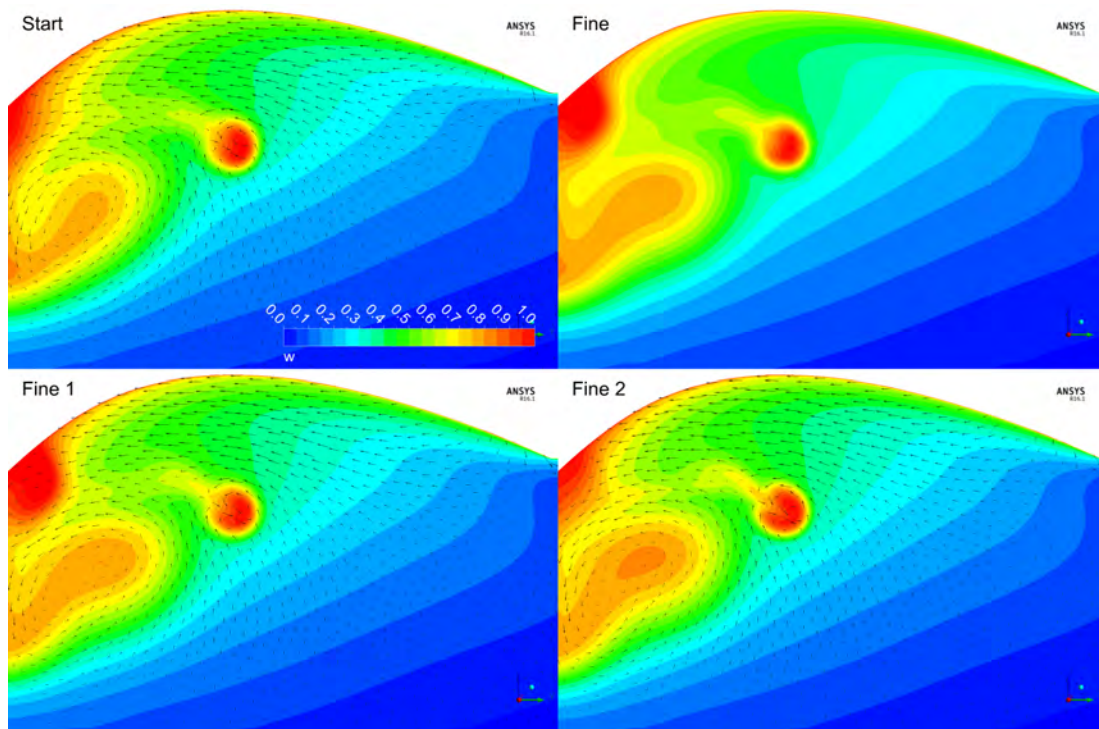


Abb. 3.22: Gittervariation SST - Nachstromziffer in PE Modell M1926

Da die extrem fein aufgelösten Gittervarianten kaum Veränderungen gegenüber der Gitterauflösung „Fine 1“ zeigten, wurden alle weiteren numerischen Untersuchungen mit dieser Gitterauflösung realisiert.

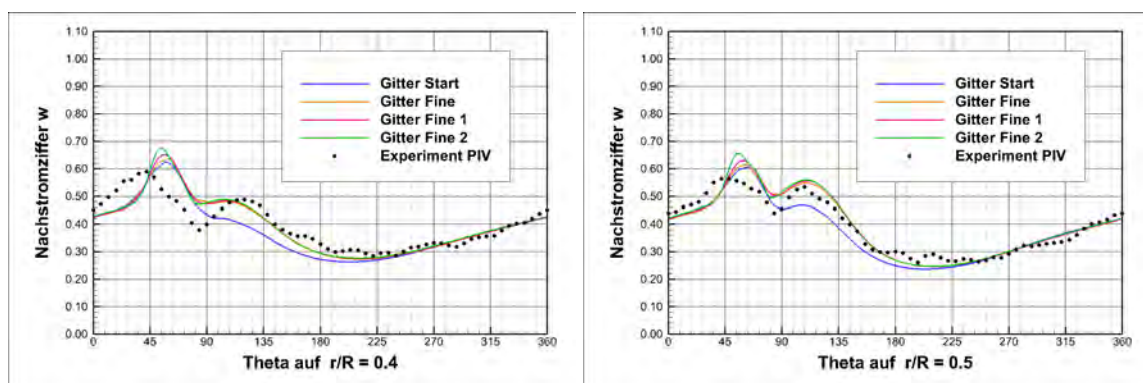


Abb. 3.23: Vergleich Gittervariation SST - Nachstromziffer auf $r/R = 0,4$ (links) und $r/R = 0,5$ (rechts)

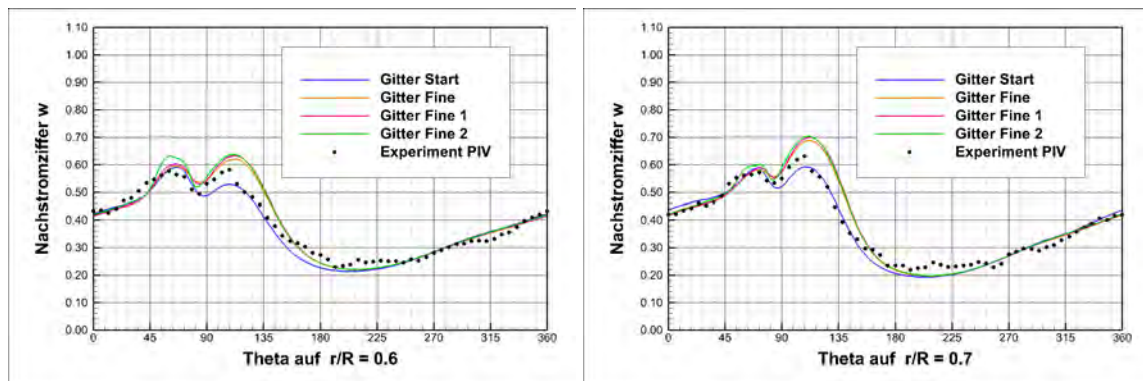


Abb. 3.24: Vergleich Gittervariation SST - Nachstromziffer auf $r/R = 0,6$ (links) und $r/R = 0,7$ (rechts)

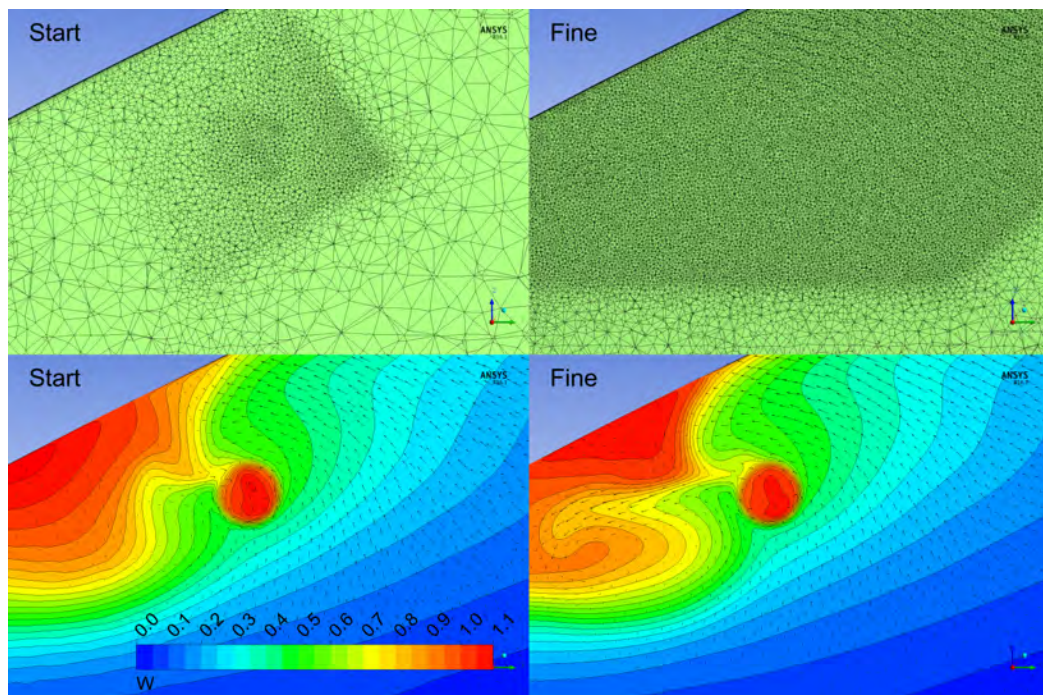


Abb. 3.25: Gittervariation SST - Nachstromziffer in PE Modell M1927

Auf der Basis der Erkenntnisse der Gittervariationen mit dem Modell M1926 wurden für das Modell M1927 zwei Volumengitter erzeugt, die in der 1. Variante der Auflösung der Startversion M1926 und in Variante 2 den Verfeinerungen aus der Gittervariante „Fine 2“ des Modells M1926 entsprachen. Bei der groben Variante (Start) wurden ausschließlich Verfeinerungen im Zustrom zum Propeller realisiert. In Variante 2 (Fine) wurde der gesamte Hinterschiffsbereich fein aufgelöst.

Die Ergebnisse in Abbildung 3.25 zeigen, dass die lokale Verfeinerung nicht ausreichend ist, um alle Effekte der Umströmung des Hinterschiffes zu erfassen. Der Wirbel zwischen Welle und der Mittschiffsebene wurde durch die grobe Variante nicht aufgelöst. Alle weiteren Berechnungen mussten trotz des wesentlich höheren Rechenaufwandes mit dem hochaufgelösten Gitter durchgeführt werden.

Tab. 3.2: Gittervarianten - Anzahl der Zellen im Lösungsgebiet Modell M1927

Gittervariante	Volumenelemente	Knotenanzahl
Grob	8.165.582	3.764.490
Fine	25.644.362	7.126.513

3.4 Validierung effektiver Nachstrom

Der effektive Nachstrom am Schiff ergibt sich aus der Interaktion des Propellers und dem Nachstrom, der sich durch die Verdrängungswirkung des Schiffes einstellt. Die Messung dieses Nachstroms ist durch herkömmliche Verfahren mit Drucksonden nicht möglich. Optische Verfahren mit Lasermesstechnik können eine Lösung sein, das effektive Nachstromfeld zu ermitteln. Diese Verfahren sind aber sehr aufwendig und können deshalb bisher nicht standardmäßig bei Modellversuchen eingesetzt werden. Für Binnenschiffe ergeben sich durch die Rumpfform und durch die Fahrt des Schiffes im flachen Wasser zusätzliche Schwierigkeiten. In diesen Fällen ist der freie optische Zugang zur Propellerebene häufig nicht gegeben, so dass eine Messung nicht möglich ist. Durch numerische Berechnungsverfahren ist es möglich, für jeden Punkt im Lösungsgebiet den Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit zu ermitteln. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Verfahren ist, dass sie die Realität hinreichend genau wiedergeben.

Im Rahmen dieses Projektes wurden für zwei Schiffsmodelle die Geschwindigkeitsfelder vor dem Propeller bei einer Wassertiefe ermittelt. Die Wirkung des drehenden Propellers wurde durch zwei Verfahren simuliert. Im ersten Schritt wurde der geometrisch voll aufgelöste Propeller mit unterschiedlichen Drehzahlen hinter dem Schiff integriert und mit dem quasistationären Verfahren „Frozen Rotor“ wurde das durch die Anströmung des Schiffes und die Wirkung des drehenden Propellers induzierte Geschwindigkeitsfeld ermittelt. Da dieses Verfahren bei jeder Berechnung nur die Ergebnisse für eine Flügelstellung liefert, wurden die Berechnungen für ausgewählte Winkellagen des Propellers durchgeführt.

Aus der Variation der Drehzahl ergab sich eine Drehzahl, bei der Propellerschub und Widerstand des Schiffes im Gleichgewicht waren. Mit den so ermittelten Werten für Schub und Drehmoment des Propellers wurden die Berechnungen mit dem Kraftscheibenmodell durchgeführt. Beide Verfahren werden in Kapitel 1.3 näher beschrieben.

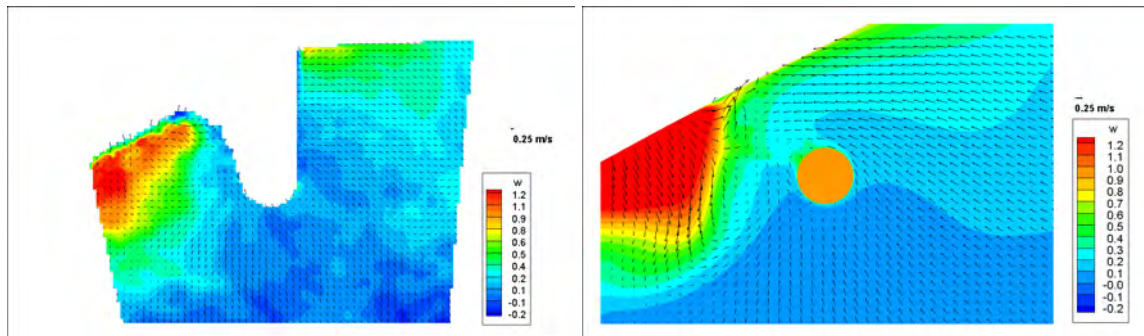


Abb. 3.26: Effektiver Nachstrom für Modell M1927 PIV (links) und CFD mit KSM (rechts)

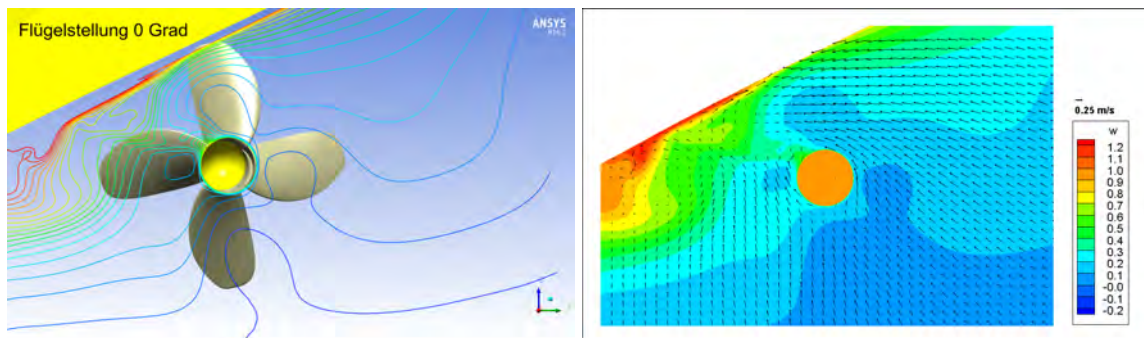


Abb. 3.27: Effektiver Nachstrom für Modell M1927 mit Frozen Rotor für P258 - Flügelstellung 0°

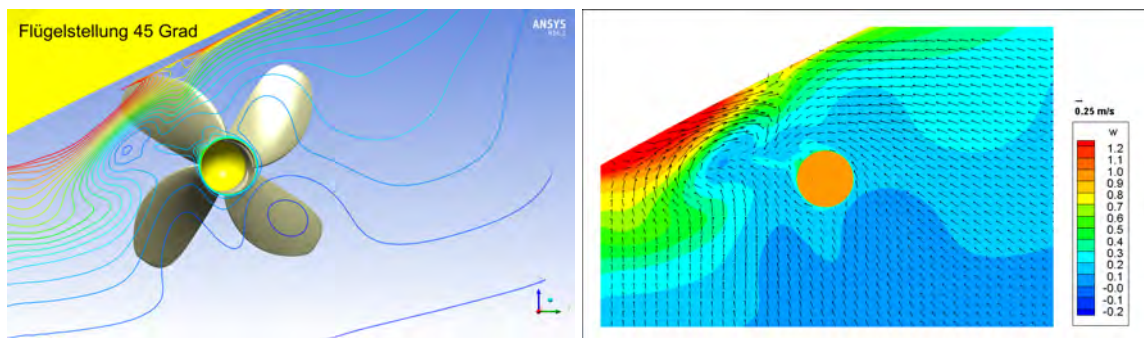


Abb. 3.28: Effektiver Nachstrom für Modell M1927 mit Frozen Rotor für P258 - Flügelstellung 45°

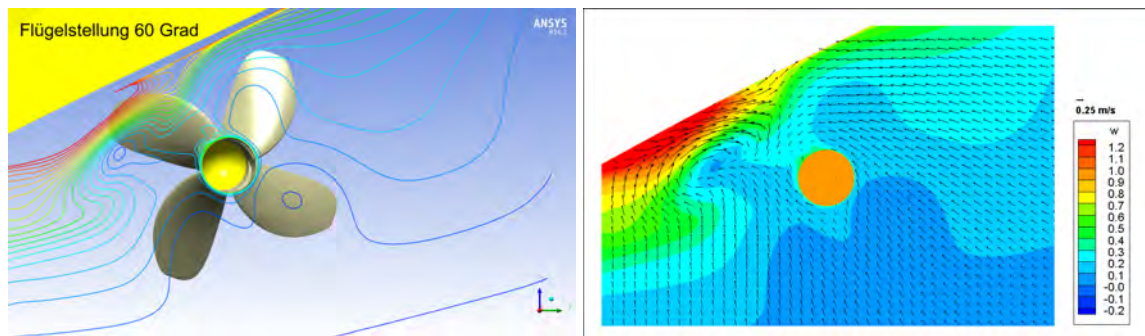


Abb. 3.29: Effektiver Nachstrom für Modell M1927 mit Frozen Rotor für P258 - Flügelstellung 60°

Der Vergleich der Ergebnisse (Abbildung 3.26 bis 3.28) mit den experimentellen Daten zeigt, dass die Grundcharakteristik der Strömung in großen Teilen des Nachstromfeldes durch die numerischen Methoden wiedergegeben wurde. Bei den Untersuchungen mit dem Kraftscheibenmodell wurde das Rückstromgebiet (rot) in Richtung der Mittschiffsebene leicht überschätzt. Die Auswertung der quasistationären Berechnungen zeigt, dass sich die Ausdehnung des Gebietes mit hoher Nachstromziffer ($w < 1$) in Abhängigkeit von der Flügelstellung ändert. Dieser Effekt kann durch die Berechnungen mit dem Kraftscheibenmodell nicht nachgebildet werden, da die Schub- und Momenten-Verteilung sich nur radial ändert. Auf dem Drehkreis eines Radienverhältnisses r/R ist sie entsprechend der gewählten Verteilung konstant.

4 Entwurf und Analyse adaptiver Anhänge

Ziel des Projektes war es, geeignete Maßnahmen zu entwickeln, die eine Vergleichmäßigung des Propellerzustromes ermöglichen. Hierzu sollten Anbauteile im Propellerzustrom implementiert werden, die das Nachstromfeld nicht nur im Entwurfszustand, sondern auch im regulären Betrieb bei sich ändernder Wassertiefe oder sonstigen Änderungen im hydrodynamischen Fahrtzustand positiv beeinflussen.

In enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses wurden Varianten diskutiert, die nicht nur hydrodynamische Verbesserungen generieren, sondern auch wirtschaftlich zu betreiben sind. Als wichtige Kriterien wurde hierbei angeregt, dass die zu entwickelnden Module zur Beeinflussung des Nachstroms robust und wartungsarm sein müssen, und dass der konstruktive Aufwand auf ein Minimum reduziert wird. Diese Anforderungen sind bei den möglichen Ausführungen mit verstellbaren Düsenringen nicht erfüllt. Aus diesen Gründen wurden die weiteren Entwicklungen schwerpunktmäßig auf die Positionierung und die Form einer als Vortex-Generator wirkenden Flosse gelegt. Eine solche Flosse ist im Bereich der Seeschiffe bereits bekannt und beeinflusst die Strömung am Hinterschiff durch den Randwirbel des angestellten Profils mit geringer Streckung. Dieser Wirbel transportiert so beispielsweise Wasser mit einer höheren Relativgeschwindigkeit zum Schiff in Bereiche mit ausgeprägtem Mitstrom.

4.1 Untersuchungen mit NACA-Profilen

Als geeigneter Vortex-Generator wurde ein Profil aus der vierziffrigen NACA-Serie ausgewählt. Die Geometrie des verwendeten Profils ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Um den Einfluss des Profils auf das ungestörte Strömungsfeld hinter dem Profil zu untersuchen, wurden Berechnungen mit dem im Kapitel 1.3 beschriebenen CFD-Verfahren durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere untersucht, bis zu welcher Entfernung hinter dem Profil das Strömungsfeld signifikant beeinflusst wird, und welchen Einfluss die Diskretisierung des Berechnungsraumes auf die Auflösung der entstehenden Wirbel hat.

Für eine erste Untersuchungsreihe wurde eine Profillänge von $L = 0,5$ m und eine Profilhöhe von $h = 0,75$ m gewählt. Dieses Profil A wurde frei im Lösungsgebiet angeordnet und ist

zur Realisierung verschiedener Anstellwinkel um die Profilachse drehbar. Für ausgewählte Anstellwinkel wurde das Strömungsfeld berechnet und in vier verschiedenen Ebenen ausgewertet (Abbildung 4.2).

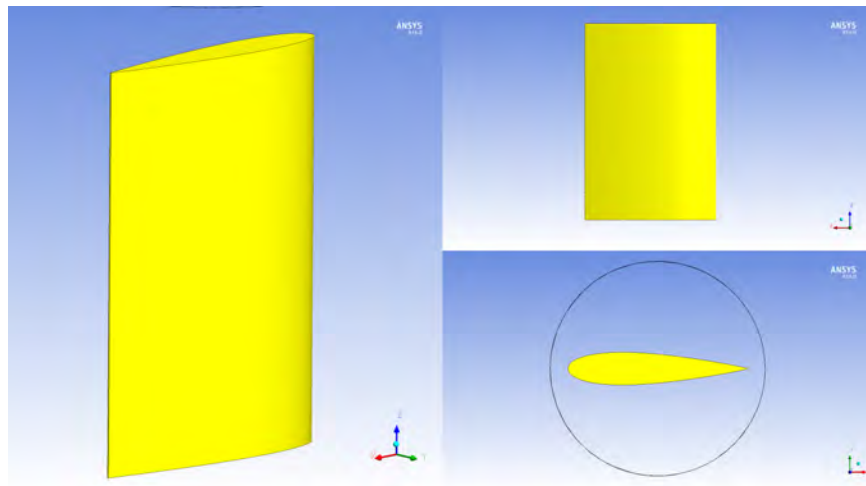


Abb. 4.1: Geometrie NACA 0018 Profil

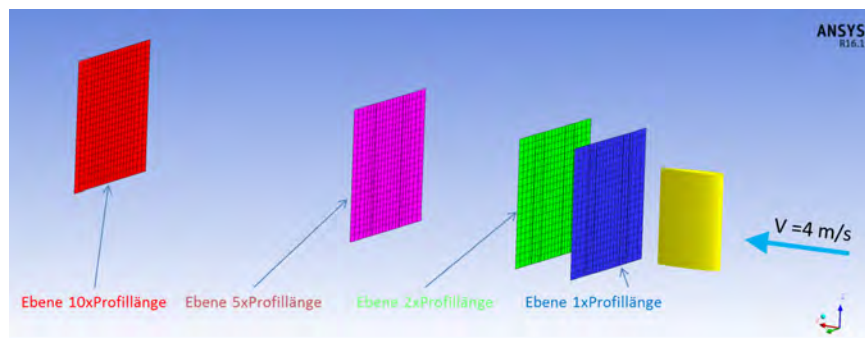


Abb. 4.2: Auswerteebenen hinter Profil A

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind für zwei ausgewählte Anstellwinkel in Abbildung 4.4 zusammengefasst. Wie erwartet, wird die Geschwindigkeit hinter dem Profil minimal reduziert und es bilden sich lokale Wirbel ausgehend von den Profilenden. Die radiale Ausdehnung der Wirbel bezogen auf den Kern des Wirbels ist sehr begrenzt und scheint sich mit zunehmendem Abstand vom Profil nur unwesentlich zu ändern.

Hinsichtlich der gewählten Anzahl der Volumenelemente, die dem Ziel folgte, den Rechenaufwand zu optimieren, hat sich gezeigt, dass die Gitterauflösung im Fernfeld und am Übergang vom Nah- zum Fernfeld nicht ausreichend fein ist. Eine numerische Dämpfung

der Wirbel kann hier nicht ausgeschlossen werden, so dass bei weiteren Untersuchungen eine deutliche Verfeinerung im Abstrom der Profile berücksichtigt wurde.

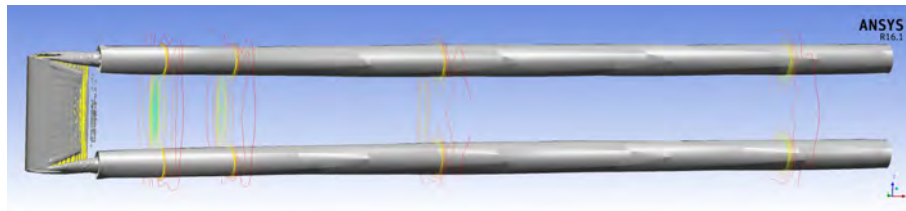


Abb. 4.3: Ausdehnung der Wirbel hinter dem Profil A

Grundsätzlich kann schon aus den Ergebnissen der ersten Berechnungen mit diesem Vortex-Generator geschlossen werden, dass diese Art der Profile geeignet scheint, den Zustrom zum Propeller wie gewünscht zu beeinflussen. Die Auswirkungen des angestellten Profils auf das Geschwindigkeitsfeld sind noch weit hinter dem Profil (10 Profillängen) zu beobachten und erzeugen einen Drall, dessen Richtung durch die Anstellung des Profils modifiziert werden kann.

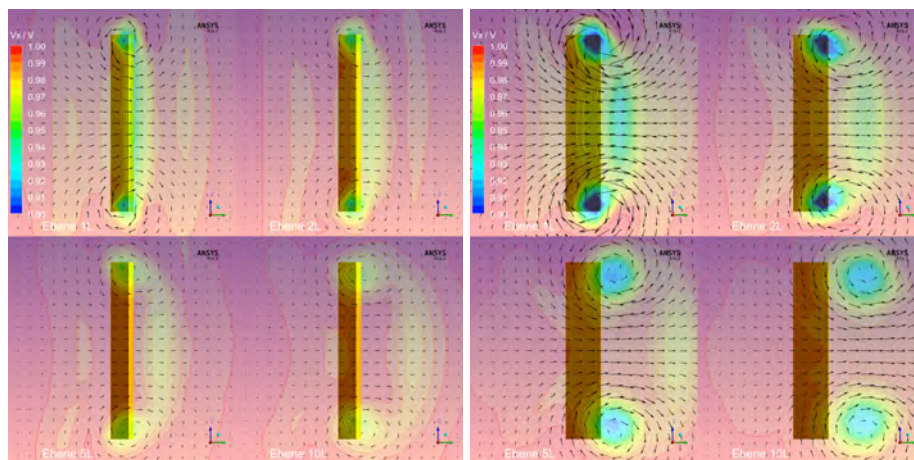


Abb. 4.4: Geschwindigkeitsfeld hinter Profil A - Anstellwinkel: links 5°; rechts 15°

Bei der Implementierung eines Vortex-Generators am Schiff ist das Profil drehbar am Rumpf befestigt, so dass sich nur ein Hauptwirbel am Ende des Profils ausbilden kann. Die Grenzschicht an der Außenhaut des Schiffes beeinflusst die Umströmung des gewählten Profils. Aus diesem Grunde wurden weitere numerische Berechnungen mit einer Flosse durchgeführt, die in Höhe und Profillänge für die Bedingungen am Hinterschiff geeignet erscheint. Das Profil mit einer Sehnenlänge von $L = 0,75 \text{ m}$ und einer Höhe von $h = 1,0 \text{ m}$ wurde an einer Wand angebracht und bei ausgewählten Anstellwinkeln im Bereich von 0° bis 15° umströmt. Bei der Generierung des Volumengitters wurden die Bereiche um die Flosse und

im Nachstrom der Flosse lokal verfeinert, so dass alle Effekte der Strömung erfasst werden konnten.

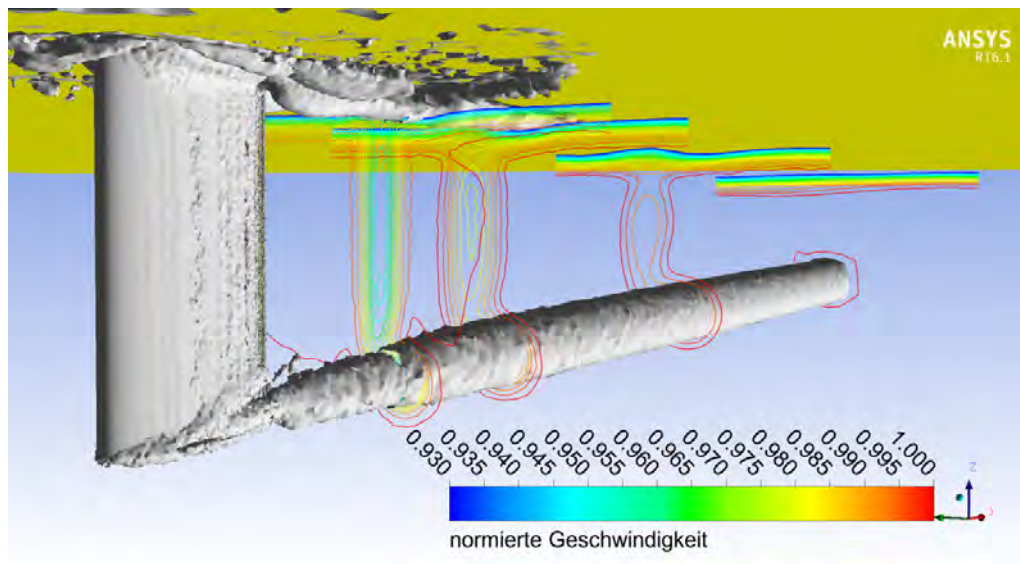


Abb. 4.5: Ausdehnung der Wirbel und normierte Geschwindigkeit hinter dem Profil B

Auch bei diesen Untersuchungen zeigte sich eine nur geringfügige Reduzierung der Geschwindigkeit hinter dem Profil (Abbildung 4.3). Grau eingefärbt ist die *Swirling strength* auf einem gewählten Level. Diese zeigt die Ausdehnung des Wirbels um seine Rotationsachse. Eine Beeinflussung des Strömungsfelds durch das angestellte Profil ist bis zu 10 Profillängen hinter dem Vortex-Generator zu beobachten. Man muss jedoch feststellen, dass die Abschattung durch das Profil und damit verbunden die Wirkung auf den Betrag der Geschwindigkeit nur noch sehr gering ist. Die Rotation im Geschwindigkeitsfeld, induziert durch die angestellte Flosse, ist aber weiterhin vorhanden (Abbildung 4.6).

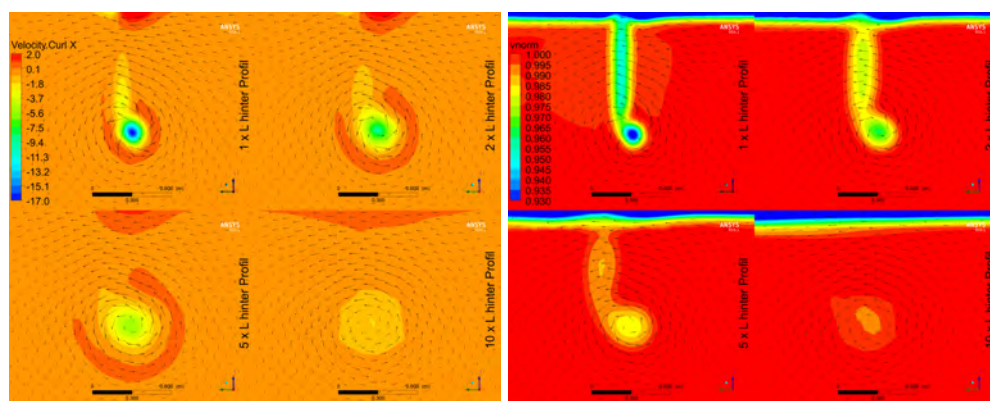


Abb. 4.6: Geschwindigkeitsfeld hinter Profil B - links: Wirbelstärke ; rechts normierte Geschwindigkeit

Für das hier beschriebene Profil wurde für unterschiedliche Winkelstellungen und Reynoldszahlen eine Vielzahl von Berechnungen durchgeführt, um den Einfluss des Profils auf das Geschwindigkeitsfeld bei unterschiedlichen Maßstäben λ zu betrachten. Diese Ergebnisse sind im Kapitel 2.2 zusammengefasst.

4.2 Positionierung von Vortex-Generatoren am Hinterschiff

Die Berechnungen mit dem NACA 0018 Profil haben gezeigt, dass durch den Einsatz derartiger Profile das Geschwindigkeitsfeld gezielt beeinflusst werden kann. Die Analyse des Betrages und der Richtung der Geschwindigkeit in ausgewählten Ebenen hinter der Flosse lieferten Informationen, in welchem maximalen Abstand zum Propeller ein Vortex-Generator installiert werden muss, um die Strömung gezielt zu homogenisieren. Die Voruntersuchungen zeigten auch, dass die Ausrichtung des Profils in der Anströmung (Anstellwinkel) einen wesentlichen Einfluss auf die Intensität des induzierten Wirbels hat. Aus diesem Grunde wurden mit den hier zu untersuchenden Binnenschiffsmodellen Berechnungen durchgeführt, die Aufschluss über die Umströmung des Rumpfes geben sollen.

Die konstruktiven Anforderungen der Implementierung der Flosse am Schiffsrumpf wurden mit den Industriepartnern im Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und bilden die Basis für die Positionierung der Flosse.

- Robuste wartungsarme Konstruktion
- Geringer Installationsaufwand
- Ausdehnung der Flosse nicht unter dem Schiffsboden und Seitenwand
- Ausrichtung der Flosse normal zur Schiffsaußenhaut

Durch die Ausrichtung der Flosse normal zur Außenhaut kann der Anstellwinkel in einem begrenzten Bereich variiert werden. Dadurch ist eine betriebszustandsabhängige Anpassung des Nachstromfeldes durch die Modifikation des Anstellwinkels möglich.

Neben den konstruktiven Anforderungen an die statische Position der Flosse am Rumpf müssen hydrodynamische Aspekte beachtet werden, um eine optimale Wirkung der Flosse zu erzielen.

- maximale Anströmgeschwindigkeit am Flossenprofil
- Wirkung auf die Propellerebene

Für beide Schiffsmodelle wurde eine Flossenlänge $L = 0,1$ m im Modellmaßstab gewählt. Daraus ergibt sich ein Maximalabstand der Flosse normal zum Schiffsrumpf von 0,1 m. In 4 Ebenen normal zur Schiffsoberfläche wurde die Geschwindigkeit in Betrag und Richtung ausgewertet. Die Ergebnisse für beide Schiffsmodelle sind in den Abbildungen 4.7 bis 4.14 dargestellt.

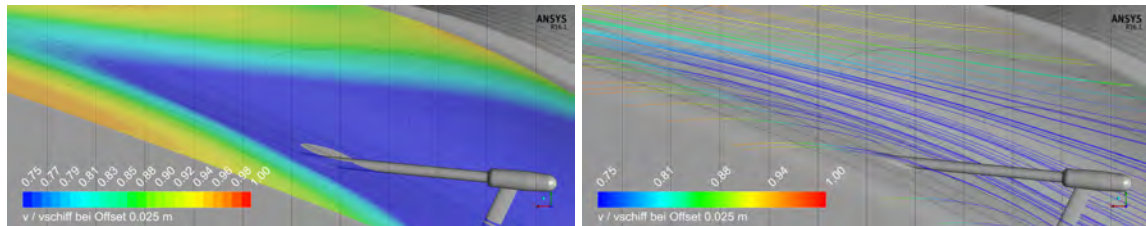


Abb. 4.7: M1926 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,025 m über Rumpf.

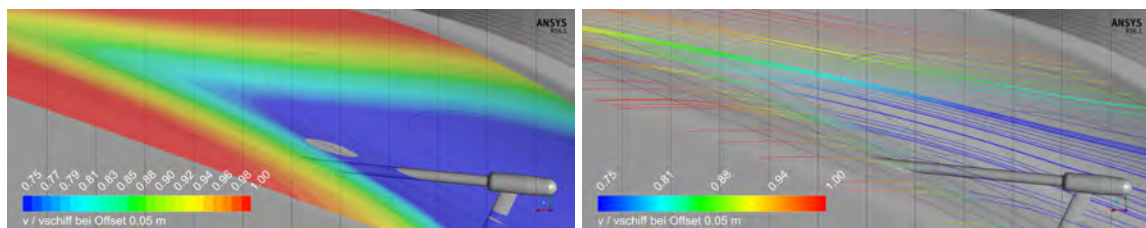


Abb. 4.8: M1926 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,05 m über Rumpf.

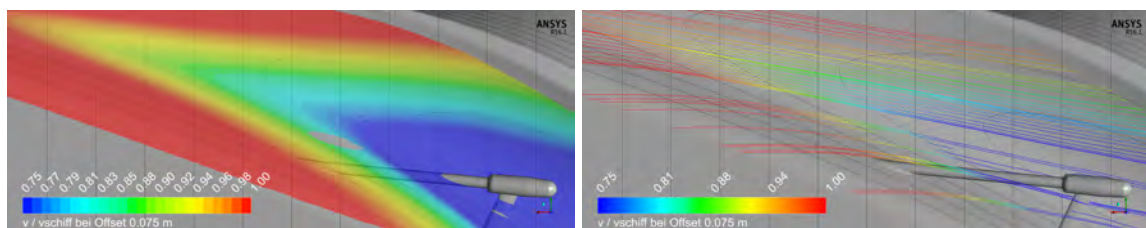


Abb. 4.9: M1926 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,075 m über Rumpf.

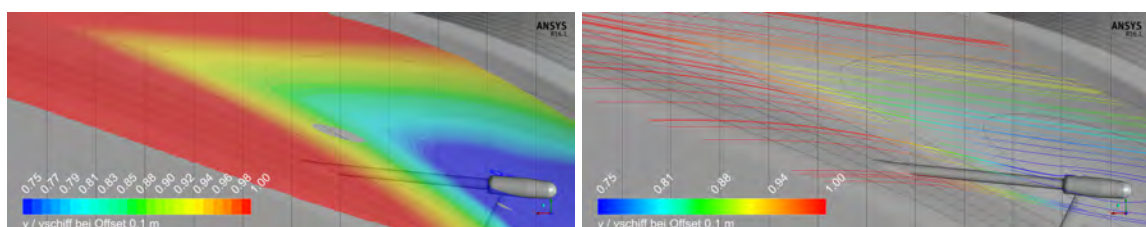


Abb. 4.10: M1926 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,1 m über Rumpf.

Durch die Ausrichtung der Stromlinien kann die Basis-Winkelstellung der Profile in den Offset-Ebenen festgelegt werden. Der Betrag der Geschwindigkeit zeigt, in welchen Bereichen die Strömungsgeschwindigkeit durch die Versperrung des Rumpfes reduziert wird. Rote Bereiche markieren die ungestörte Strömung. Eine optimale Wirkung der Flosse kann erreicht werden, wenn der obere vom Rumpf abgewandte Flossenteil mit möglichst ungestörter Geschwindigkeit angeströmt wird.

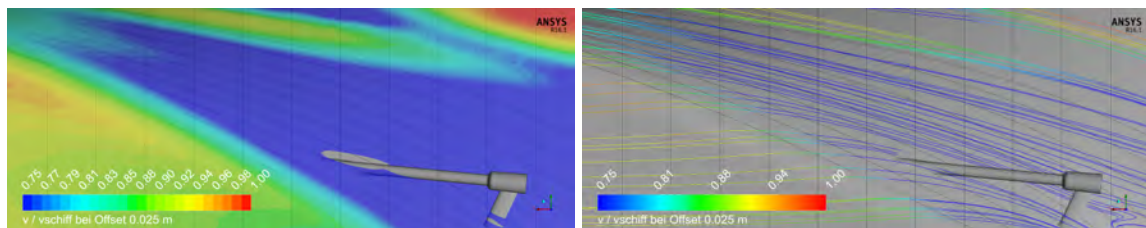


Abb. 4.11: M1927 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,025 m über Rumpf.

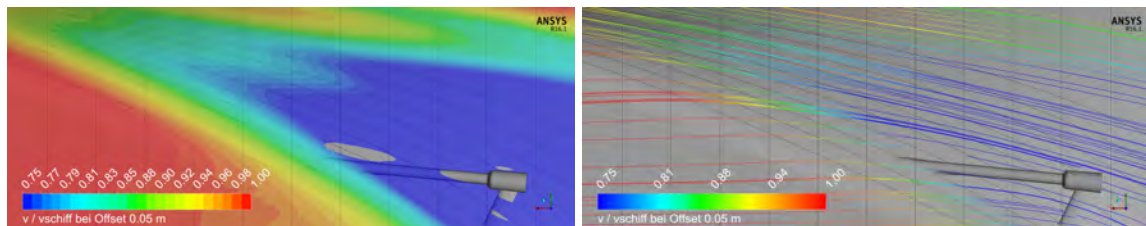


Abb. 4.12: M1927 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,05 m über Rumpf.

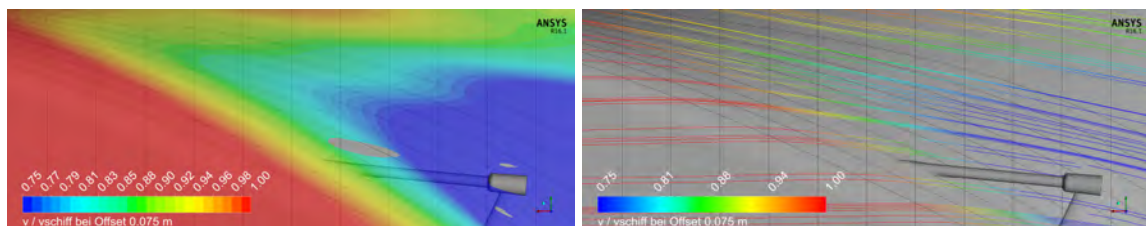


Abb. 4.13: M1927 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,075 m über Rumpf.

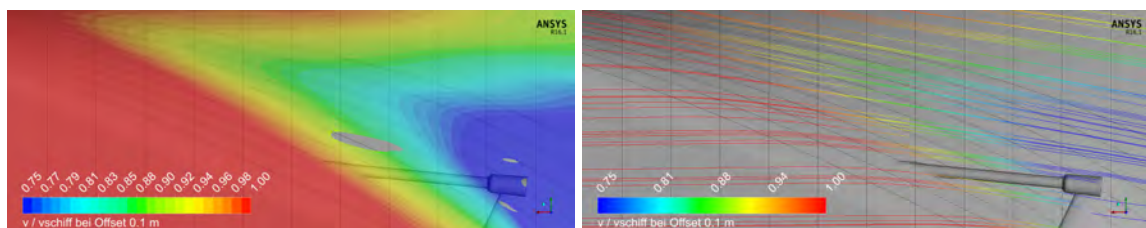


Abb. 4.14: M1927 - Betrag und Richtung der Geschwindigkeit in Offsetebene 0,1 m über Rumpf.

Die Auswertung der CFD-Untersuchungen mit ausgewählten Binnenschiffen ohne Flossenprofil liefert Informationen über das Strömungsfeld am Hinterschiff. Auf der Grundlage dieser Berechnungen und unter Beachtung der konstruktiven Forderungen konnte ein Bereich zur Installation der Vortex-Generatoren identifiziert werden.

Für beide Schiffsmodelle ergab sich durch die Auswertung des Geschwindigkeitsfeldes am Hinterschiff ein nahezu identischer Bereich für die Implementierung der Flosse. Diese Untersuchungen berücksichtigen jedoch nicht die Auswirkung der Flosse auf die Propellerebene durch die Interaktion Flosse-Rumpf. Um eine optimale Positionierung des Vortex-Generators zu gewährleisten, wurden in dem potentiellen Installationsbereich der Flosse 3 Positionen gewählt. Für diese gewählten Positionen wurden numerische Untersuchungen mit integriertem Profil unter Beachtung der Wechselwirkung Flosse-Rumpf realisiert. Die Abbildungen 4.15 bis 4.16 zeigen die Position und Ausrichtung der Flossen für erste Untersuchungen zum Einfluss des Profils auf das Nachstromfeld.



Abb. 4.15: Auswahl der Flossenposition Y-Ansicht (links) und Z-Ansicht (rechts)

Alle Positionen wurden so gewählt, dass eine weitestgehend ungestörte Anströmung gewährleistet ist. In der Abbildung 4.15 rechts sind die Zylinder markiert, in denen die Teilgitter für die Flossen frei drehbar implementiert sind. Zur Realisierung frei wählbarer Anstellwinkel ist eine Drehung der Teilgitter (Flossenzyylinder) entsprechend dem Anstellwinkel um die Mittelachse des Profils im Vorfeld der Rechnung ausreichend (Abbildung 4.16). Dadurch wird der Aufwand der Gittergenerierung bestmöglich minimiert.

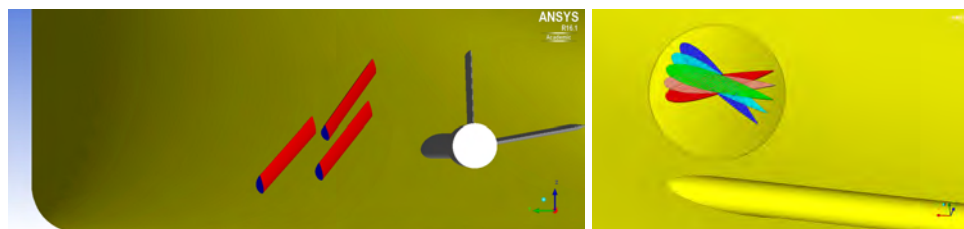


Abb. 4.16: Auswahl der Flossenposition X-Ansicht (links) - Flossenwinkel schematisch (rechts).

In der Abbildung 4.16 rechts sind schematisch die Winkelstellungen der Flosse dargestellt. Der Anstellwinkel wurde über 6 Winkelstellungen (0° bis 35°) relativ zur Mittelängsachse

des Schiffes variiert. Als Drehachse fungierte aus konstruktiven Gründen der Mittelpunkt des Profilquerschnitts im Gegensatz zur üblichen Drehung der Profile um den sogenannten Profilschwerpunkt im vorderen Drittel der Profilmittellinie.

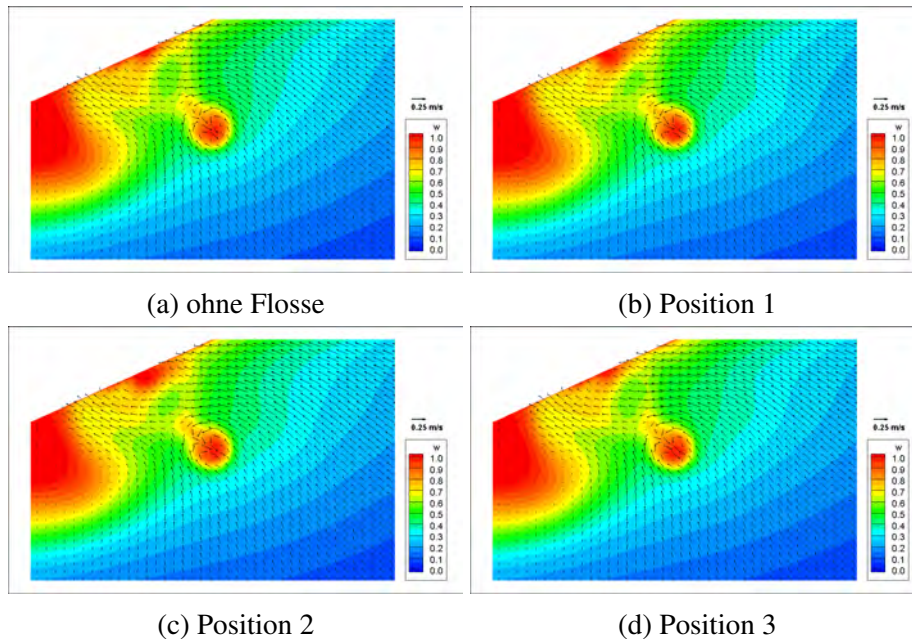


Abb. 4.17: Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 20° Anstellwinkel.

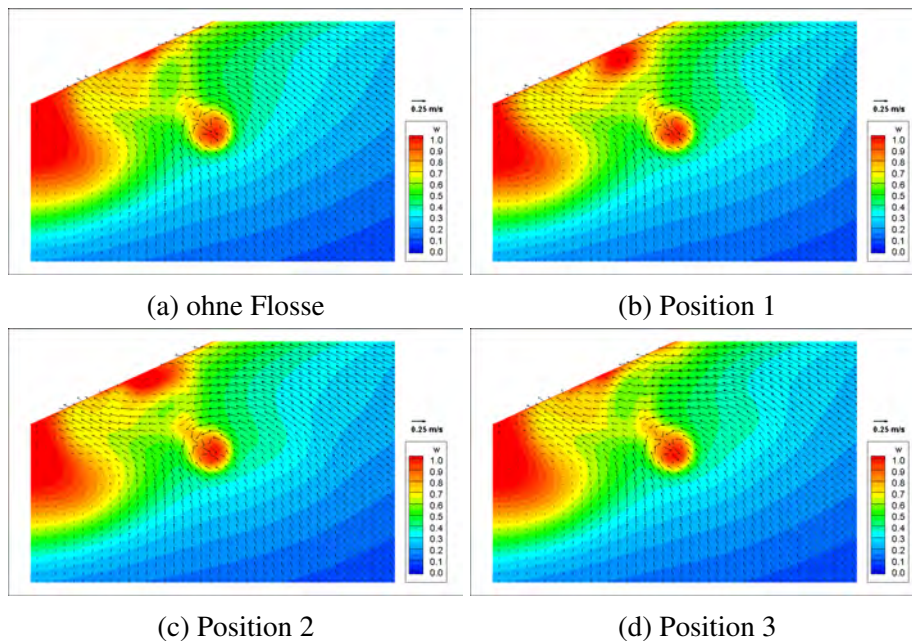


Abb. 4.18: Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 25° Anstellwinkel.

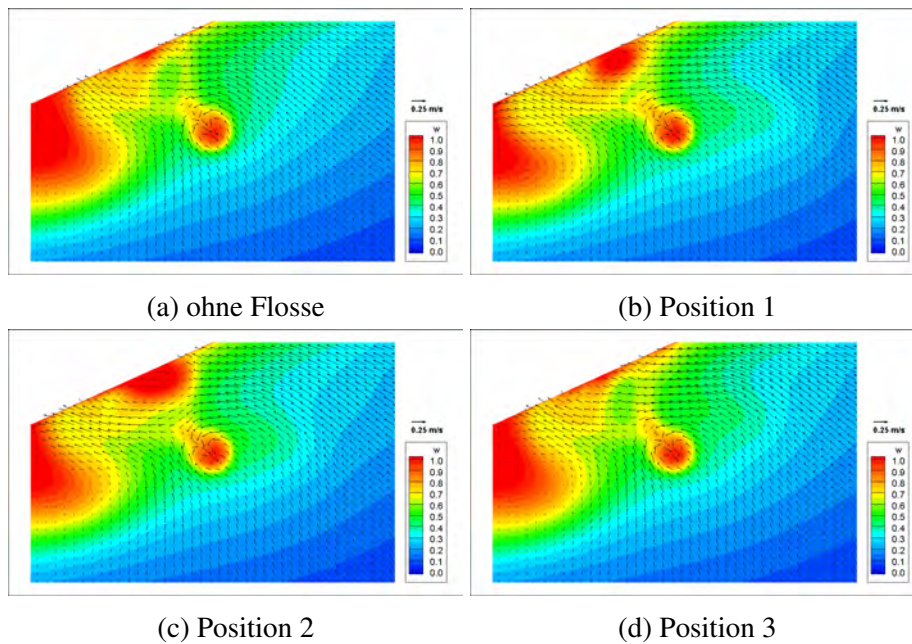


Abb. 4.19: Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 30° Anstellwinkel.

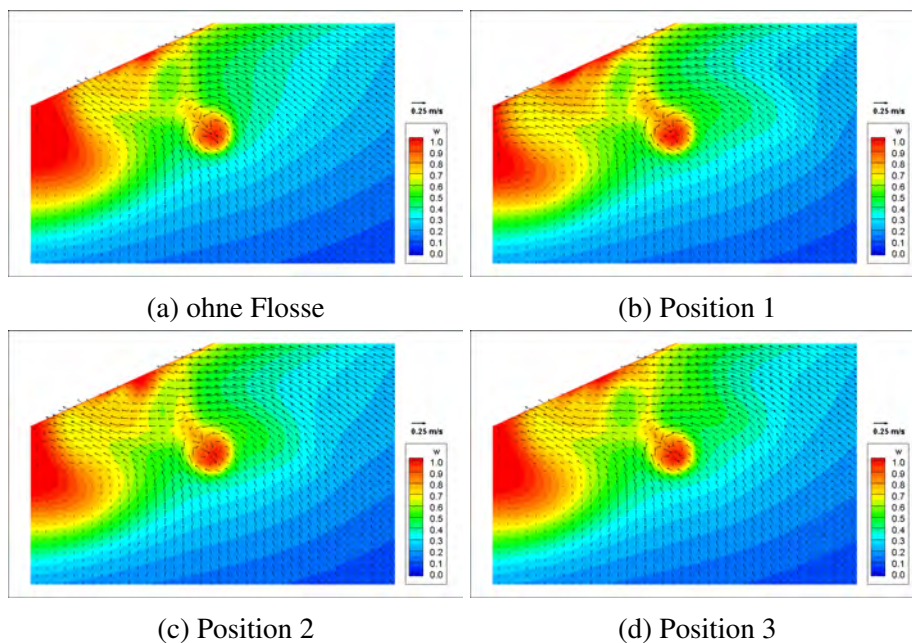


Abb. 4.20: Vergleich Nachstromfelder Variation der Flossenposition bei 35° Anstellwinkel.

Der Vergleich der nominellen Nachstromfelder in den Abbildungen 4.17 bis 4.20 für unterschiedliche Anstellwinkel des Profils zeigt, dass durch die Variation der Position der Flosse

am Hinterschiff die Wirkung auf das Geschwindigkeitsfeld in der Propellerebene verändert wird. Ob diese Veränderungen sich positiv auf die Effizienz des Propellers und die durch den Propeller induzierten Schwingungen auswirken, ist in dieser Phase des Projektes noch nicht feststellbar. Quantitative Vergleiche der Nachstromziffer auf dem normierten Radius r/R können hierüber auch keine eindeutigen Erkenntnisse liefern.

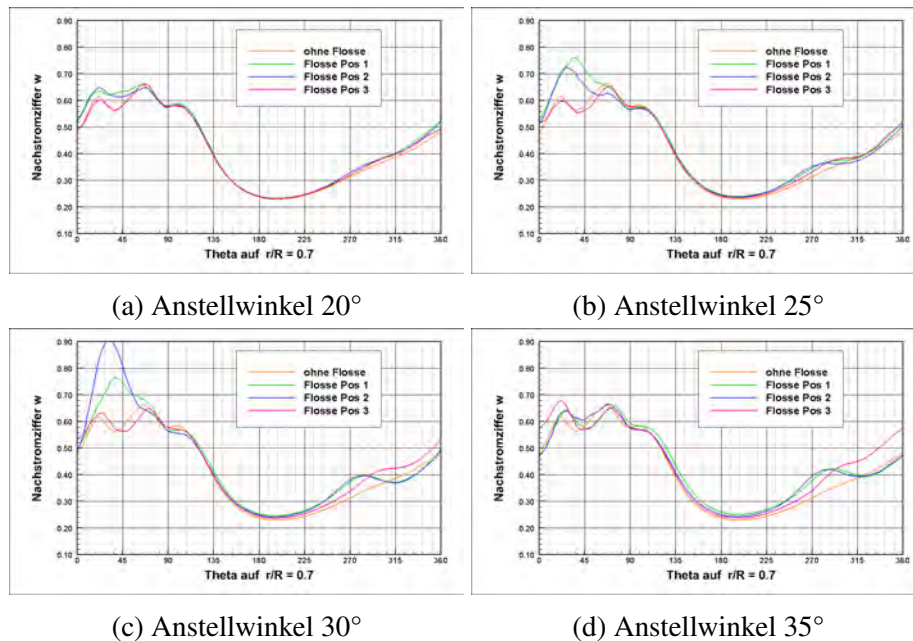


Abb. 4.21: Vergleich Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel auf Radius $r/R = 0,7$.

Definitiv festzustellen ist, dass eine Beeinflussung erreicht werden kann. Die Bewertung des Einflusses ist jedoch stark eingeschränkt durch die Abschätzung, die der vertikale Wellenbock auf das Geschwindigkeitsfeld im Bereich des Propellers oberhalb der Welle erzeugt. Aus diesem Grund wurden die weiteren Berechnungen und die Modellversuche ohne den vertikalen Wellenbock durchgeführt.

Tab. 4.1: Flossenpositionen im Modellmaßstab

Modell	X [m]	Y [m]	Z [m]	Winkel aus X-Achse [°]
M1926	9,11	2,60	1,17	15,14
M1927	9,20	2,48	1,33	14,68

Ausgehend davon, dass das Geschwindigkeitsfeld in der Propellerebene durch eine Positionierung der Flosse in Position 2 hinreichend beeinflusst wird, die Anströmbedingungen in Position 2 günstiger als in Position 3 sind (siehe auch Abbildung 4.7 bis 4.14 auf Seite 52) und unter Beachtung konstruktiver Möglichkeiten (geringe Krümmung der Rumpfoberfläche) wurden für die weiteren Untersuchungen die in Tabelle 4.1 zusammengefassten Flossenpositionen für die untersuchten Binnenschiffe festgelegt.

4.3 Numerische Untersuchungen mit Vortex-Generator

Für die voroptimierte Flossenform und Position wurden die Vortex-Generatoren unter realen Betriebsbedingungen auf ihre Eignung zur Homogenisierung des Propellerzustroms getestet. Dazu wurde für beide Schiffsmodelle bei 2 Wassertiefen eine Vielzahl von Berechnungen mit definierten Anstellwinkeln durchgeführt.

Die Erzeugung der Volumengitter wurde dahingehend optimiert, dass eine effiziente Variation der Anstellwinkel ohne aufwendige Gittergenerierung möglich ist. Die Flossen sind in einem drehbaren Teilgitter mit hoher Auflösung integriert. Die Übergabe der Feldgrößen erfolgt hier durch eine Interpolation an den Schnittstellen zum Schiffsgitter.

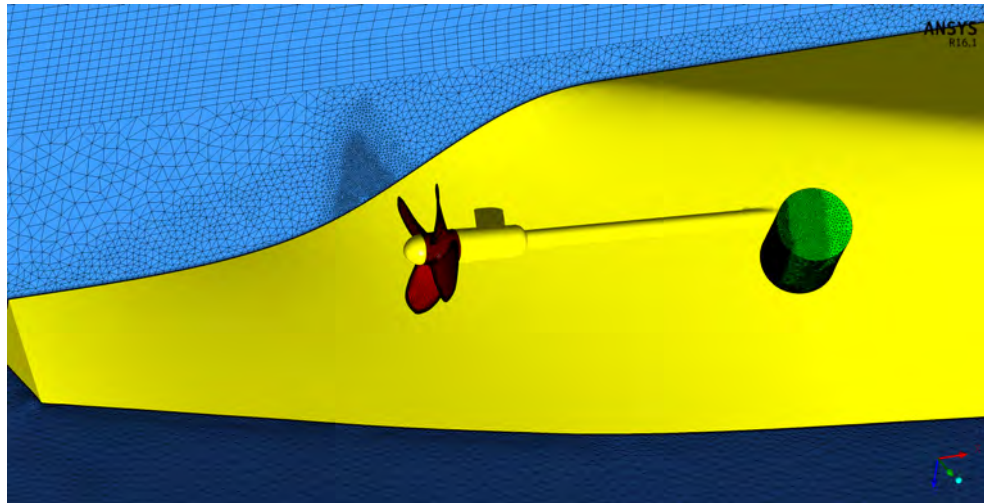


Abb. 4.22: Hinterschiffsgeometrie mit Teilgitter für Profil.

Die numerischen Untersuchungen mit den beiden Binnenschiffsmodellen wurden bei je zwei Schiffsgeschwindigkeiten und zwei Wassertiefen durchgeführt (Tabelle 4.2). Für alle Betriebspunkte wurde der Anstellwinkel des Profils über den Bereich von -30° bis 30° variiert.

Der Anstellwinkel des Profils wurde so definiert, dass die neutrale Ausrichtung dem Verlauf der ungestörten Stromlinien in einem Abstand vom Rumpf bei halber Profilhöhe aus dem Widerstandsversuch entspricht. Die neutrale Winkelstellung ist in der Tabelle 4.1 für beide Schiffsmodelle dokumentiert. Eine Variation der Anstellwinkel erfolgte entsprechend der in Abbildung 4.23 definierten Drehrichtungen.

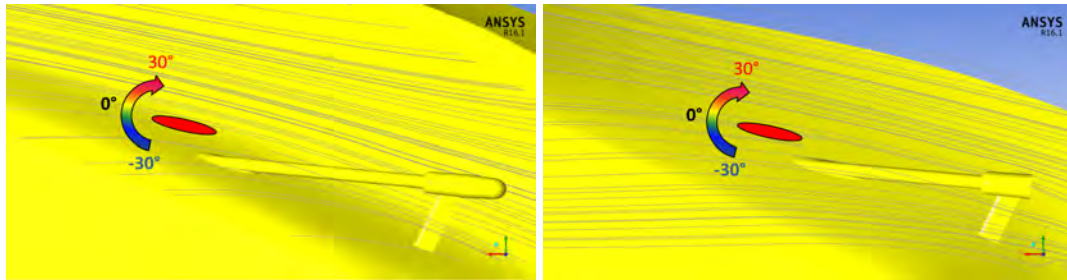


Abb. 4.23: Definition der Anstellwinkel Flosse M1926 (links) und M1927 (rechts).

Tab. 4.2: Beschreibung Berechnungsfälle mit Vortex-Generator für $\lambda = 10$

Modellnummer	Wassertiefe [m]	Tiefgang [m]	V_S [m/s]	Anstellwinkel [°]
M1926	0,35	0,25	1,054	-30 bis 30
M1926	0,50	0,25	1,230	-30 bis 30
M1927	0,35	0,25	1,054	-30 bis 30
M1927	0,50	0,25	1,230	-30 bis 30

Die Strömung am Hinterschiff im Zustrom zum Propeller ist sehr komplex. Aus diesem Grund wurden mehrere visuelle und quantitative Verfahren zur Bewertung der Güte des Nachstroms herangezogen. Eine erste Bewertung des Nachstroms kann über die visuelle Auswertung von Contourplots in der Propellerebene erfolgen. Diese wurden für jeden numerischen Versuch dargestellt und mit den Nachstromfeldern ohne Vortex-Generator verglichen. Neben der visuellen Analyse des Nachstromfeldes sollen quantitative Darstellungen der Nachstromziffer für ausgewählte Propellerradien weitere Hinweise zur Bewertung der Wirkung der installierten Profile liefern.

Methoden, die die Qualität des Nachstroms in einer Ziffer zusammenfassen (Kapitel 1.5.2), werden im Schiffbau häufig eingesetzt. Sie erleichtern die Bewertung deutlich. Der Nachteil dieser Verfahren ist, dass lokale Extrema zwar in die Berechnung mit einfließen, aber nicht lokalisiert werden können.

Eine erfolgreiche Bewertung ist auf Grund der Komplexität des Zustroms zum Propeller nur durch die Anwendung aller oben genannten Verfahren und durch die Visualisierung der gesamten Strömungsverhältnisse am Hinterschiff möglich. Für die untersuchten Modelle

wurden alle Verfahren zur Bewertung eingesetzt. Des Weiteren wurde die Wirkung der installierten Profile auf den Gesamtwiderstand untersucht.

4.3.1 Nachstromfeldoptimierung am Modell M1926

Die Analyse der Nachstromfelder des GMS M1926 bei einer Wassertiefe von $h = 0,35$ m zeigt, dass durch die Implementierung der Flosse im Zustrom zum Propeller die Geschwindigkeit in Betrag und Richtung bei allen Winkelstellungen verändert wurde.

Durch die beiden positiven Anstellwinkel 15° und 30° konnte die stark verzögerte Strömung im Bereich der Umlaufwinkel zwischen 90° und 180° deutlich reduziert werden. Die Anstellung des Profils von 30° verzögerte aber auch die Strömung im Bereich von 0° bis 90° . Die visuelle Auswertung zeigt eindeutig eine Verbesserung des Nachstromfeldes bei einem Profilwinkel von 15° .

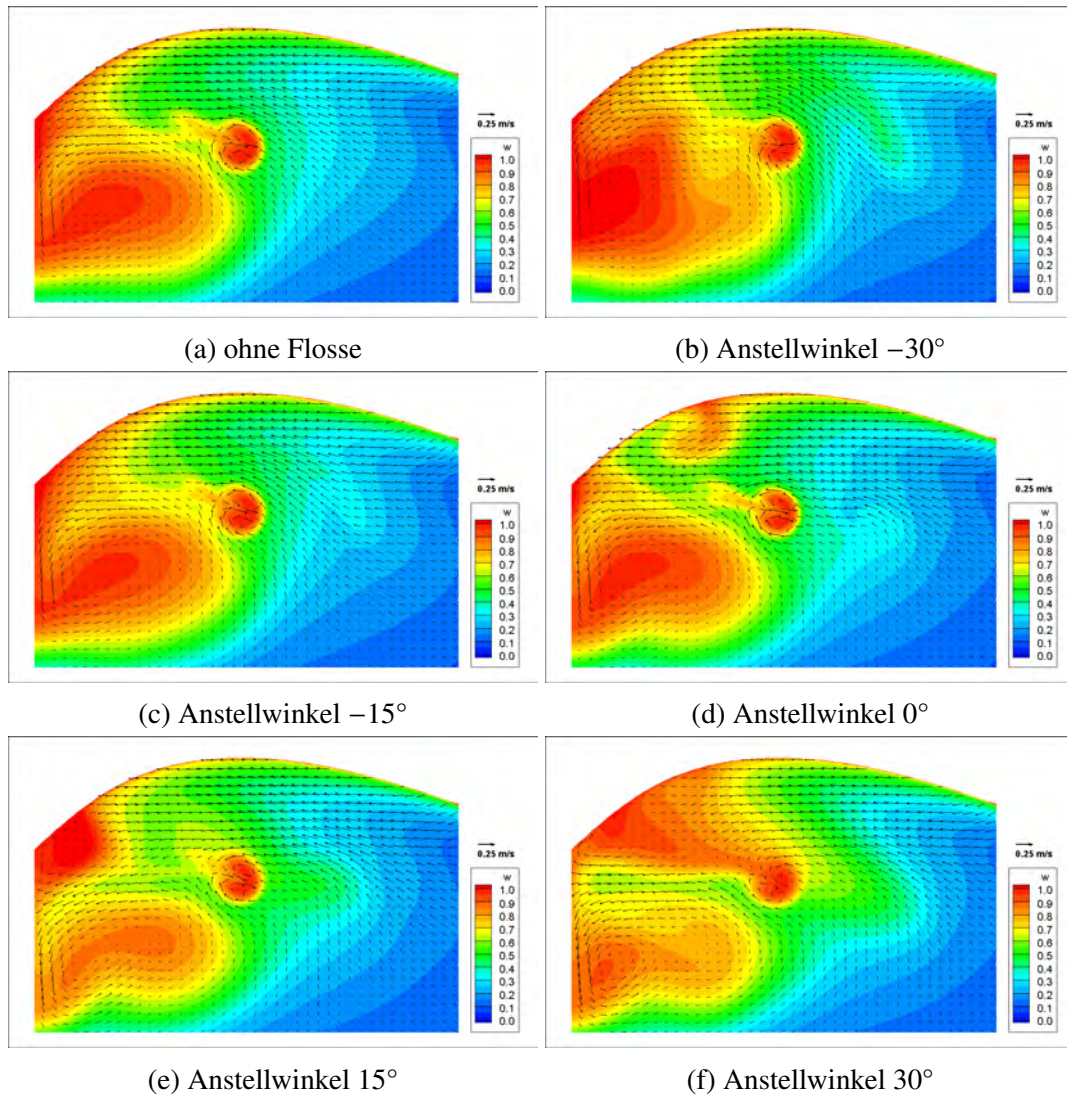


Abb. 4.24: Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1926 $h = 0,35$ m.

Durch die negativen Anstellwinkel des Profils wird insbesondere das Nachstromfeld rechts neben der Welle beeinflusst. Dies zeigt sich auch in der Auswertung der Geschwindigkeit im Propellerdrehkreis in den folgenden Abbildungen. Betrachtet man den für den Propellerentwurf wichtigen Radius $r/R = 0,7$, kann man den Eindruck gewinnen, dass durch den Anstellwinkel -30° (grüne Linie) eine Vergleichmäßigung der Nachstromziffer im Umlauf erreicht wird. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Winkelstellung 15° die lokalen Spitzen im Nachstrom reduziert.

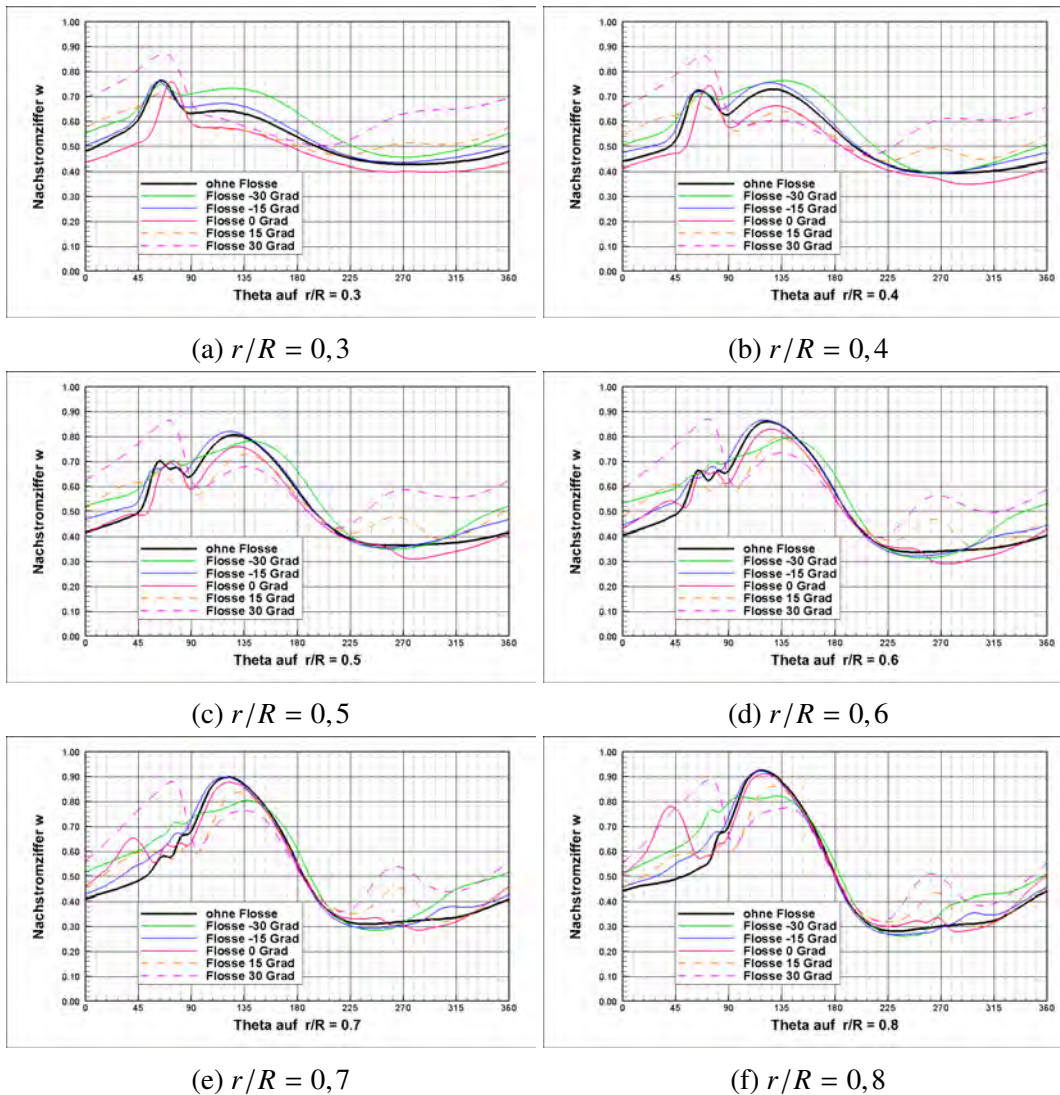


Abb. 4.25: Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1926 $h = 0,35$ m.

Die Auswertung dieser beiden Analysemethoden zeigt, dass die Bewertung des Nachstroms hinsichtlich der Qualität und der Wirkung auf den Propeller recht komplex ist. Weitere Erkenntnisse konnten durch Berechnung des Gütegrades gewonnen werden. Dieser wurde in der Tabelle 4.3 für alle Profilwinkel zusammengefasst und bestätigt die Annahme, dass durch den Profilwinkel 15° eine Verbesserung der Nachstromgüte bei einer Wassertiefe von $h = 0,35$ m erreicht werden kann.

Tab. 4.3: Gütegrade des Nachstroms für das Modell M1926 bei $V_S = 1,054 \text{ m/s}$ und $h = 0,35 \text{ m}$

Anstellwinkel	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,621	0,935	0,664	0,633
-30°	0,712	0,926	0,768	0,658
-15°	0,657	0,930	0,707	0,637
0°	0,590	0,900	0,656	0,639
+15°	0,714	0,944	0,757	0,696
+30°	0,580	0,954	0,607	0,720

Die Auswertung der berechneten Widerstände am Modell M1926 ergab für diese Wassertiefe keine nennenswerten Nachteile durch die Installation der Vortex-Generatoren. Durch den den Nachstrom verbessernden Anstellwinkel von 15° ergab sich eine Widerstandserhöhung von ca. 2%. Ob diese Erhöhung durch einen effizienter arbeitenden Propeller kompensiert werden kann, ist im Rahmen dieses Projektes nicht feststellbar.

Tab. 4.4: Widerstände im Modellmaßstab M1926 $h = 0,35 \text{ m}$

Anstellwinkel	Fx Schiff [N]	Fx Flosse [N]	Fx gesamt [N]
ohne Flosse	46,54	-	46,54
-30°	46,84	0,72	47,56
-15°	46,50	0,16	46,66
0°	46,52	0,30	46,82
15°	46,34	1,16	47,50
30°	46,86	1,88	46,74

Für die Untersuchungen bei einer Wassertiefe von $h = 0,5 \text{ m}$ mit dem Modell M1926 ergaben sich, wie erwartet, vollkommen veränderte Nachstromfelder im Vergleich zur geringeren Wassertiefe von $h = 0,35 \text{ m}$.

Die Charakteristik der Wirkung der Flosse hat sich deutlich verändert. Die Wirkung konzentriert sich hier insbesondere auf den Bereich des Propellerdrehkreises von 220° bis 300°. In diesem Bereich wurde die Zuströmung weiter verzögert. Ob dies zu einer Verbesserung durch eine Homogenisierung führt, kann durch die Auswertung der Contourplots und die Analyse der Nachstromziffer auf den Propellerdrehkreisen nicht eindeutig bestimmt werden.

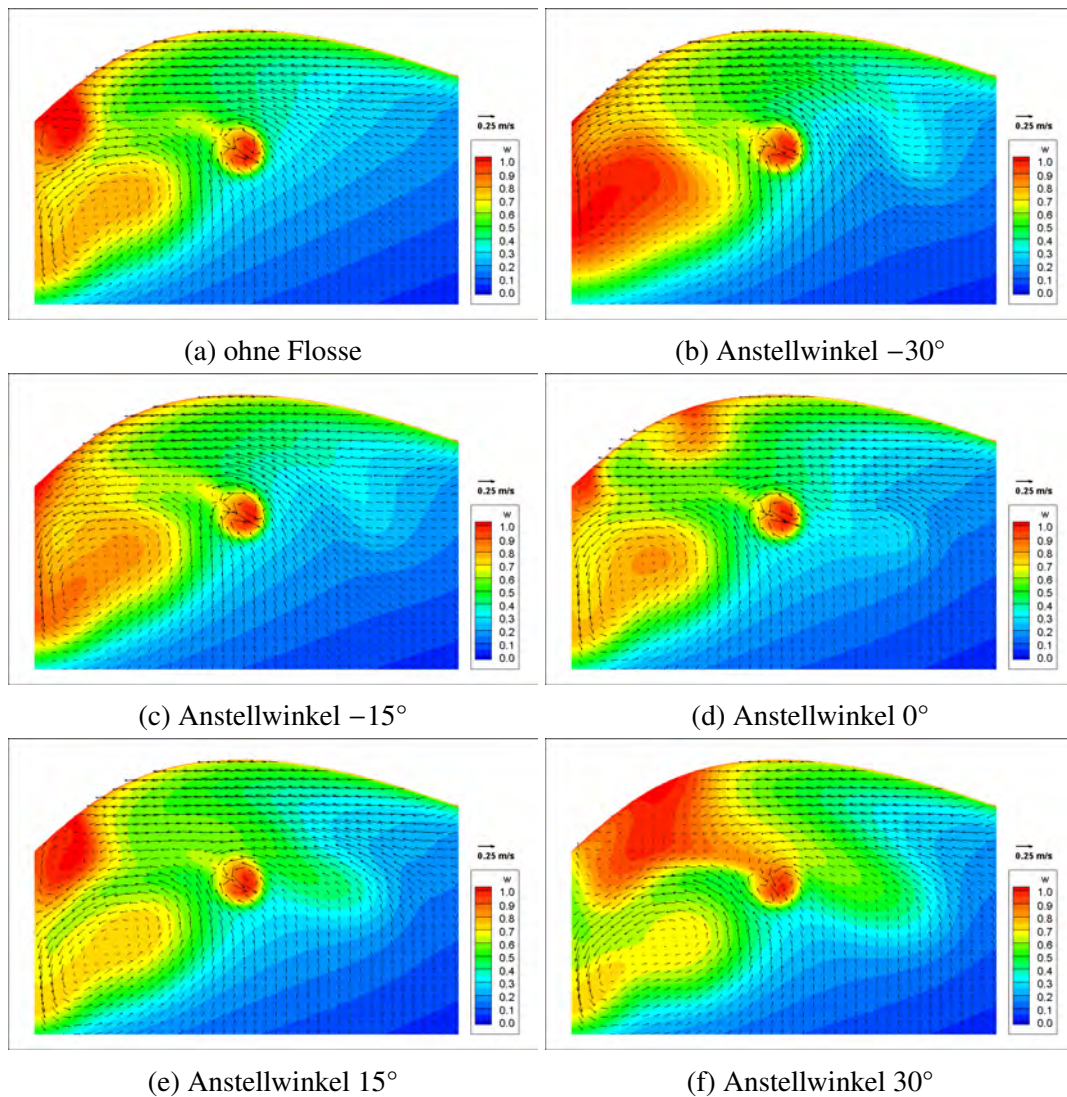


Abb. 4.26: Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1926 $h = 0,5$ m.

Tab. 4.5: Widerstände im Modellmaßstab M1926 $h = 0,5$ m

Anstellwinkel	Fx Schiff [N]	Fx Flosse [N]	Fx gesamt [N]
ohne Flosse	67,74	-	67,74
-30°	68,78	1,06	69,84
-15°	68,30	0,42	68,72
0°	68,58	0,48	69,06
15°	68,54	1,92	70,46
30°	69,00	2,98	71,98

Durch die Implementierung des Profils mit einem Anstellwinkel von -15° konnten Strömungsgradienten außerhalb des Propellerkreises in der Mittschiffsebene reduziert werden. Diese Veränderungen sind aber auch verbunden mit einer 4%-igen Widerstandserhöhung gegenüber dem Modell ohne Flosse (Tabelle 4.5).

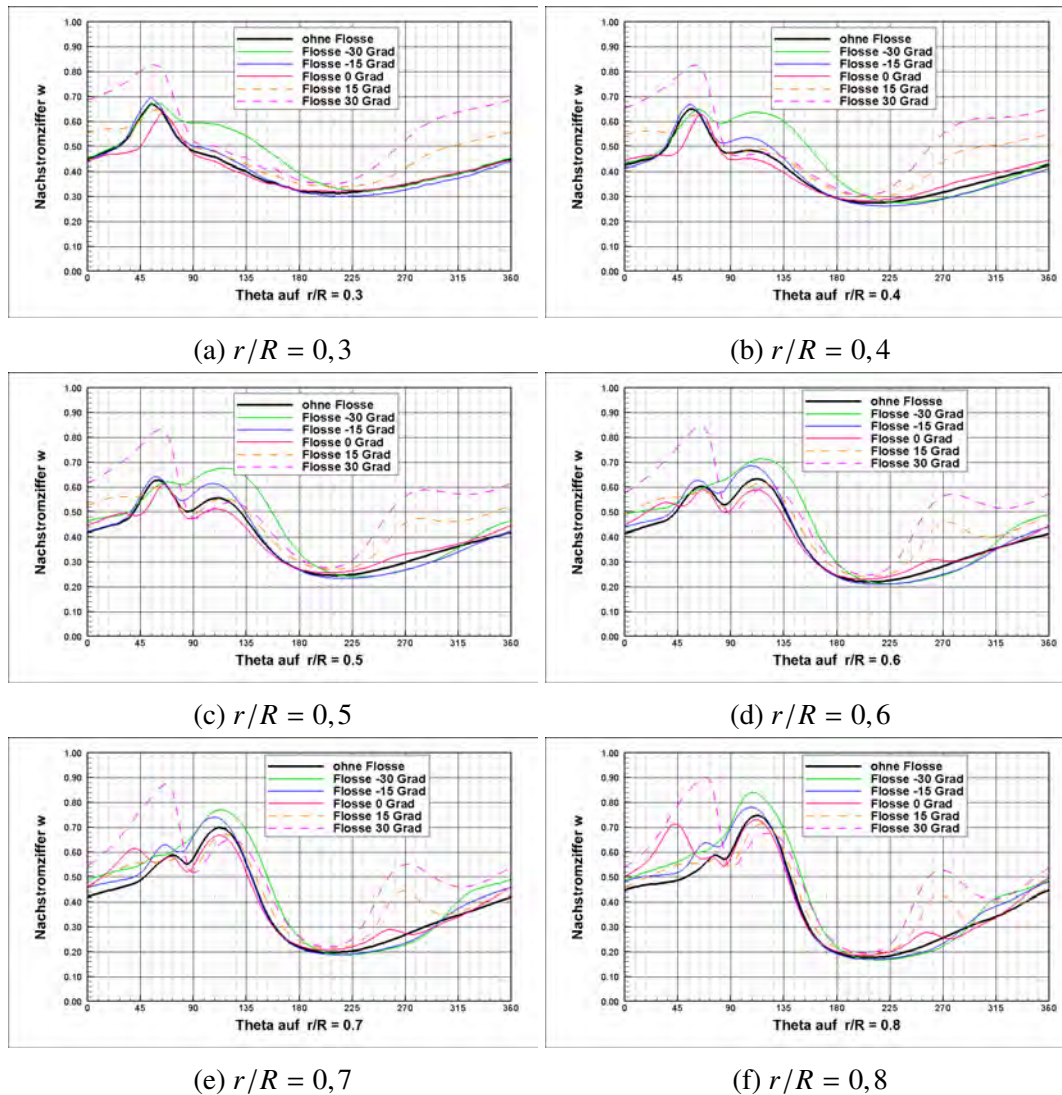


Abb. 4.27: Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1926 $h = 0,5$ m.

Die Berechnung des Gütegrades, bei dem die radialen und axialen Komponenten auf 5 Propellerradien untersucht werden, ergab eine Verbesserung des Nachstromgütegrads durch die Installation des Vortex-Generators mit einem Anstellwinkel von 15° gegenüber dem Modell ohne Flosse. Dies deckt sich mit den Untersuchungen bei geringerer Wassertiefe, ist aber bei der Auswertung der axialen Nachstromziffer in den Contourplots (Abbildung

4.26) und der Auftragung der Nachstromziffer über den Propellerdrehkreis für ausgewählte Radian (Abbildung 4.27) so nicht direkt erkennbar.

Tab. 4.6: Gütegrade des Nachstroms für das Modell M1926 bei $V_S = 1,230$ m/s und $h = 0,50$ m.

Anstellwinkel	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,716	0,948	0,755	0,643
-30°	0,701	0,930	0,754	0,608
-15°	0,694	0,939	0,739	0,615
0°	0,704	0,935	0,754	0,654
+15°	0,741	0,956	0,775	0,673
+30°	0,530	0,958	0,553	0,653

4.3.2 Nachstromfeldoptimierung am Modell M1927

Durch das Anbringen eines Vortex-Generators im Zustrom zum Propeller des ungetunnelten Binnenschiffsmodells M1927 konnte das Nachstromfeld signifikant verändert werden. Für beide untersuchten Wassertiefen und Schiffsgeschwindigkeiten sind unterschiedliche Wirkungen durch die Implementierung des Profils zu beobachten.

Betrachtet man die visuelle Darstellung des Nachstroms in der Propellerebene bei einer Wassertiefe von $h = 0,35$ m, dann werden durch die Anstellung der Flosse mit 15° und 30° die größten Veränderungen des Geschwindigkeitsfeldes in der Propellerebene induziert.

Tab. 4.7: Gütegrade des Nachstroms für das Modell M1927 bei $V_S = 1,054$ m/s und $h = 0,35$ m.

Anstellwinkel	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,581	0,875	0,664	0,678
-30°	0,647	0,934	0,692	0,696
-15°	0,674	0,951	0,709	0,717
0°	0,617	0,964	0,641	0,677
+15°	0,582	0,894	0,651	0,677
+30°	0,705	0,934	0,754	0,738

Die Analyse der auf eine skalare Kennzahl reduzierten Gütegrade kann die Erkenntnisse aus der visuellen Bewertung nicht vollständig bestätigen. Aus der Kennzahl ist abzuleiten, dass sich bei einem Flossenanstellwinkel von 15° keine Veränderungen gegenüber dem Schiff ohne Flosse ergeben. Durch den Anstellwinkel von 30° wird entsprechend der Gütegrade die Qualität des Nachstroms deutlich verbessert.

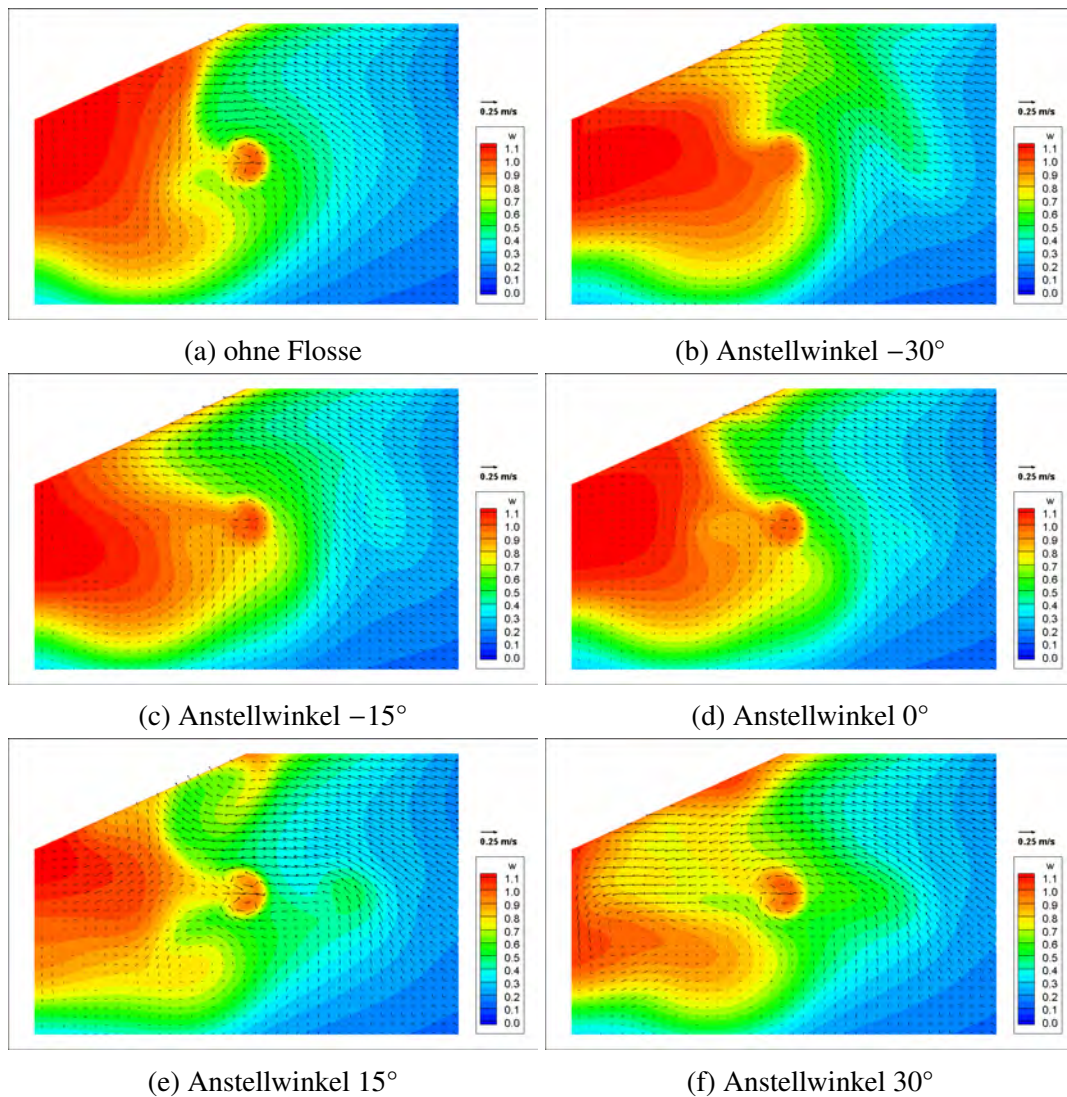


Abb. 4.28: Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1927 $h = 0,35$ m.

Tab. 4.8: Widerstände im Modellmaßstab M1927 $h = 0,35$ m.

Anstellwinkel	Fx Schiff [N]	Fx Flosse [N]	Fx gesamt [N]
ohne Flosse	40,10	-	40,10
-30°	40,62	0,84	41,46
-15°	40,30	0,22	40,52
0°	40,26	0,12	40,38
15°	39,44	0,60	40,04
30°	39,80	1,26	41,06

Die Widerstandsveränderungen durch die Installation einer Flosse sind für alle untersuchten Fälle nur gering. Teilweise wird der Gesamtwiderstand trotz des Zusatzwiderstandes der Flosse durch die veränderten Druckverhältnisse am Hinterschiff sogar reduziert. Bei dem qualitativ besten Nachstrom ergibt sich eine Widerstandserhöhung von ca. 5%.

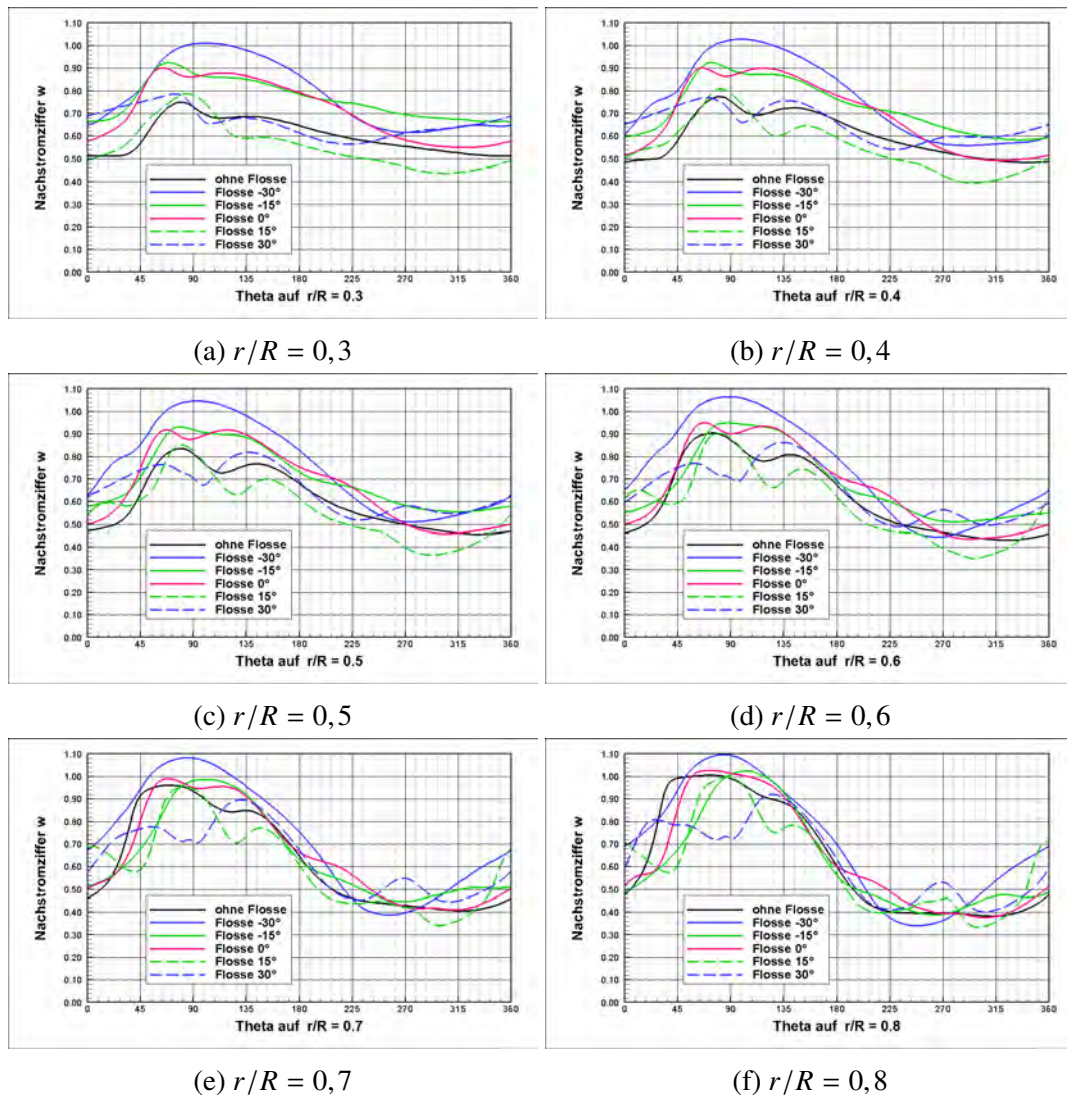


Abb. 4.29: Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1927 $h = 0,35$ m.

Die Analyse der Nachstromziffer aufgetragen über die Propellerdrehkreise lässt darauf schließen, dass sich die verbesserte Qualität des Nachstromfeldes durch den Abbau der Nachstromspitzen im Bereich 45° bis 135° ergeben.

Die Untersuchungen des Betriebspunktes $h = 0,5$ m - $V_M = 1,23$ m/s zeigen, dass durch die Installation der Flosse hohe Nachstromziffern im Bereich der Symmetrieebene des Schiffes

abgebaut werden konnten. Die Flosse bewirkt deutliche Veränderungen des Nachstromfeldes bei allen Anstellwinkeln.

Die wassertiefenabhängige Wirkung auf das Nachstromfeld durch den Flossenanstellwinkel ist deutlich zu erkennen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei geringerer Wassertiefe wird das qualitativ beste Nachstromfeld bei einem Flossenanstellwinkel von 15° erreicht. Die Verbesserungen im Zustrom zum Propeller wurden mit einer moderaten Widerstandserhöhung von ca. 1% erreicht.

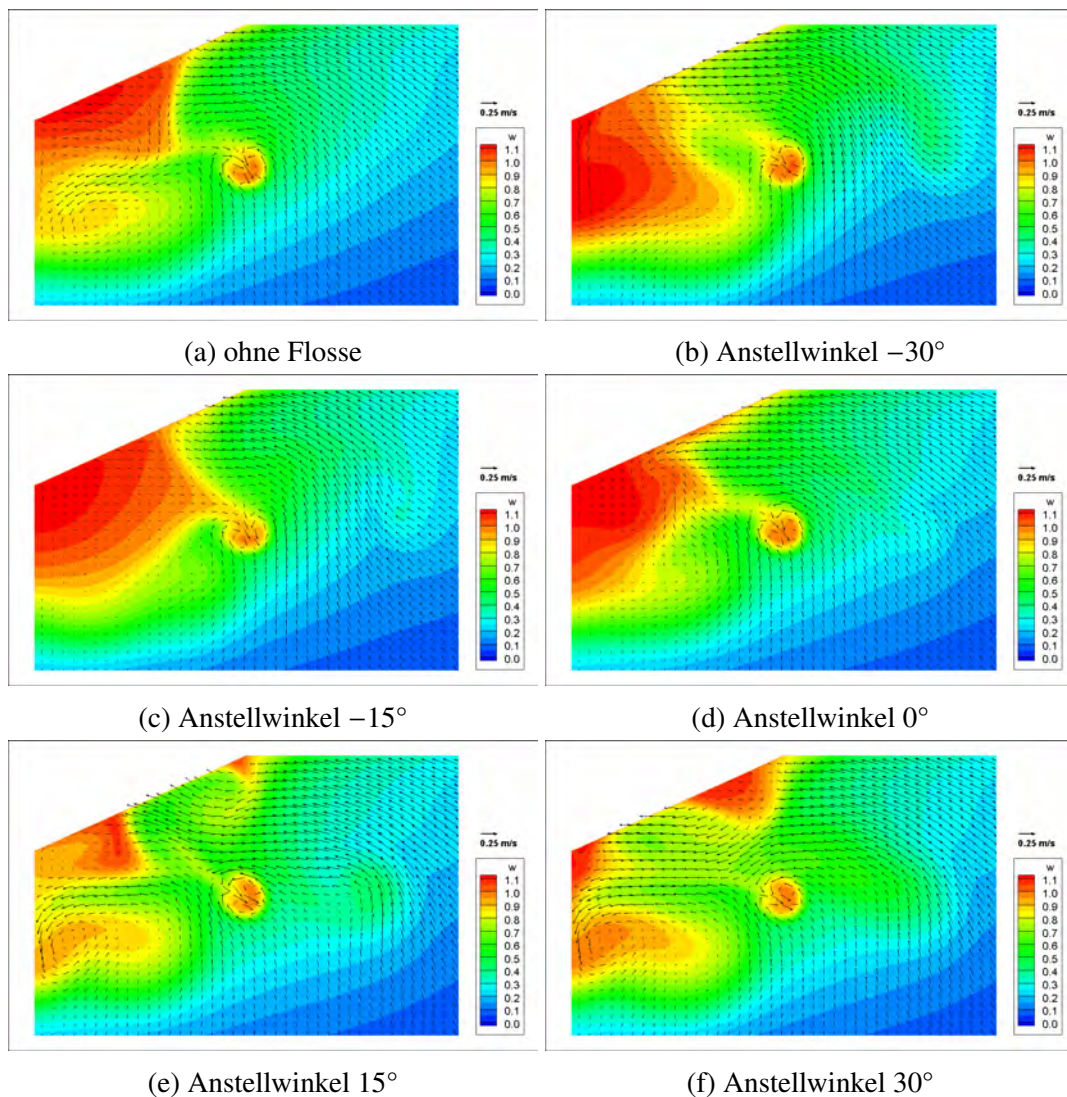
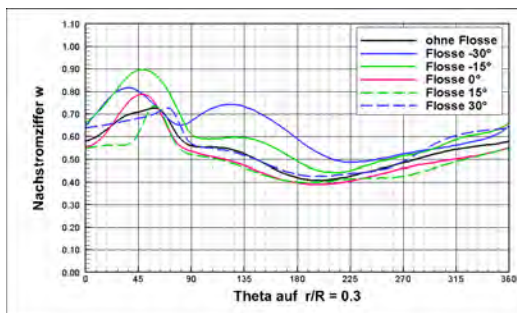


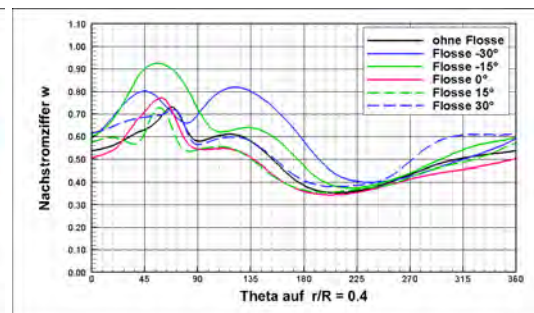
Abb. 4.30: Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel M1927 $h = 0,50$ m.

Tab. 4.9: Widerstände im Modellmaßstab M1927 $h = 0,50$ m

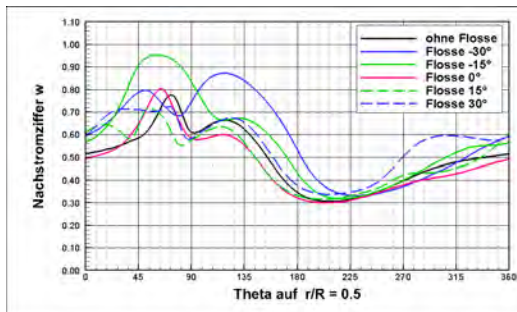
Anstellwinkel	Fx Schiff [N]	Fx Flosse [N]	Fx gesamt [N]
ohne Flosse	56,96	-	56,96
-30°	58,34	1,22	59,56
-15°	57,50	0,34	57,84
0°	56,78	0,22	57,00
15°	56,70	1,00	57,70
30°	57,54	2,12	59,66



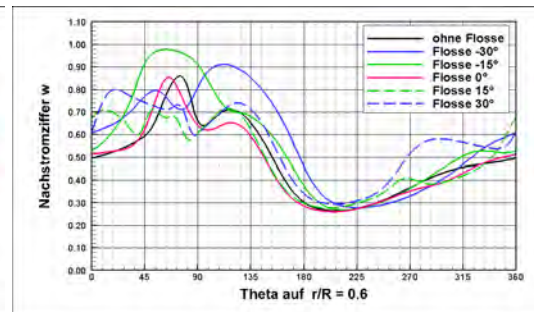
(a) $r/R = 0,3$



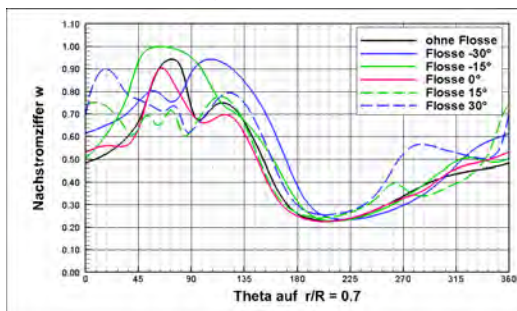
(b) $r/R = 0,4$



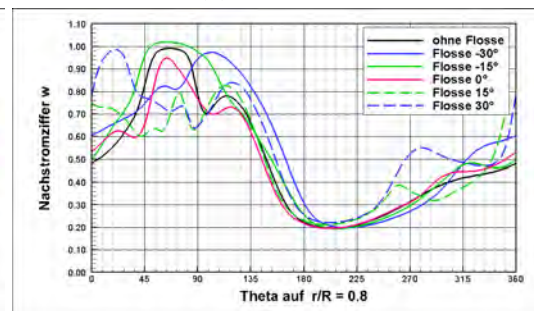
(c) $r/R = 0,5$



(d) $r/R = 0,6$



(e) $r/R = 0,7$



(f) $r/R = 0,8$

Abb. 4.31: Nachstromziffer für ausgewählte r/R M1927 $h = 0,50$ m.

Tab. 4.10: Gütegrade des Nachstroms für das Modell M1927 bei $V_S = 1,23 \text{ m/s}$ und $h = 0,50 \text{ m}$.

Anstellwinkel	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,581	0,919	0,633	0,648
-30°	0,646	0,912	0,708	0,627
-15°	0,590	0,926	0,637	0,621
0°	0,592	0,917	0,645	0,643
+15°	0,624	0,907	0,690	0,648
+30°	0,561	0,891	0,629	0,672

Die Darstellung der Gütegrade in Tabelle 4.10 zeigt, dass eine Verbesserung des Gütegrades durch verschiedene Anstellwinkel erreicht werden kann. Interessant ist auch, dass die Verfahren, die nur die axialen Geschwindigkeiten berücksichtigen, die Qualität des Nachstroms unterschiedlich bewerten. Es stellt sich die Frage, welches der qualitativ verbesserten Nachstromfelder die Effizienz des Propellers steigern kann. Diese Entscheidung ist stark abhängig vom installierten Propeller.

Für alle untersuchten Betriebszustände kann festgestellt werden, dass das Nachstromfeld gezielt beeinflusst werden kann. Diese Möglichkeit kann vorteilhaft für eine Verbesserung der Schiff-Propeller-Interaktion ausgenutzt werden.

Die Variation des Flossenanstellwinkels bei unterschiedlichen Wassertiefen kann in den Propellerentwurfsprozess integriert werden, um gewünschte Nachstromfelder zu erzeugen und dadurch die Effizienz des Propellers zu steigern und mögliche Druckschwankungen an der Außenhaut zu reduzieren.

4.3.3 Berechnung propellerinduzierter Druckschwankungen

Durch die Arbeit des Propellers in einem ungleichförmigen Strömungsfeld kommt es zu periodischen Schwingungen. Diese Schwingungen werden dadurch verursacht, dass die einzelnen Flügel Bereiche durchlaufen, in denen die Anströmgeschwindigkeit stark oder weniger stark verzögert wird. Es werden periodisch sich ändernde Kräfte und Momente erzeugt, die unter anderem auch zu Druckschwankungen führen, die auf die Außenhaut des Hinterschiffes wirken [11].

Um den Komfort im Hinterschiff zu verbessern, ist es notwendig, propellerinduzierte Druckschwankungen zu minimieren bzw. zu verhindern. Dies kann durch eine Homogenisierung des Propellerzustroms erreicht werden. Die Flügel sollten bei einer Umdrehung mit möglichst gleichen Geschwindigkeiten angeströmt werden.

In diesem Projekt wurden dynamische Vortex-Generatoren entwickelt, die das Nachstromfeld gezielt verändern. Ob die erreichten positiven Veränderungen des Geschwindigkeitsfeldes auch eine Wirkung auf die Druckschwankungen am Schiff haben, soll durch instationäre CFD-Untersuchungen überprüft werden.

Dazu wurde ein Volumengitter mit der realen Propellergeometrie des Modells des Propellers P258 am Hinterschiff integriert und bei einer Drehzahl, die einen Schub entsprechend dem Gesamtwiderstand des Schiffes induziert, betrieben.

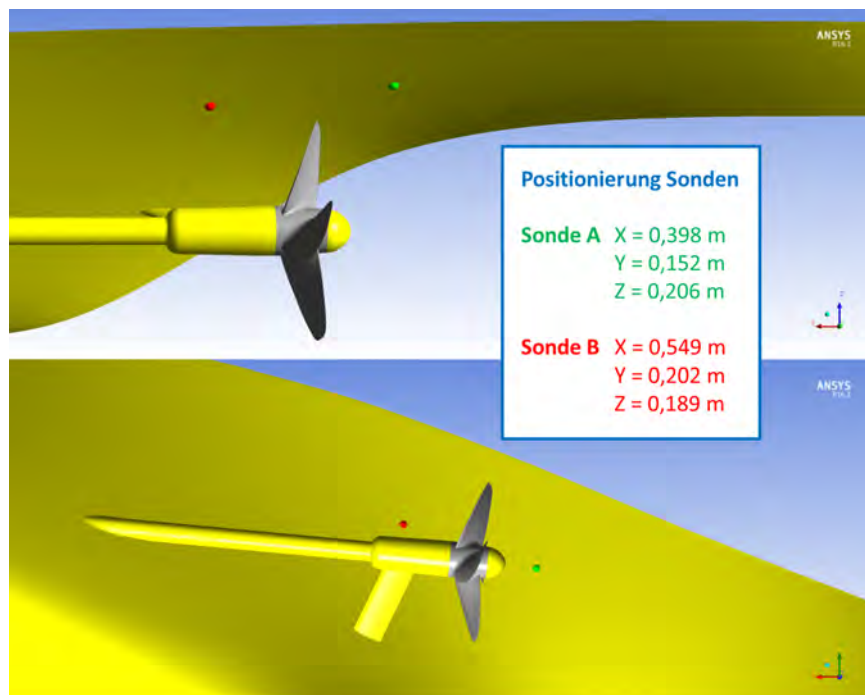


Abb. 4.32: Positionierung der Drucksonden am Rumpf zur Auswertung der CFD-Berechnungen.

Durch die „Installation“ von Drucksonden an zwei ausgewählten Positionen, die in der Abbildung 4.32 rot und grün markiert sind, konnten die Druckschwankungen, die bei der Drehung des Propellers auftreten, gemessen werden.

Die instationäre Simulation des drehenden Propellers ist sehr rechenintensiv, da der Zeitschritt so gewählt werden muss, dass alle Effekte im Raum und der Zeit erfasst werden können. Aus diesem Grund beschränkten sich die Berechnungen auf drei Propellerumdrehungen. Als Startlösung wurde die durch das „Frozen-Rotor-Verfahren“ ermittelte Lösung genutzt.

Bei den Berechnungen kam es zu starken propellerblattunabhängigen Druckschwankungen, die sich erst nach einem Vorlauf von zwei Propellerumdrehungen stabilisierten. Die Drücke an den beiden Messstellen wurden aus den Ergebnissen der letzten Umdrehung ermittelt. Da

der installierte Propeller ein 4-Flügler ist, wurde der Druck nur für den letzten Quadranten der Umdrehung des Propellers aufgetragen.

Die Auswertung der Schwankungen zeigte, dass die Integration einer Flosse im Zustrom zum Propeller die Druckverhältnisse am Hinterschiff beeinflussen kann. In den Abbildungen 4.33 und 4.34 sind die Drücke für beide Sonden für die Berechnungen mit und ohne Flosse dargestellt.

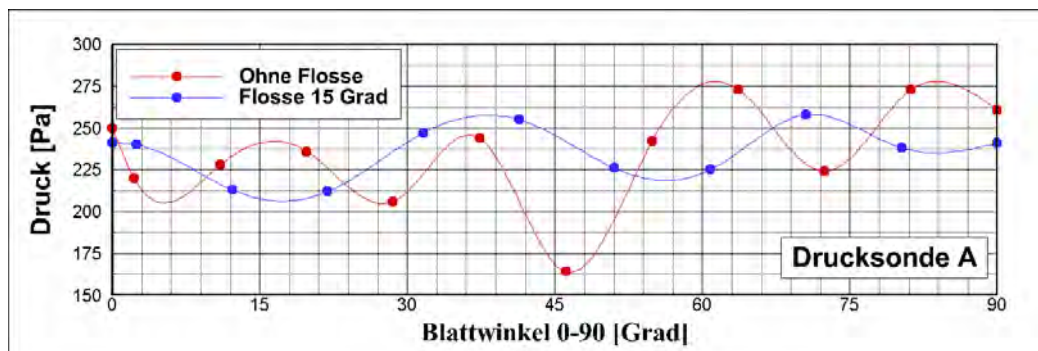


Abb. 4.33: Druckimpulse am Schiffsrumpf Sonde A.

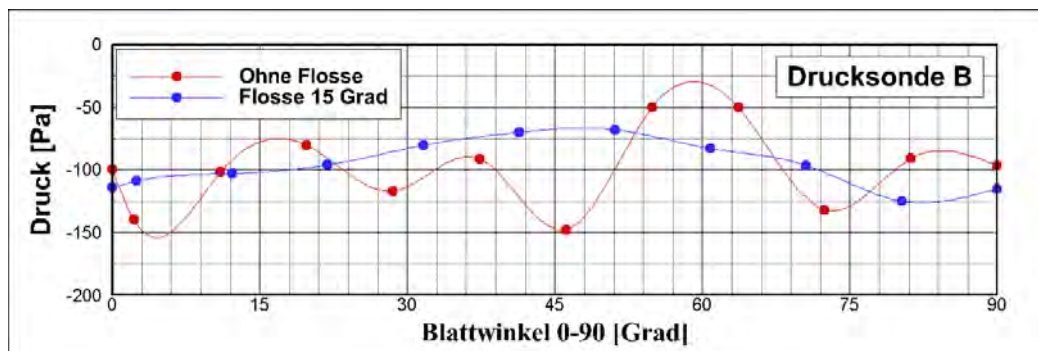


Abb. 4.34: Druckimpulse am Schiffsrumpf Sonde B.

Insbesondere vor dem Propeller (Abbildung 4.34 konnten die Druckschwankungen gegenüber den Berechnungen ohne Flosse reduziert werden. Hinter dem Propeller sind immer noch Schwankungen des Drucks messbar, jedoch wurde die Druckamplitude verringert.

Die instationären Berechnungen haben gezeigt, dass die Druckverhältnisse am Hinterschiff durch die Integration eines Vortex-Generators im Zustrom zum Propeller positiv beeinflusst werden können.

4.4 Numerische Untersuchungen für die Großausführung

Für den Modellmaßstab $\lambda = 10$ konnte der Zustrom zum Propeller durch den Anbau von Vortex-Generatoren maßgeblich verändert werden. Es wurden Vortex-Generatoren entworfen, die mit einem wassertiefenabhängigen Anstellwinkel für die jeweilige Wassertiefe und Schiffsgeschwindigkeit die Qualität des Nachstroms optimieren können.

Im Vorfeld der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass für den Modellmaßstab ein Längen-Breitenverhältnis des Profils von 0,75 den Einfluss auf das Geschwindigkeitsfeld in der Propellerebene maximiert. Verkürzte Varianten hatten nur geringe Wirkungen auf den Nachstrom zur Folge.

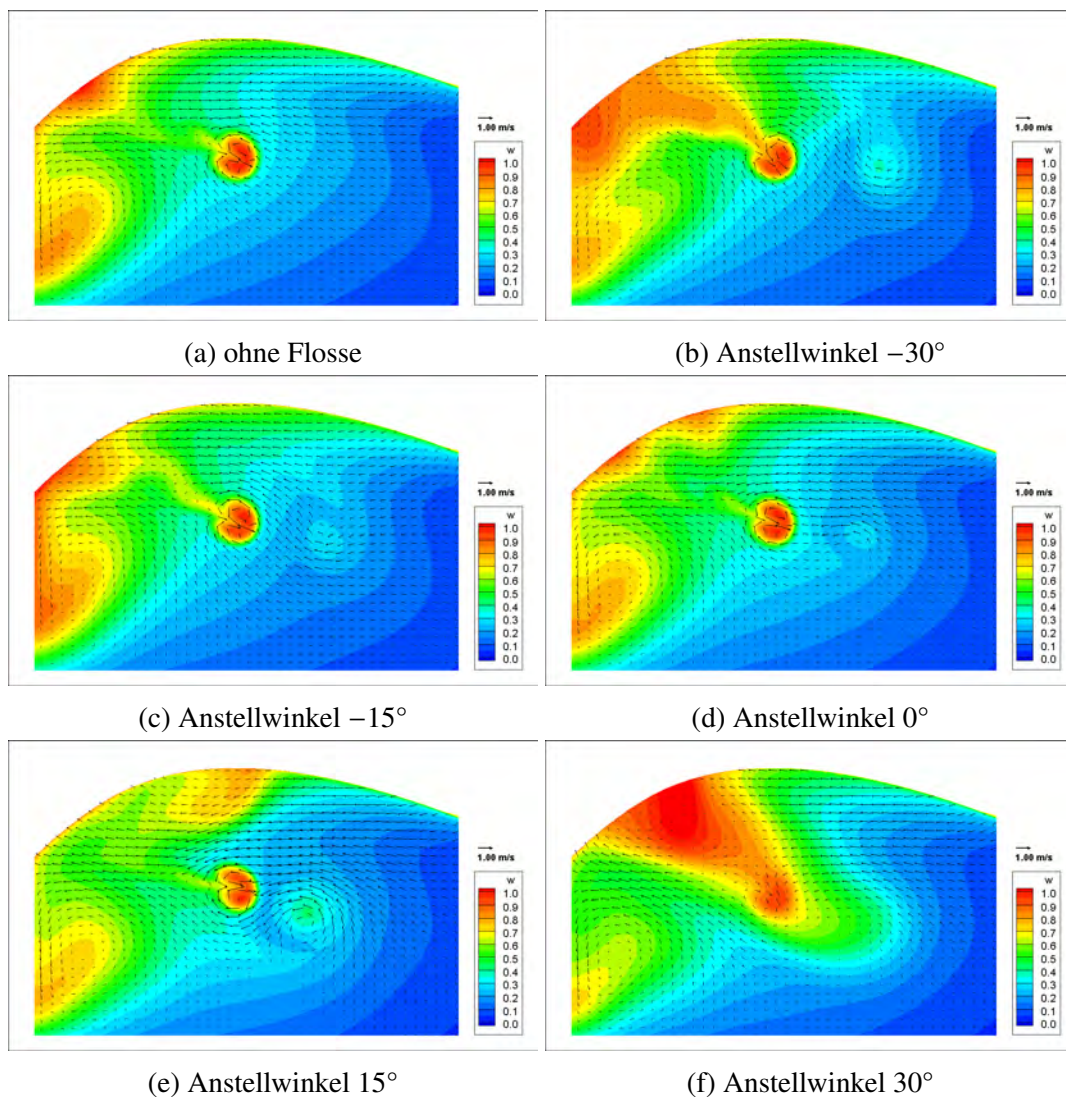


Abb. 4.35: Nachstromziffer für ausgewählte Anstellwinkel Großausführung M1926 $h = 3,5$ m.

Wie allgemein bekannt, sind die Nachstromfelder im Modellmaßstab und in der Großausführung nicht identisch. Dies ist begründet in der unterschiedlichen Ausbildung der Grenzschicht infolge des mit wachsender Reynoldszahl sinkenden Einflusses der Viskosität.

Die Ergebnisse von skalierten Versuchen mit Schiffsanhängen sind in der Regel stark maßstabsabhängig. In wieweit diese Tatsache auf die Wirkung der Flosse am Hinterschiff des realen Schiffes im Vergleich zum Modell gilt, wurde durch numerische Berechnungen mit den Großausführungen der Binnenschiffsmodelle untersucht.

In einer ersten CFD-Versuchsreihe wurden die Abmessungen des Profils in Länge und Ausdehnung maßstäblich übernommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Abbildungen 4.35 bis 4.36 für eine Wassertiefe zusammengefasst.

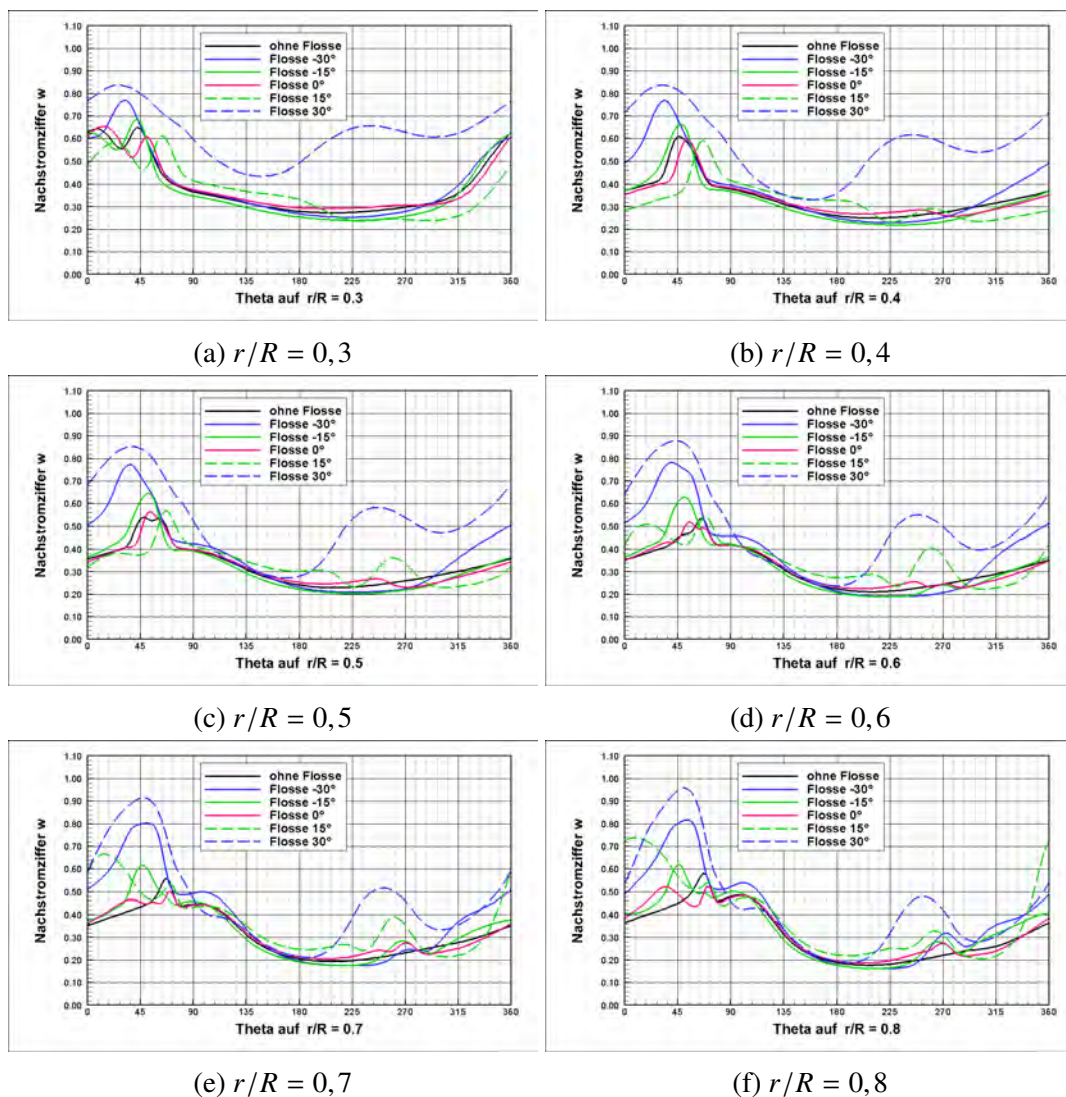


Abb. 4.36: Nachstromziffer für ausgewählte r/R Großausführung M1926 $h = 3,5$ m

Vergleicht man die visualisierten Nachstromfelder der Großausführung mit denen des Modellmaßstabes (siehe Seite 61 und 62), zeigen sich deutliche Unterschiede der Flossenwirkung auf das Geschwindigkeitsfeld. In der Propellerebene der Großausführung sind deutlich die durch die Flosse induzierten Wirbel zu erkennen. Diese sind jedoch so lokalisiert, dass sie kontraproduktiv auf den Nachstrom wirken.

Bei der Auswertung der Gütegrade im Nachstrom der GA ergaben sich kaum Verbesserungen in der Qualität. Für den Flossenwinkel von 0° wurden die besten Kennziffern ermittelt.

Tab. 4.11: Gütegrade des Nachstroms für die Großausführung M1926 bei $V_S = 3,333$ m/s und $h = 3,5$ m.

Anstellwinkel	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,711	0,980	0,726	0,675
-30°	0,585	0,954	0,613	0,588
-15°	0,658	0,971	0,678	0,642
0°	0,729	0,971	0,750	0,680
$+15^\circ$	0,685	0,965	0,710	0,672
$+30^\circ$	0,646	0,975	0,662	0,635

Die Analyse des gesamten Geschwindigkeitsfeldes und der Stromlinien am Hinterschiff ergab, dass der gewünschte induzierte Wirbel nicht die Zielbereiche in der Propellerebene erreicht. Durch die Variation der Profillänge konnte der Wirbelkern gezielt verschoben werden.

Die besten Kenngrößen für die Güte des Nachstroms wurden durch eine Halbierung der Flossenlänge erreicht (Längen-Breiten-Verhältnis 1,5). Wie bei den Modellmaßstabsberechnungen mit dem Modell M1926 bei einer Wassertiefe von $h = 0,35$ m zeigten alle Auswertemethoden, dass die Integration des Profils mit einem Anstellwinkel von 15° die Qualität des Nachstrom im Propellerdrehkreis deutlich verbessert.

Die Widerstandserhöhung durch die Flosse liegt im Bereich von ca. 2% und sollte durch Effizienzsteigerung des Antriebes und durch eine Verbesserung des Komforts im Hinterschiff kompensiert werden.

Tab. 4.12: Vergleich Gütegrad Großausführung M1926 bei $V_S = 3,333$ m/s und $h = 3,5$ m - Längenvariation Flosse.

Flossenlänge [m]	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,711	0,980	0,726	0,675
1,00	0,685	0,965	0,710	0,672
0,75	0,703	0,966	0,728	0,715
0,50	0,782	0,973	0,804	0,690
0,25	0,717	0,979	0,732	0,656
0,15	0,682	0,982	0,695	0,654

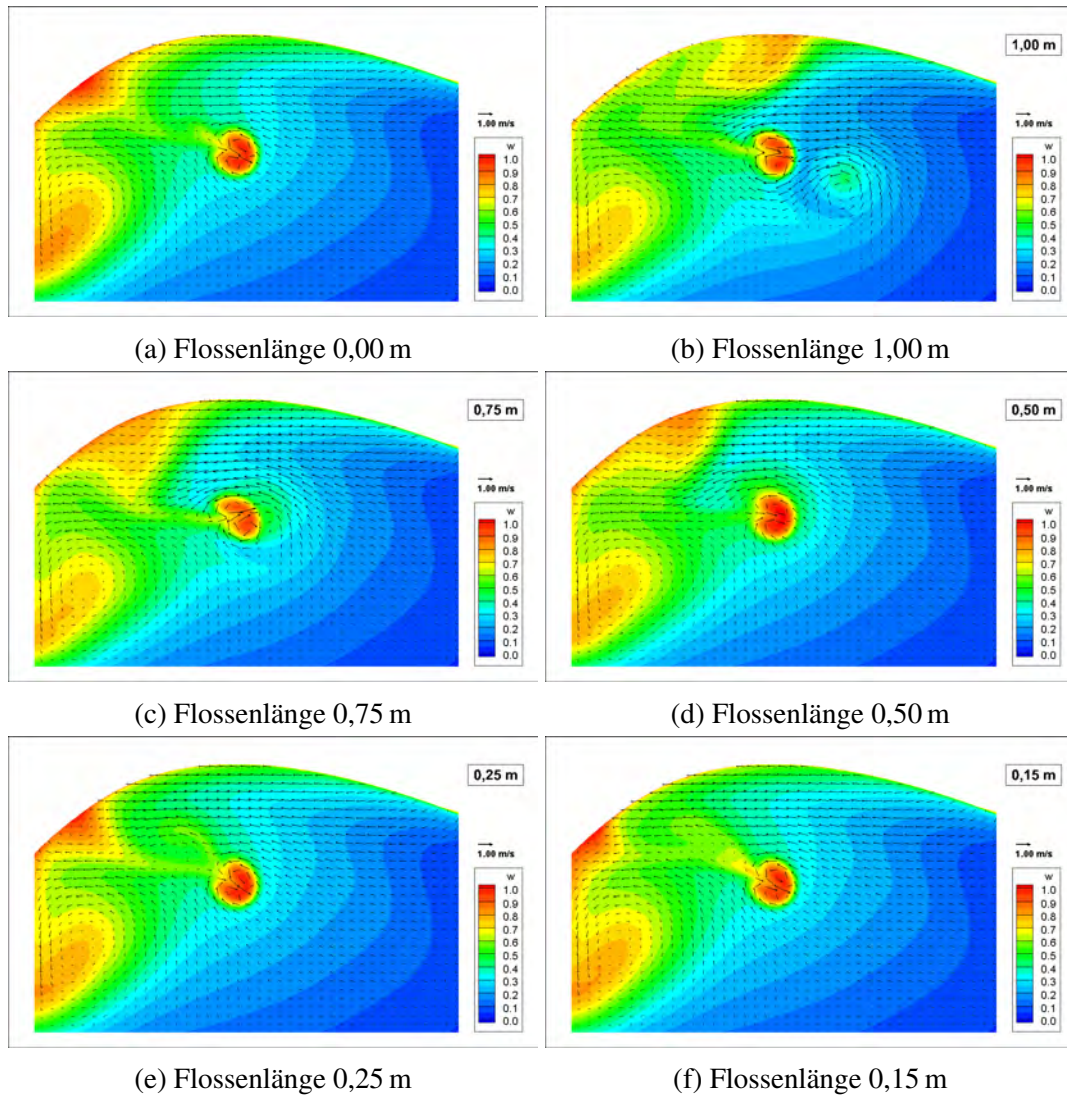


Abb. 4.37: Nachstromziffer für 5 Flossenlängen Großausführung M1926 $h = 3,5$ m.

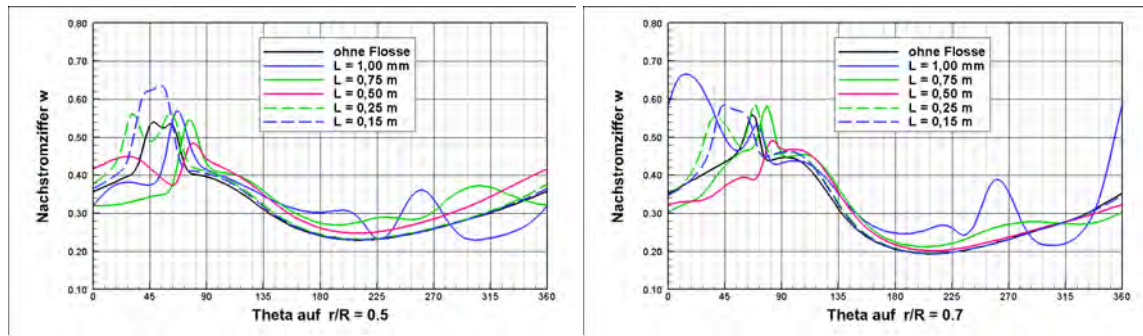


Abb. 4.38: Vergleich Nachstromziffer auf Propellerdrehkreis für Flossenlängen in GA.

Aus den numerischen Untersuchungen im Modellmaßstab und in der Großausführung konnten zusammengefasst folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Beeinflussung des Nachstromfeldes mit Vortex-Generatoren möglich
- Schiffsabhängige Anpassung der Flosse notwendig
- Flossenentwurf für jeden Hauptbetriebszustand
- Integration der Nachstromanpassung in Propellerentwurfsprozess
- Korrektur der Maßstabeffekte durch Längenvariation der Flosse
- Numerischer Flossenentwurf in der Großausführung

Auf Grund der Komplexität des Nachstroms, dessen qualitativer Bewertung und der nicht zu unterschätzenden Bedeutung für einen effizienten, schwingungsminimierten Antrieb, ist eine enge Vernetzung von Schiffs- und Propellerentwurf bei der modellspezifischen Anpassung der Vortex-Generatoren unabdingbar.

Unter der Beachtung dieser Erkenntnisse ist eine erfolgreiche Verbesserung der Schiff-Propeller-Interaktion durch die Integration von Vortex-Generatoren im Zustrom zum Propeller möglich.

5 Nachweis der Funktion im Modellversuch

Im Kapitel 4 auf Seite 47 wurde der CFD-gestützte Entwurf eines einfachen Flossenprofils und der Optimierung der Position beschrieben. Die CFD-Simulationen sagen eine positive Einflussnahme der Flosse auf den Zustrom des Propellers vorher. Diese Beeinflussung wurde im Folgenden in Modellversuchen überprüft. Der Nachweis erfolgte hier einerseits anhand von PIV-Messungen, die den Vergleich der simulierten nominellen Nachstromfelder erlauben. Andererseits wurden mit dem getunnelten Hinterschiff auch Propulsionsversuche gefahren. Bei diesen Versuchen wurden zahlreiche Messfahrten mit konstanter Drehrate des Propellers durchgeführt. Hierbei wurden sämtliche Messgrößen einschließlich zweier Drucksonden in der Außenhaut in Propellernähe mit einer Abtastrate von 2,5 kHz aufgezeichnet und mit einer Fourieranalyse ausgewertet. So konnte der Einfluss der Flosse auf die Schwankung einzelner Größen mit der Propellerblatt-Frequenz analysiert werden, was ein Maß für den Komfort an Bord des Schiffs darstellt.

5.1 PIV-Messungen zur Flossenwirkung

Da PIV-Versuche sehr aufwendig und zeitintensiv sind, wurden die Messungen des nominellen Nachstroms nur bei ausgewählten Bedingungen durchgeführt. Neben den PIV-Messungen ohne Flosse wurden zwei Messreihen an dem getunnelten Modell (M1926) mit einer Variation des Flossenanstellwinkels gewählt. Die erste wurde für eine Geschwindigkeit von 1,230 m/s und ein h/T -Verhältnis von 2 mit Flosse bei einem Anstellwinkel von -15° , 0° , $+15^\circ$ und $+30^\circ$ durchgeführt. Die zweite bei einer Geschwindigkeit von 1,054 m/s, einem h/T -Verhältnis von 1,4 mit einem Anstellwinkel der Flosse von -30° , -15° , 0° , $+15^\circ$ und $+30^\circ$. Die Messreihen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Für jede Messung wurden je zwei Vektorbilder in der Propellerebene gemittelt, was einer räumlichen Mittelung über 12,30 mm bzw. 10,54 mm (für $V_M = 1,230$ m/s bzw. $V_M = 1,054$ m/s) und einer zeitlichen Mittelung von 10 ms entspricht. Pro Messbedingung wurden bis zu zwölf Fahrten durchgeführt, über die wiederum gemittelt wurde.

Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse aus den PIV-Messungen zum nominellen Nachstrom der oben beschriebenen Messreihen diskutiert werden. Die Ergebnisse sind als

Tab. 5.1: Übersicht der durchgeführten Messreihen zur Bestimmung des nominellen Nachstroms

Modell-Nr.	Geschwindigkeit [m/s]	Winkel der Flosse	h/T
M1926	1,230	ohne	2
M1926	1,230	-15 °	2
M1926	1,230	0 °	2
M1926	1,230	+15 °	2
M1926	1,230	+30 °	2
M1926	1,054	ohne	1,4
M1926	1,054	-30 °	1,4
M1926	1,054	-15 °	1,4
M1926	1,054	0 °	1,4
M1926	1,054	+15 °	1,4
M1926	1,054	+30 °	1,4

Contourplots der Nachstromziffer dargestellt und enthalten die Geschwindigkeiten in der Ebene als Vektorfeld. Des Weiteren wurde der Gütegrad des Nachstroms nach der SVA-Methode sowie mit dem erweiterten Kriterium nach Fahrbach bestimmt, wie in Kapitel 1.5 beschrieben.

In Abbildung 5.1 sind die Nachstromverteilungen für verschiedene Anstellwinkel der Flosse bei einer Geschwindigkeit von 1,23 m/s und einem h/T -Verhältnis von 2 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Beeinflussung des Nachstromfelds durch den induzierten Wirbel der Flosse. Es erfolgt bei allen Messungen mit Flosse eine zusätzliche Durchmischung der Gebiete mit ausgeprägtem und schwachem Mitstrom.

Eine Bewertung der Qualität der Nachstromfelder anhand der grafischen Darstellung ist nicht ohne Weiteres möglich. Die Wechselwirkung zwischen Rumpf und Propulsionsorgan ist zu komplex, was auch die Betrachtung nachstehender Zusammenhänge zeigt. Der Propulsionsgütegrad η_D ist definiert durch das Verhältnis der Schleppleistung $P_E = R_T V$, die beispielsweise aus dem Widerstandsversuch bekannt ist, zur Drehleistung $P_D = 2\pi n Q$ im Selbstpropulsionspunkt. Gleichzeitig lässt sich die Interaktion auch durch eine Aufteilung des Propulsionsgütegrads in weitere Güte- bzw. Wirkungsgrade darstellen:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \eta_0 \eta_R \eta_H. \quad (5.1)$$

Hier ist η_H der sogenannte Schiffseinflussgrad, der die Sogwirkung des Propulsionsorgans auf den Rumpf und den Einfluss des Rumpfs auf den Propellerzustrom in Form der Nachstromziffer ins Verhältnis setzt

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}. \quad (5.2)$$

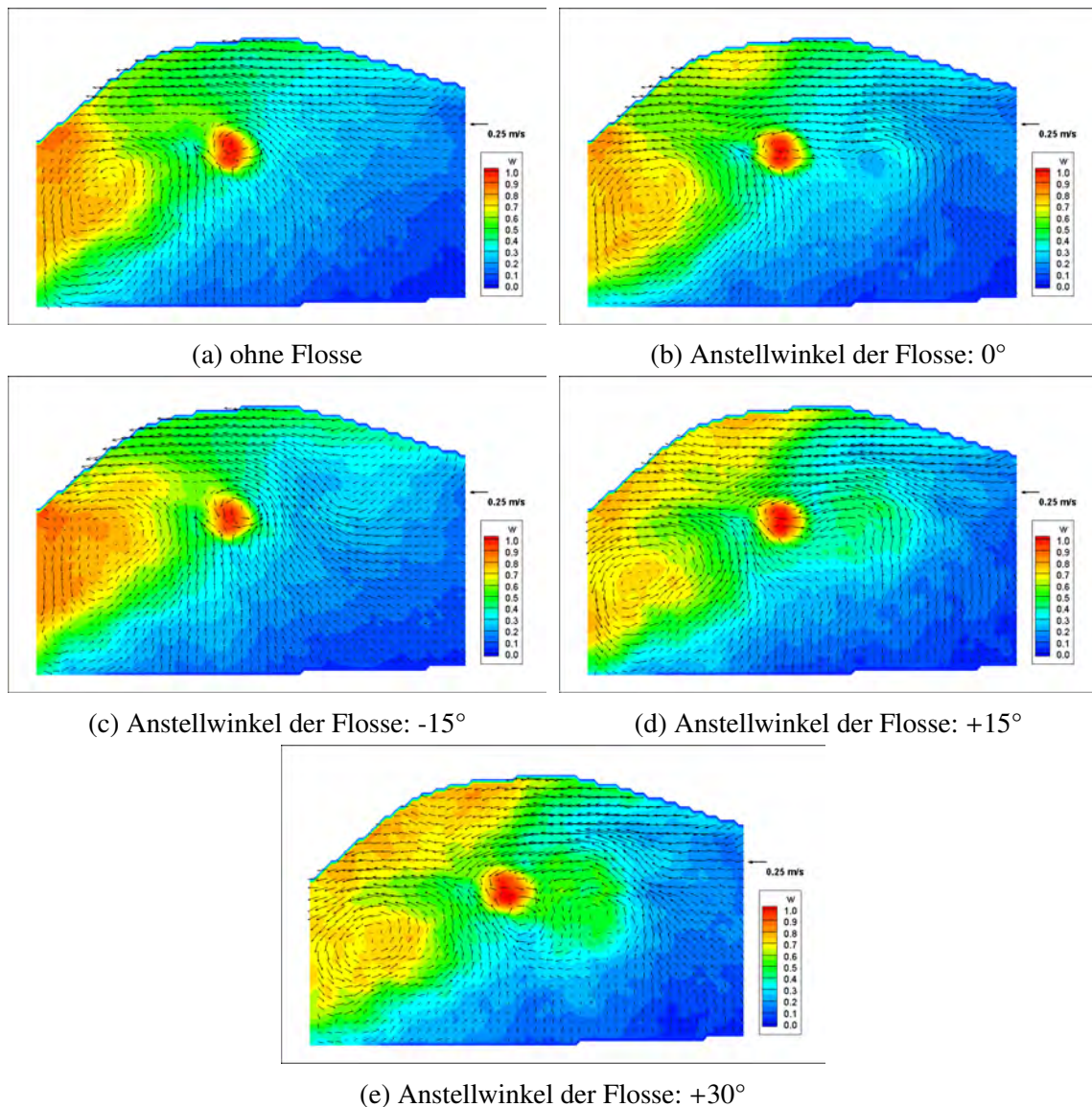


Abb. 5.1: Nachstromverteilung für das Modell M1926 mit $V_M = 1,230$ m/s und $h/T = 2$

Die Kenngröße η_R wird als Gütegrad der Anordnung bezeichnet. Er ist definiert durch das Verhältnis der Drehmomente bei gegebenem Fortschrittsgrad J aus Freifahrtversuch und in der Anordnung hinter dem Schiff. η_0 ist der Wirkungsgrad des Propellers unter Freifahrtbedingungen, also in ungestörter homogener Anströmung.

Da gerade die Wechselwirkung aus Sog und Nachstrom sowie zwischen dem Vordrall der Strömung mit dem Propeller kaum abzuschätzen ist, erscheint die Bewertung von Nachstromfeldern mit einem einzigen Skalar sehr attraktiv. Genau diese Bewertung versuchen die Methoden der SVA und nach Fahrbach, die in Kapitel 1.5.2 auf Seite 9 näher beschrie-

ben wurden. Die Ergebnisse der entsprechenden Auswertung sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Anhand dieser Bewertung lässt sich nach der klassischen Methode der SVA erkennen, dass sich positive Anstellwinkel positiv auf den Gütegrad des Nachstroms auswirken. Betrachtet man jedoch das erweiterte Kriterium nach Fahrbach, so erhält die Anordnung ohne Flosse die beste Bewertung.

Eine analoge Versuchsreihe und Analyse erfolgte für die kleinere Wassertiefe entsprechend $h = 3,50$ m in der Großausführung mit einer Geschwindigkeit von 12 km/h bzw. 1,054 m/s im Modell. In Abbildung 5.2 sind die Nachstromverteilungen für verschiedene Anstellwinkel der Flosse für das h/T -Verhältnis von 1,4 dargestellt. Die dazugehörigen Gütegrade sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tab. 5.2: Zusammenfassung der Gütegrade des nominellen Nachstroms für das Modell M1926 bei $V_M = 1,230$ m/s und $h/T = 2$

Winkel der Flosse	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,739	0,968	0,764	0,664
-15°	0,715	0,967	0,739	0,627
0°	0,699	0,913	0,766	0,672
+15°	0,662	0,903	0,733	0,682
+30°	0,631	0,900	0,702	0,687

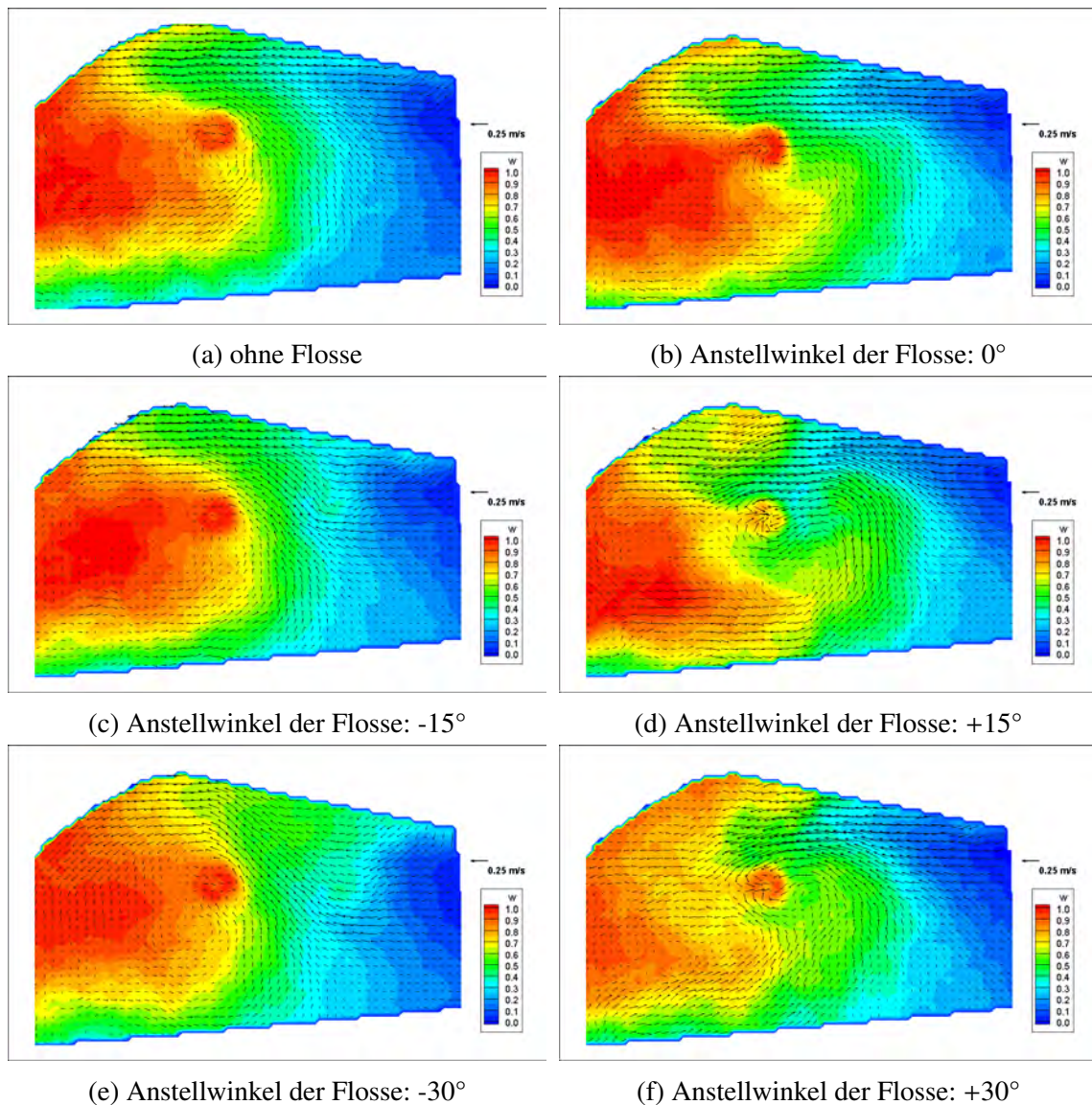


Abb. 5.2: Nachstromverteilung für das Modell M1926 mit $V_M = 1,054 \text{ m/s}$ und $h/T = 1,4$

Bei Betrachtung von Abbildung 5.2 erkennt man anhand der großen rot dargestellten Bereiche im Contourplot den mit abnehmender Wassertiefe erheblich schlechter werdenden Nachstrom. Auch hier ist der Einfluss der Flosse unter verschiedenen Anstellwinkeln deutlich zu erkennen. Mit wachsenden positiven Anstellwinkeln kann ein Teil des viskos bedingten Mitstroms hinter dem Modell kompensiert werden. Hier transportiert der induzierte Wirbel des Tragflügels Wasser mit größerer Relativgeschwindigkeit von den Außenbereichen in Richtung Totwasser im Mittschiffsbereich.

Betrachtet man jedoch die Gütegrade in Tabelle 5.3, ergibt sich eine andere Bewertung. Hier führen positive Anstellwinkel im erweiterten Kriterium zu einer erheblichen Verschlechterung des Gütegrads. Stattdessen werden negative Anstellwinkel positiver bewertet, als der Referenzzustand ohne Flosse. Die SVA-Methode bewertet tendenziell Anstellwinkel in beide Richtungen als günstiger als den Ausgangszustand.

Tab. 5.3: Zusammenfassung der Gütegrade des nominellen Nachstroms für das Modell M1926 bei $V_M = 1,054$ m/s und $h/T = 1,4$

Winkel der Flosse	η_N	η_R	η_U	η_{SVA}
ohne	0,632	0,963	0,656	0,685
-30°	0,682	0,956	0,714	0,711
-15°	0,642	0,973	0,660	0,703
0°	0,562	0,917	0,613	0,659
+15°	0,576	0,866	0,665	0,711
+30°	0,602	0,897	0,670	0,752

5.2 Propulsionsversuche

Die experimentelle Untersuchung der nominellen Nachstromfelder anhand von PIV-Messungen zeigte zwar deutlich die Wirkung der Flosse, jedoch ließ sie keine eindeutige Bewertung zu. Die gleiche Schwierigkeit der Bewertung hätte sich auch für PIV-gemessene effektive Nachstromfelder ergeben. Zudem hatten vorangehende Versuche mit dem ersten PIV-Aufbau (siehe Abbildung 2.6 auf Seite 22) gezeigt, wie aufwändig und schwierig die Messungen des effektiven Nachstroms unter gegebenen optischen Randbedingungen sind.

Daher wurde für die weitere Bewertung der erzielten Beeinflussung des Propellerzustroms mit einem einfachen Tragflügelprofil auf weitere PIV-Messungen verzichtet. Stattdessen wurden Propulsionsversuche mit dem ungetunnelten Hinterschiff M1927 durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen mit unterschiedlichen Konfigurationen zu gewährleisten, wurde hier nicht, wie sonst zur Identifikation des Selbstpropulsionspunkts üblich, die Drehrate variiert. Innerhalb einer Wassertiefe wurden alle Versuche mit identischer und konstanter Drehrate gefahren und der Schubüberschuss in der Verbindung zum Schleppwagen wurde gemessen. Die Fahrten auf 350 mm Wassertiefe mit einer Geschwindigkeit von 1,054 m/s wurden mit einer Drehrate von 12 Hz gefahren. Bei 500 mm Wassertiefe und Geschwindigkeit 1,230 m/s lag die Drehrate des Selbstpropulsionspunkts bei 11,2 Hz.

Abbildung 5.3 zeigt exemplarisch die aus Drehleistung und Schubüberschuss-Leistung ermittelte Gesamtleistung des Modells bei 500 mm Wassertiefe. Auch wenn die Wiederholungsmessungen bei -22,5° und -30° Flossenwinkel eine gewisse Streuung zeigen, lässt

sich erkennen, dass der Leistungsbedarf durch die Flosse, wenn überhaupt, nur geringfügig erhöht wird. Eine mögliche Energieeinsparung kann entsprechend erwartungsgemäß nur indirekt durch einen an den veränderten Nachstrom angepassten Propellerentwurf erreicht werden. Die Streuung ist auf eine nicht vollständige Beruhigung der Wellen im Tank zurückzuführen, die sich bei der großen Modellmasse und der großen Anzahl der Versuchsfahrten und entsprechend begrenzter Wartezeit nicht vermeiden ließ.

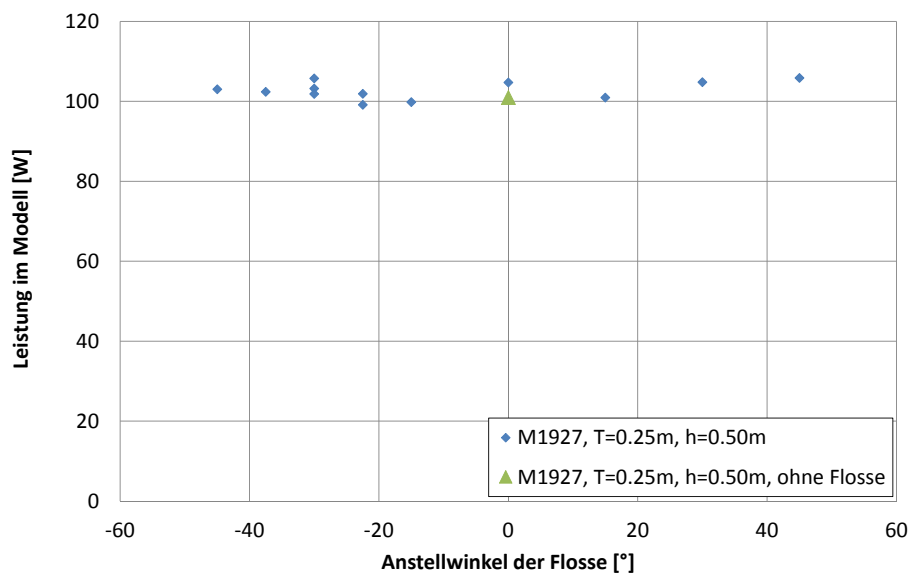


Abb. 5.3: Auftragung des aus Drehleistung und Schubüberschuss-Leistung ermittelten Leistungsbedarfs des Modells im Selbstpropulsionspunkt bei verschiedenen Flossenwinkeln sowie ohne Flosse.

Für eine detailliertere Bewertung wurden sämtliche Kenngrößen im Propulsionsversuch mit einer Abtastrate gemessen, die mit 2,5 kHz weit über der Frequenz von Ereignissen mit Blattfrequenz liegt. In Abbildung 5.4 ist exemplarisch der zeitliche Verlauf des gemessenen Schubs ohne Flosse über einen Zeitraum von 5 s aufgetragen. Es ist zwar eine deutliche Fluktuation des Signals zu erkennen, doch eine eindeutige Bewertung und ein Vergleich mit dem Verlauf bei anderen Konfigurationen mit variierten Flosseneinstellungen wird erst durch eine Fourieranalyse möglich. Andere Messgrößen, wie das Drehmoment oder die Drucksonden, zeigen einen ähnlichen charakteristischen Verlauf, weisen jedoch ein höheres Grundrauschen auf. Daher wurde die Fourieranalyse ebenfalls für alle Messreihen des Propellerschubs durchgeführt. Abbildung 5.5 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

Zunächst ist deutlich zu erkennen, dass die propellerinduzierten Schwingungen, die den Komfort an Bord der Schiffe beeinflussen, mit geringerer Wassertiefe erheblich zunehmen. Ursächlich hierfür ist die zunehmende Versperrung des Querschnitts zwischen Schiff und Gewässersohle, welche die Zustromgeschwindigkeit im Mittschiffsbereich stark reduziert. Ohne Flosse verdoppelt sich die Schwingungsamplitude beim Übergang von 500 mm Wassertiefe auf 350 mm nahezu. Bei der kleinen Wassertiefe führt die Installation der Flosse

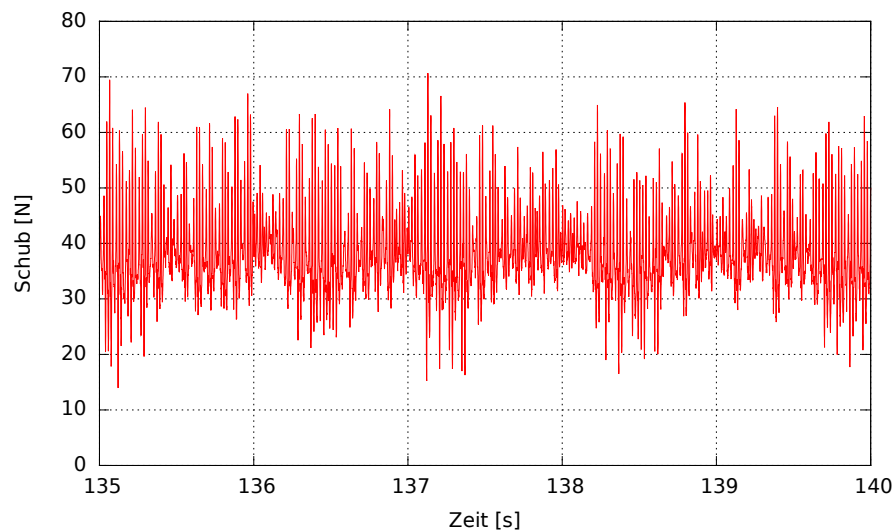


Abb. 5.4: Zeitverlauf des gemessenen Schubs bei $h = 350$ mm.

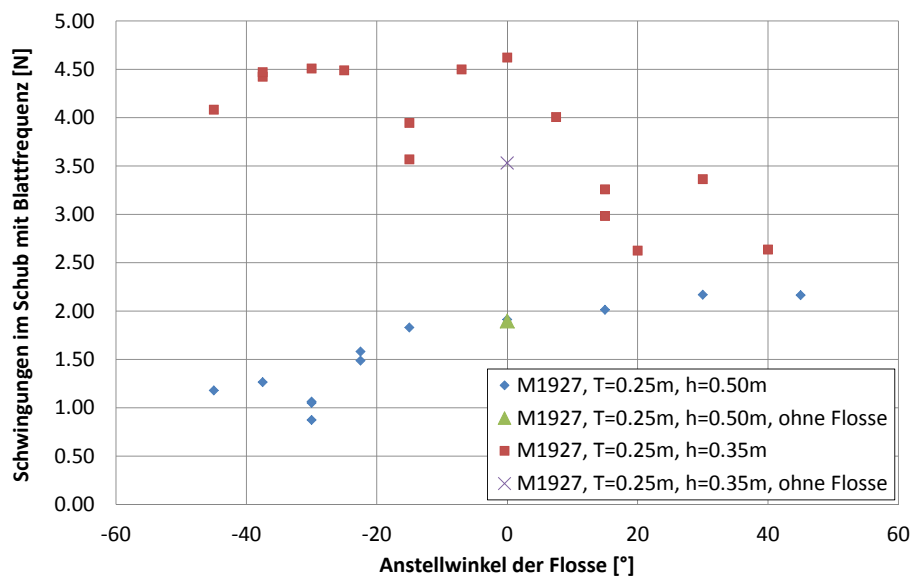


Abb. 5.5: Schwankungen im Schub mit Blattfrequenz nach Fourier-Analyse

zunächst zu einer deutlichen Verstärkung der Schwingungen. Der Propeller arbeitet also in noch inhomogenerem Zustrom. Bei -15° Anstellwinkel findet sich ein lokales Minimum, das fast an die Homogenität der Konfiguration ohne Flosse heranreicht. Deutlich geringere Amplituden sind im Bereich positiver Anstellwinkel zu erkennen. Bei der größeren Wassertiefe führt die Flosse in keiner der getesteten Winkelstellungen zu einer signifikanten Verschlechterung der erzeugten Schwingungen. Im Gegensatz zu den vorteilhaften positiven Anstellwinkeln auf 350 mm Wassertiefe, reduzieren hier jedoch negative Anstellwinkel die

Schwingungserregung. Hier konnte beispielsweise bei -30° eine Halbierung der Schwingungsamplitude gemessen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des hier dargestellten Projektes konnte für verschiedene Binnenschiffsgeometrien der Einfluss der Wassertiefe auf das Nachstromfeld deutlich dargestellt werden. Hierbei kamen sowohl Methoden der RANSE-basierten Computersimulation als auch direkte Messungen der Strömung mit PIV-Technik zum Einsatz. Die PIV-Messungen zeigten sehr deutlich die ausgeprägte Instationarität der Umströmung im Hinterschiffsbereich bei vollen Binnenschiffen. Nach der Mittelung einer hinreichenden Anzahl von aufgemessenen Vektorfeldern, die den experimentellen Aufwand erheblich steigerte, konnte eine sehr gute Validierung und Optimierung der numerischen Methoden erzielt werden.

Mit den angepassten Rechentechniken wurde daraufhin ein CFD-gestützter Entwurf von adaptiven Anhängen durchgeführt. Hier konnte mit hoher Effizienz eine Vielzahl von Anordnungen getestet und verglichen werden. Auf Anraten der Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurde von der Entwicklung eines adaptiven Düsensystems abgesehen. Grund hierfür waren erhebliche Bedenken hinsichtlich der Gestehungskosten und der Standfestigkeit eines solchen Systems. Auch wenn dies technisch darstellbar wäre, erwarten die PA-Mitglieder Vorbehalte gegenüber derart komplexen Systemen.

Beim Entwurf und der dazugehörigen Analyse der Anhänge und Parametervariation zeigte sich, dass die Möglichkeiten zur Homogenisierung des Zustroms unter Flachwasserbedingungen begrenzt sind. Dennoch konnte eine substantielle Beeinflussung bei sehr moderaten Widerstandszuwächsen vorhergesagt werden. Die Bewertung der Nachstromfelder anhand von skalaren Gütegraden erwies sich als nicht zielführend. Die Unterschiede, besonders in den radialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten, sind zu komplex.

Der experimentelle Nachweis der Funktion konnte auf zwei verschiedenen Wegen erbracht werden. Die mit PIV-Technik gemessenen Nachstromfelder bestätigten überwiegend die numerisch gewonnenen Ergebnisse und zeigten eine deutliche Beeinflussung des Nachstroms durch die einfache Flosse. Im Propulsionsversuch konnte der geringe direkte Einfluss der Flosse auf den Leistungsbedarf der Modelle bestätigt werden. Die Auswertung der propellerinduzierten Schwingungsamplituden bei verschiedenen Wassertiefen bestätigte die Eingangshypothese, dass eine Verbesserung des Propellerzustroms unter variablen Flachwasserbedingungen ein adaptives System erfordert. Mit stark unterschiedlichen Einstellungen konnte bei beiden untersuchten Wassertiefen eine erhebliche Reduktion der Schwingungen nachgewiesen werden.

Beim Transfer der Ergebnisse auf die Großausführung muss dem reduzierten Einfluss der Viskosität Rechnung getragen werden. Dies äußert sich unter anderem darin, dass die Flosse aufgrund der geringeren Grenzschichtdicke ein kleineres Streckungsverhältnis benötigt. Somit sind auch die im Modellversuch identifizierten günstigen Anstellwinkel nicht direkt auf die Großausführung zu übertragen. Anhand der starken Beeinflussung der Schwingungen ist jedoch eine manuelle oder durch ein angelerntes oder sogar selbst-lernendes System vorgenommene Einstellung des Flossenwinkels denkbar.

Eine Steigerung der Energieeffizienz konnte im Modellmaßstab nicht direkt nachgewiesen werden. Jedoch ist zu erwarten, dass die gewonnenen Erkenntnisse über die Zustrombedingungen und die aufgezeigten Möglichkeiten zur Beeinflussung des Zustroms zu einem optimierten Propellerentwurf genutzt werden können. Des Weiteren ist aufgrund der geringeren Viskosität und der reduzierten Streckung der Flosse in der Großausführung mit einer geringeren Widerstandskomponente zu rechnen.

Das Projekt konnte somit erfolgreich abgeschlossen werden. Für den erfolgreichen Transfer in die Praxis sind voraussichtlich weitere Untersuchungen in begrenztem Umfang, beispielsweise unter Einbeziehung des Propellerentwurfs, erforderlich. Nachdem erhebliches Potential zur Steigerung des Komforts aufgezeigt werden konnte, wären weitere Untersuchungen an Ruderpropellern, die häufig an Fahrgastschiffen verbaut werden, naheliegend. Gerade in der Fahrgastschiffahrt ist die Attraktivität einer Komfortsteigerung deutlich größer als die einer Steigerung der Energieeffizienz.

6.1 Verwendung der Zuwendung

Für die beschriebenen Arbeiten wurden insgesamt 24,07 Personalmonate wissenschaftliches Personal eingesetzt. Kosten für Geräte und Leistungen Dritter fielen nicht an. Im Rahmen des Projektes wurden äußerst anspruchsvolle Modellversuche mit PIV-Messungen durchgeführt. Hierbei mussten zunächst Lösungen für den optischen Zugang, eine angemessene Lasersicherheit sowie die Minimierung von Reflexionen am Modell erarbeitet werden. Im Laufe der Versuche zeigte sich, dass eine große Anzahl von Wiederholungsfahrten erforderlich ist, um eine repräsentative Mittelung der Strömungszustände zu erreichen. Auch für die Auswertung der Messungen bezüglich der Verrechnung mehrerer Messfahrten mussten neue Ansätze getestet und etabliert werden.

Im Zuge der Validierung der CFD-Verfahren zeigte sich die Notwendigkeit einer erhöhten Komplexität bei den Rechengittern. Die große Anzahl von Simulationen mit verschiedenen Wassertiefen, Geschwindigkeiten, Schiffsformen, Turbulenzmodellen, Maßstäben und Propellermodellierungen war sehr personalintensiv. Die in den Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten waren somit notwendig zur angestrebten Beantwortung der Fragestellungen, und der Personaleinsatz war angemessen.

6.2 Voraussichtliche Nutzung und Verwertung der Ergebnisse

Während der gesamten Projektlaufzeit bestand ein enger Austausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses. So konnte die wirtschaftliche Relevanz für KMU kontinuierlich geprüft und im Fokus gehalten werden. Die Ergebnisse erlauben mit moderatem Aufwand den Transfer in die Praxis. Aufgrund der aufgezeigten Maßstabseffekte sollte hierbei im Entwurf von Schiff, Propeller und Flosse auf sorgfältige CFD-Simulationen mit einer begrenzten Parametervariation zurückgegriffen werden. Die Prognose des Leistungsbedarfs kann zuvor im Rahmen von klassischen Modellversuchen abgesichert werden.

Die Erkenntnisse auf den Gebieten der PIV-Technik und der numerischen Simulationen fließen unmittelbar in weitere Projekte ein. Beispielsweise wurde mittlerweile mit der Bearbeitung des Projektes „Bestimmung des effektiven Propellerzustroms für die Binnenschiffahrt“ im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Projekt Nr. 97.357/2015) begonnen. Hier werden die Zustrombedingungen für eine repräsentative Schiffsformfamilie mit experimentellen und numerischen Techniken untersucht.

Es wurden im Rahmen dieses Vorhabens keine Schutzrechte beantragt.

6.3 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Es sind keine aktuellen Arbeiten bekannt, bei denen andere Einrichtungen oder Arbeitsgruppen an der Homogenisierung des Propellerzustroms an völligen Hinterschiffen arbeiten.

6.4 Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen der Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft am 20. November 2015 in Bremen-Vegesack präsentiert. Die schriftliche Ausarbeitung dazu wird mit dem Jahrbuch 2015 im Schiffahrts-Verlag „Hansa“ veröffentlicht. Des Weiteren wurden Teilaspekte der anspruchsvollen PIV-Messungen im Dezember 2014 (Val de Reuil, Frankreich) sowie im September 2015 (Istanbul, Türkei) im Rahmen von Sitzungen der Community of Practice on Detailed Flow Measurement der internationalen Gruppierung HydroTesting Forum vorgestellt und diskutiert. Darüber hinaus dienen die Mitglieder des wissenschaftlich-technischen Ausschusses des DST und des projektbegleitenden Ausschusses als Multiplikatoren bei der Information des Gewerbes. Weitere Veröffentlichungen erfolgen beispielsweise auf der zeitnah erneuerten Webseite des DST.

Literaturverzeichnis

- [1] *ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.5*. ANSYS Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg PA 15317. 2012.
- [2] Bugalski, Thomasz. „Applications of stereo particle image velocimetry to ship wake and propeller flows“. In: *AMT'09*. Nantes, 2009, Seiten 216–228.
- [3] Calcagno, G., Di Felice, Fabio, Felli, Mario und Pereira, Francesco. „Propeller Wake Analysis Behind a Ship by Stereo PIV“. In: *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*. Fukuoka, Japan, Juli 2002, Seiten 789 –805.
- [4] Dymarski, Pawel und Kraskowski, Marek. „Numerical and experimental investigation of the possibility of forming the wake flow of large ships by using the vortex generators“. In: *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg: Institute for Fluid Dynamics und Ship Theory (FDS) - Hamburg University of Technology (TUHH), German Society for Maritime Technology (STG), 2011, Seiten 72 –78.
- [5] Fahrbach, M. „Bewertung der Güte von Nachstromfeldern“. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2004.
- [6] Ferziger, J. H. und Peric, M. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [7] Graff. *Modellversuche zur Ermittlung des Flachwassereinflusses in ruhenden und strömenden Gewässern auf den Form- und Reibungswiderstand von Binnenschiffen; Modellversuche zur Ermittlung der Nachstrom- und Sogverhältnisse bei Binnenschiffen unter Berücksichtigung des Flachwassereinflusses in stehenden und strömenden Gewässern*. Technischer Bericht 47. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Feb. 1956.
- [8] Grollius, Walter. *Untersuchung der Umströmung eines flachgehenden getunnelten Binnenschiffes einschließlich des Nachstromfeldes*. Technischer Bericht 1495. AiF-FV-Nr. 10662 N. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Okt. 1998.
- [9] Grothues-Spork, K. „Bilge vortex control devices and their benefits for propulsion“. In: *Int. Shipbuilding Progress* 35.(402) (Juli 1988).

- [10] Heinke, Hans-Jürgen und Hellwig-Rieck, Katrin. „Investigation of Scale Effects on Ships with a Wake Equalizing Duct or with Vortex Generator Fins“. In: *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg: Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory (FDS) - Hamburg University of Technology (TUHH), German Society for Maritime Technology (STG), 2011, Seiten 57 –63.
- [11] Kornev, Nikolai. *Propellertheorie*. Technischer Bericht. Universität Rostock: Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, 2009.
- [12] Launder, B. E. und Spalding, D. B. *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3 (2), 1974, Seiten 269–289.
- [13] Lee, Jung Yeop, Paik, Bu Geun und Lee, Sang Joon. „PIV measurements of hull wake behind a container ship model with varying loading condition“. In: *Ocean Engineering* 36.5 (2009), Seiten 377 –385.
- [14] Lee, SangJoon, Paik, BuGeun, Yoon, JongHwan und Lee, ChoungMook. „Three-component velocity field measurements of propeller wake using a stereoscopic PIV technique“. In: *Experiments in Fluids* 36 (4 2004). 10.1007/s00348-003-0699-5, Seiten 575–585.
- [15] Luthra, Gurdin. *Untersuchung der Nachstromverteilung an einem 2-Schrauben-Binnengütermotorschiff*. Technischer Bericht 788. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Feb. 1976.
- [16] Luthra, Gurdin. *Untersuchung der Nachstromverteilung eines im Verband schiebenden Schubbootes in Pontonform mit einer zwecks Verbesserung des Zustroms zum Propeller geänderten Zweirumpfunterwasserformgebung*. Technischer Bericht 702. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Dez. 1973.
- [17] Menter, F. R. „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications (MENTER)“. In: *AIAA Journal* 32(8) (1994), Seiten 1598–1605.
- [18] Mewis, F. *Mewis Duct –a new Energy-saving Device –*. Rostock, Jan. 2010.
- [19] Mewis, F. und Hollenbach, U. *Special Measures for Improving Propulsive Efficiency*. Hamburg, 2006.
- [20] Mewis, Friedrich. „A Novel Power-Saving Device for Full-Form Vessels“. In: *First International Symposium on Marine Propulsors SMP’09*. Herausgegeben von Steen, Sverre und Koushan, Kourosh. Trondheim: MARINTEK (Norwegian Marine Technology Research Institute), Juni 2009, Seiten 443–448.
- [21] Ok, Jil-Pyo. „Power savings by wake equalizing ducts“. In: *Ship Technology Research / Schiffstechnik* 52 (2005).
- [22] Paik, Bu-Geun, Kim, Jin, Park, Young-Ha, Kim, Ki-Sup und Yu, Kwon-Kyu. „Analysis of wake behind a rotating propeller using PIV technique in a cavitation tunnel“. In: *Ocean Engineering* 34.3-4 (2007), Seiten 594 –604.

- [23] Schmidt-Stiebitz, Hermann. *Beeinflussung des Nachstromfeldes durch den Propeller*. Technischer Bericht 391. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Mai 1966.
- [24] Schmidt-Stiebitz, Hermann und Luthra, Gurdin. *Nachstromuntersuchung im inhomogenen Propellerfeld*. Technischer Bericht 546. Duisburg: Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Jan. 1970.
- [25] Schneekluth, H. *Hydromechanik zum Schiffsentwurf*. Koehler Verlag, 1988.
- [26] Stein, Norbert v. d. „Die Zustromdüse“. In: *Hansa* (1983), Seite 1953.
- [27] Zöllner, Joachim. *Strömungstechnische Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Binnenschiffen*. Bonn, Juni 2009.

WAKE
An veränderliche Wassertiefen angepasste Konzepte zur Energieeinsparung durch
Vergleichmäßigung des Propellerzustroms

Duisburg, im November 2015

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. Sven List)

Leiter des Fachbereichs Hydrodynamik:


.....
(Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Dr.-Ing. Rupert Henn)