

Leistungsanalysen für das Segeldynamometer

Hartmut Brandt
Karsten Hochkirch
Institut für Schiffs- und
Meerestechnik, TU-Berlin

Moustafa Abdel-Maksoud
Matthias Fröhlich
Schiffbau-Versuchsanstalt
Potsdam GmbH (SVA)

Bremerhaven, 21. November 1997

Zusammenfassung

Für das BMBF-Forschungsvorhaben »Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aerodynamischen und hydrodynamischen Kräfte« wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt, von denen hier ein wesentlicher Teil vorgestellt wird. Mit dem Segeldynamometer können die reale Kräfte in Abhängigkeit von den jeweiligen Wind- und Seeverhältnissen ermittelt werden, die als Grundlage für die Validierung von Ergebnissen aus Modellversuchen, CFD-Berechnungen, Festigkeitsanalysen und schließlich zur Leistungsbestimmung dienen.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden Schleppversuche mit dem Modell des Segeldynamometers durchgeführt, wobei die Kräfte und Momente des Kiels und Ruders getrennt erfaßt worden sind. Einen besonderen Schwerpunkt bildeten dabei die Kieluntersuchungen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 6 unterschiedliche Kielkonfigurationen mit 2 Tiefgängen in der Schlepprinne und im Kavitationstank getestet.

Außerdem wurden die Strömungszustände des Modells für die gleichen Kielkonfigurationen mit CFD-Methoden berechnet, wobei wegen der komplexen Beschreibung der Kielumströmung ein erheblicher Rechenaufwand betrieben werden mußte. Schließlich dienten der Einschätzung des gegenwärtigen Entwicklungsstandes vergleichende Berechnungen mit herkömmlichen Velocity Prediction Programs (VPP). Es werden die Grenzen der einzelnen Verfahren und deren Aussagekraft diskutiert, während die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Großausführung unter realen Umgebungen zukünftigen Versuchen mit dem Segeldynamometer vorbehalten bleibt.

Summary

Within the BMBF-Project »Design and Construction of a Sail-Force-Dynamometer« various performance predictions have been carried out. The most significant results are presented.

The »Sail-Force-Dynamometer« gives means to measure the forces while sailing in a seaway. Together with model tests and CFD-calculations this data can be used as base for future strength analysis and performance prediction.

In towing tank tests not only usual force measurements but the forces acting on keel and rudder have been measured separately as well. Keel design has been considered a main point of interest. Therefore altogether 6 different designs with two different drafts were tested in the towing tank and cavitation tunnel.

In addition the viscous flow for these configurations was calculated by solving the RANS-Equations. Further comparisons are made with conventional Velocity Prediction Programs.

The limits and applicability of these approaches are discussed, while extrapolation to full scale is left to future research with the »Sail-Force-Dynamometer«.

1 Übersicht

Das Forschungsvorhaben

»Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aerodynamischen und hydrodynamischen Kräfte« wird vom Bundesministerium für Bildung,

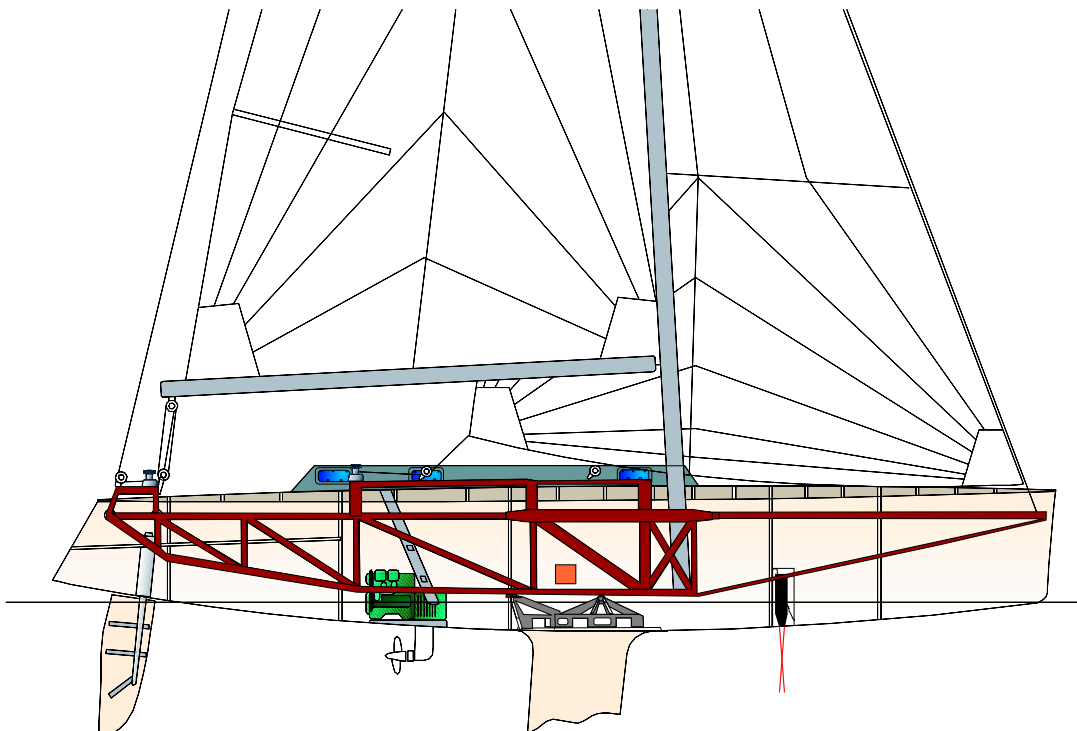


Abb. 1: Das »Segeldynamometer« der TU-Berlin

Wissenschaft, Forschung und Technologie sowie von verschiedenen Industrieunternehmen und Instituten gefördert. Mit dem Vorhaben wird beabsichtigt, die Entwicklung der Hochtechnologie im Yachtbau voranzutreiben, um damit die Erfolgsaussichten der deutschen Bootsbranche zu verbessern.

Das »Segeldynamometer« ist ein Meßgerät in Form einer Segelyacht, mit deren Hilfe die aerodynamischen und hydrodynamischen Kräfte und Momente beim Segeln getrennt erfaßt werden können. Zu diesem Zweck ist eine 10m lange Segelyacht mit einem Innenrahmen, auf dem sämtliche Riggelmente angeordnet sind, entwickelt worden. Dieser Rahmen ist mit dem äußeren Schiffskörper durch eine 6-Komponentenwaage verbunden. Zusätzlich werden die Kräfte und Momente vom Kiel und Ruder erfaßt. Zur Analyse der Riggkräfte sollen außerdem an allen Stagen, Wanten, Schooten und dem Mast die Einzelkräfte bestimmt werden (Abb. 1).

Rumpf und Rigg des »Segeldynamometers« stammen aus dem Konstruktionsbüro Judel/Vrolijk und entsprechen dem Liniendiagramm der Dehler 33. Die Konstruktion der Meßtech-

nik erfolgte am ISM der TU-Berlin. Das »Segeldynamometer« steht kurz vor seiner Fertigstellung und erhält in den Wintermonaten die elektronische Ausrüstung. Sämtliche Meßverfahren und die erforderlichen Rechenprogramme zur synchronen Aufnahme und Verarbeitung der Meßdaten werden gegenwärtig am ISM entwickelt [1, 2].

Ein wichtiges Ziel des Vorhabens ist die Validierung der numerischen Berechnungsverfahren und der Modellversuchsergebnisse mit den realen Daten, damit diese Ergebnisse in entsprechende Rechenprogramme zur besseren Leistungsermittlung, für Festigkeitsanalysen und damit zur Entwurfsoptimierung einfließen können. Aus diesem Grund wurden mit dem Rumpf des Segeldynamometers umfangreiche Modellversuche und CFD-Berechnungen für viskose Strömung durchgeführt sowie vergleichend herkömmliche Berechnungsverfahren (VPP) angewendet. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Kielentwicklung, da gerade auf diesem Gebiet ein wesentlicher Nachholbedarf besteht.

2 Modellversuche

In der Schlepprinne wurden Widerstands- und Querkraftmessungen an Rumpf, Kiel und Ruder mit dem Modell des »Segeldynamometers« im Maßstab 1:2 mit drei Kielvarianten durchgeführt [3] und im großen Kavitationsstank des ISM der TUB vier unterschiedliche Kiele untersucht [4], wobei der sogenannte »Standard«- oder »Tiefkiel« einen Tiefgang des Schiffes von $1.95m$ erreicht, während für die »Flachkiele« der Tiefgang des Segeldynamometers auf $1.45m$ begrenzt wurde. Erklärtes Ziel ist es, bessere Gütegrade von Kielemit geringer Streckungslänge (Tiefgang) zu erreichen, da große Tiefgänge in der Regel unerwünscht sind. Die Abbildungen 2 - 4 zeigen die untersuchten Kielkonstruktionen.

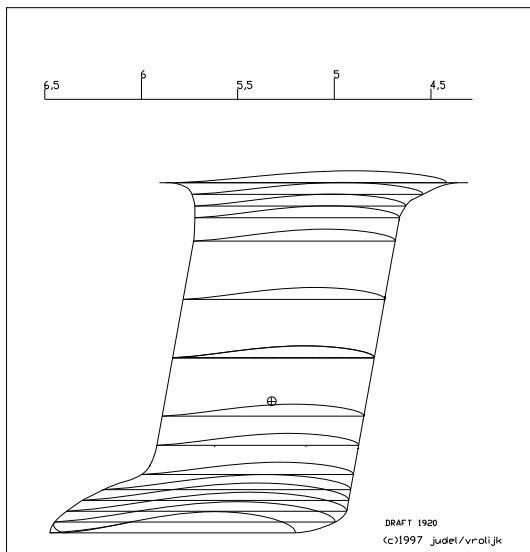


Abb. 2: Standard *Tiefkiel* des »Segeldynamometers« ($T = 1.95m$)

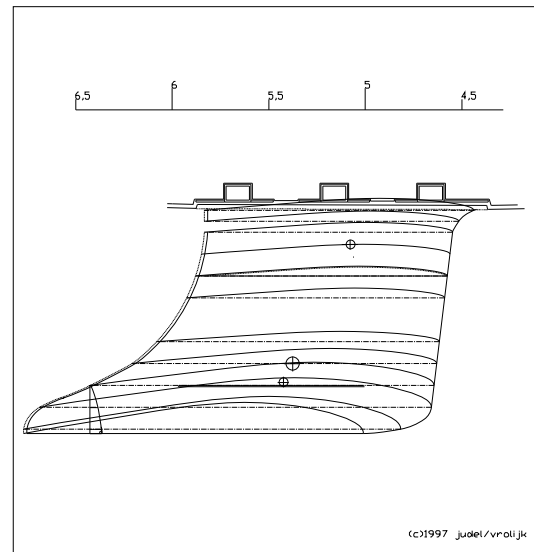


Abb. 3: *Flachkiel* des »Segeldynamometers« ($T = 1.45m$)

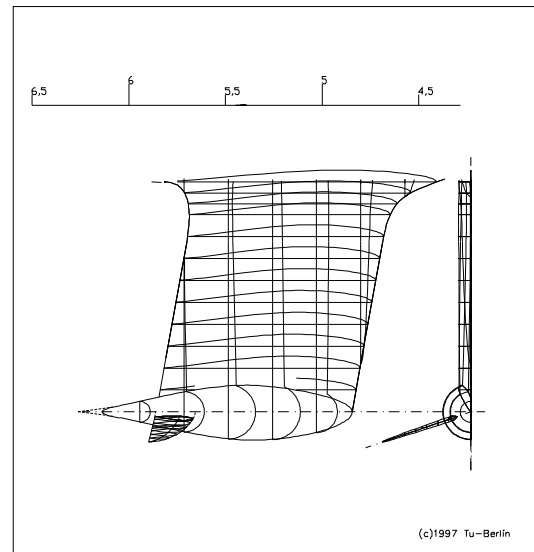


Abb. 4: *Flügelkiel* des »Segeldynamometers« ($T = 1.45m$)

Während der Standard- und Flachkiel Entwürfe aus dem Büro Judel/Vrolijk sind, ist der Flügelkiel etwas abgewandelt worden. Er hat die gleiche Flosse wie der Flachkiel, jedoch aus Gründen der Herstellungsvereinfachung einen rotationsymmetrischen Bulb. Die Flügel entsprechen dem NACA Profil 63.2-015 mit einer leichten Rücklage und einer Neigung von 20° nach unten. Das Ruder blieb beim Tief- und Flachkiel unverändert.

2.1 Schleppversuche in der SVA

Das Testprogramm für die Schleppversuche ist speziell in Hinsicht auf die zu erwartenden Meßergebnisse des Segeldynamometers und auf die Entwicklung von Kielem abgestimmt worden. Der Modellmaßstab der 10 Meter langen Yacht betrug 1:2 und die wichtigsten Hauptabmessungen der Großausführung sind in Tabelle 1 angegeben.

LOA	=	9.99m
LWL	=	8.75m
B_{Max}	=	2.99m
B_{WL}	=	2.35m
T_{Rumpf}	=	0.36m
$T_{Tiefkiel}$	=	1.95m
$T_{Flachkiel}$	=	1.45m
$D_{Tiefkiel}$	=	3.95t
$D_{Flachkiel}$	=	4.25t

Tabelle 1: Hauptabmessungen

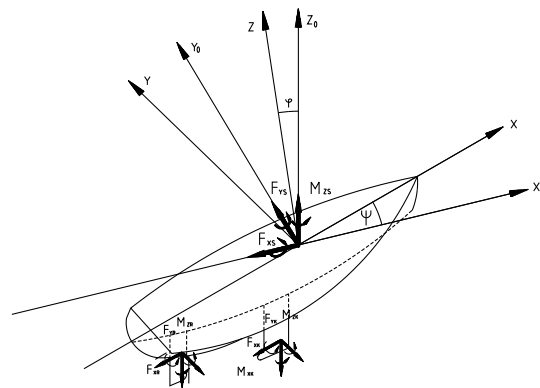


Abb. 5: Koordinatensysteme

Da drei unterschiedliche Kielversionen, ein Tiefkiel und als Flachkiele ein Bulb- und ein Blubflügelkiel untersucht werden sollten, mußte das Versuchsprogramm stark gestrafft werden. Die Anzahl der Testreihen wurde daher auf 33 Meßfahrten für jeden Kiel begrenzt. Untersucht wurden der Schleppwiderstand für Schiffskurse mit dem Wind für Froudezahlen bis 0.4 sowie zwei Krängungswinkel (12° und 24°) mit drei relativ großen Driftwinkeln (4° , 6° und 8°), um eine gute Auflösung der Einzelkräfte am Kiel und Ruder zu garantieren. Der Ruderwinkel betrug bei allen Testreihen mit Abdrift konstant 3° . Außerdem dienten jeweils 4 Meßfahrten bei 12° und 24° Krängung mit einem Ruderwinkel von 0° und Driftwinkeln um den Nullpunkt zur Definition der realen Nulllage. Das gesamte Versuchsprogramm ist aus Tabelle 2 ersichtlich.

Meßtechnisch bestimmt wurden die Kräfte und Momente des Gesamtsystems Schiff mit Hilfe einer 6-Komponentenwaage und mit zwei weiteren 6-K-Waagen die Einzelkräfte und -momente von Kiel und Ruder. Das erfordert, wie später beim Segeldynamometer auch, eine Trennung des Kiels und Ruders vom Rumpf. Hierbei sind zwei unterschiedliche Koordinatensysteme zu berücksichtigen: ein schleppwagenfestes und ein schiffsfestes (Abb. 5).

Das Modell konnte frei tauchen und trimmen, während die Krängung und Abdrift aufgezwungen wurden.

Mit den jeweils drei Kräften und Momenten an Rumpf, Kiel und Ruder, sowie der Tauchung, dem Trimm und der Modellgeschwindigkeit mußten zeitgleich 21 Meßwerte verarbeitet werden.

Die Ergebnisse der umfangreichen Modellversuche sind in einem Bericht der SVA [3]

zusammengefaßt worden und können hier nur auszugsweise vorgestellt werden. Alle Daten beziehen sich auf das Modell, wurden also nicht auf die Großausführung umgerechnet. Diese Vorgehensweise ist zweckmäßig, da auch die CFD-Berechnungen für viskose Strömung den Modellmaßstab berücksichtigen und damit Übertragungsfehler ausgeschlossen werden können.

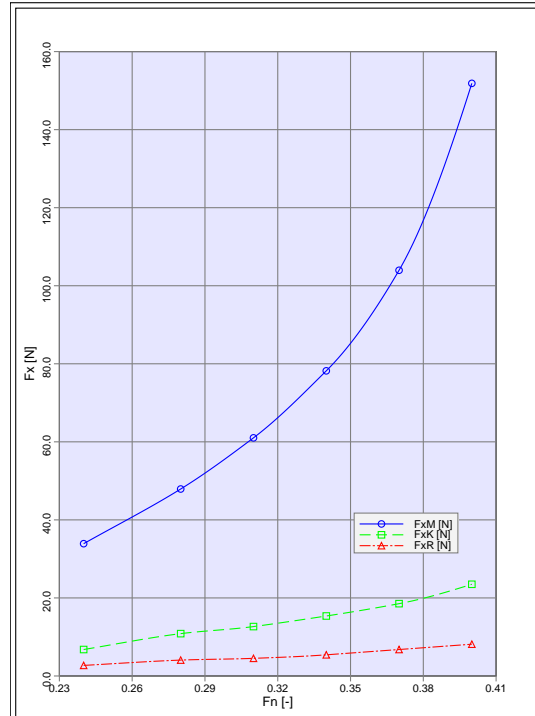


Abb. 6: Widerstand von Modell, Tiefkiel und Ruder

Abbildung 6 zeigt den Schleppwiderstand

des gesamten Modells und getrennt davon den Anteil des Standardkiels und Ruders. Bemerkenswert ist hierbei der relativ hohe Widerstandsanteil von Kiel und Ruder bei kleineren Froudezahlen. Tabelle 3 faßt diese Daten zusammen.

$F_N = 0.3$			
R_{Modell}	=	56.5 N	100 %
R_{Kiel}	=	12.4 N	22 %
R_{Ruder}	=	4.5 N	8 %
Summe Anhängewiderst.:			30 %

Tabelle 3: Aufteilung des Widerstands

Den unterschiedlichen Gesamtwiderstand des Modells mit den drei verschiedenen Kiel zeigt Abbildung 7 und Abbildung 8 den Schleppwiderstand der einzelnen Kiele. Am günstigsten schneidet hierbei der Flachkiel ab, da auch dessen benetzte Oberfläche etwas kleiner als beim Tiefkiel ist. Der Flügelkiel liegt zwischen Tief- und Flachkiel. Wenn die Unterschiede auch nicht sehr groß sind, so muß doch in ungünstigen Froudezahlbereichen mit einer Geschwindigkeitsdifferenz von bis zu 0.13 Knoten gerechnet werden.

Bei Beurteilung der Modellversuchsergebnisse für den Fahrtzustand „Am-Wind“, sind Widerstand, Querkraft, Driftwinkel, Ruderwinkel, Krängung und Schiffsgeschwindigkeit bzw. Froudezahl zu berücksichtigen. Wegen dieser vielen Parameter ist eine Verknüpfung der wichtigsten Größen unumgänglich. Es wird daher ein Gütegrad definiert,

$$\frac{C_Q}{C_R} = \frac{Q}{R} = \frac{1}{\epsilon} \quad (1)$$

der die Abhängigkeit zwischen Widerstand und Querkraft herstellt und eine einwandfreie Bewertung der Ergebnisse zuläßt. Aufgetragen werden die Gütegrade über dem Driftwinkel. Je größer bei gleichem Driftwinkel die Gütegrade werden, um so besser sind die Am-Wind-Eigenschaften eines Segelbootes. Der Qualitätsnachweis von Yachten erfolgt jedoch in der Regel in umgekehrter Reihenfolge. Das Polardiagramm eines Segels bestimmt eine ganz bestimmte Quer- und Vortriebskraft, die im Gleichgewichtszustand der hydrodynamischen Querkraft und dem Widerstand entsprechen müssen.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Gütegrade des Modells für die drei untersuchten Kiele mit 12° Krängung und Froudezahlen von 0.24 und 0.31 und die Abbildungen 11 und 12 die entsprechenden Ergebnisse für 24° Krängung und Froudezahlen von 0.31 und 0.37. Der Standard- oder Tiefkiel hat eindeutig die besseren Eigenschaften im Vergleich mit dem Flachkiel. Der Flügelkiel liefert zwar etwas höhere Gütegrade als der Flachkiel, erreicht jedoch nicht annähernd den Tiefkiel.

Zur besseren Quantifizierung der Ergebnisse dienen die Abbildungen 13 bis 16. Hier ist das Verhältnis Q/R in % des Tiefkiels als Funktion des Driftwinkels für jeweils eine Froudezahl und 12° sowie 24° Krängung dargestellt. Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die Ergebnisse für das ganze Schiff und die Abbildungen 15 und 16 die Einzelkräfte der Kiele. Hierbei ergeben sich die in Tabelle 4 angegebenen mittleren Gütegrade.

Aus diesen mittleren Werten ($\lambda = 7^\circ$) ist ersichtlich, daß insbesondere bei größerer Krängung der Flachkiel erhebliche Gütegradverluste gegenüber dem Tiefkiel ($< 50\%$) in Kauf nehmen muß, während der Flügelkiel mit 66% deutlich besser abschneidet.

Ein weiteres interessantes Ergebnis liefern die Gütegrade der Kiele selbst. Sie liegen beim Flachkiel um 8 bis 12% über den Gesamtgütegraden und beim Flügelkiel um 5 bis 16% höher. Obwohl die Ursachen hierfür nicht näher untersucht wurden, ist zu vermuten, daß durch die um 20% größere Profillänge der Flachkiele am Bootsboden und die damit veränderte Druckverteilung ein größerer Zusatzwiderstand am Rumpf wirksam wird.

Außerdem geben die Versuchsergebnisse der Ruderkräfte einen Hinweis für die großen Unterschiede von Kiel- und Gesamtgütegrade (Abb. 17 und 18). Obwohl bei allen Versuchen die Geometrie des Ruders unverändert blieb, reduzieren sich mit abnehmender Effektivität der Flachkiele auch die Querkräfte des Ruders! Bei 12° Krängung und 7° Abdrift verringern sich die Gütegrade des Ruders in Verbindung mit dem Flach- und Flügelkiel um 17% gegenüber dem Strömungszustand mit Tiefkiel und bei 24° Krängung sogar um bis zu 44% bei Verwendung des Flachkiels (Tabelle 5).

Damit kann ein wesentlicher Anteil der

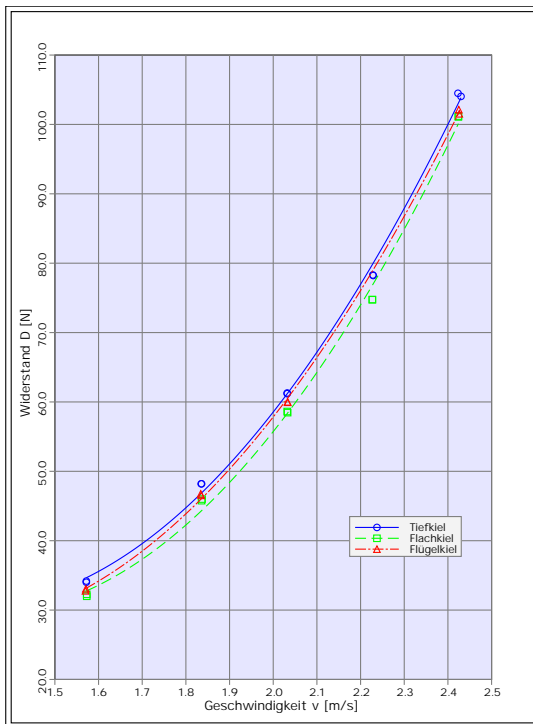


Abb. 7: Gesamtwiderstand des Modells mit unterschiedlichen Kielen

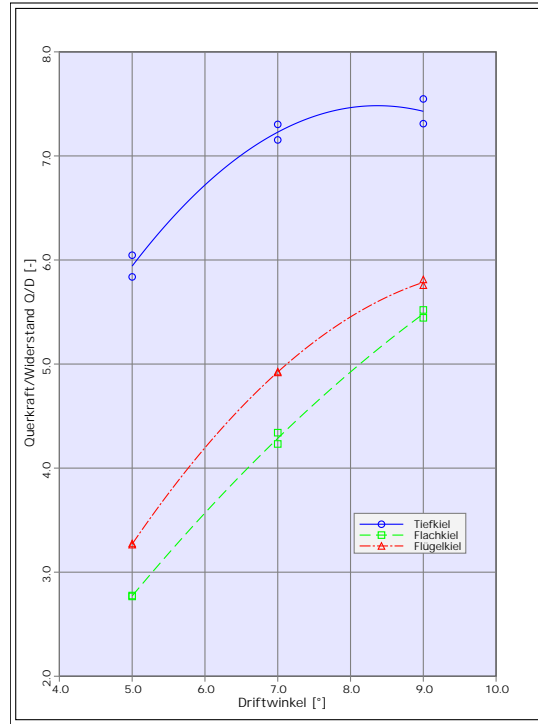


Abb. 9: Gütegrad des Modells mit unterschiedlichen Kielen ($\varphi = 12^\circ$, $F_N = 0.24$)

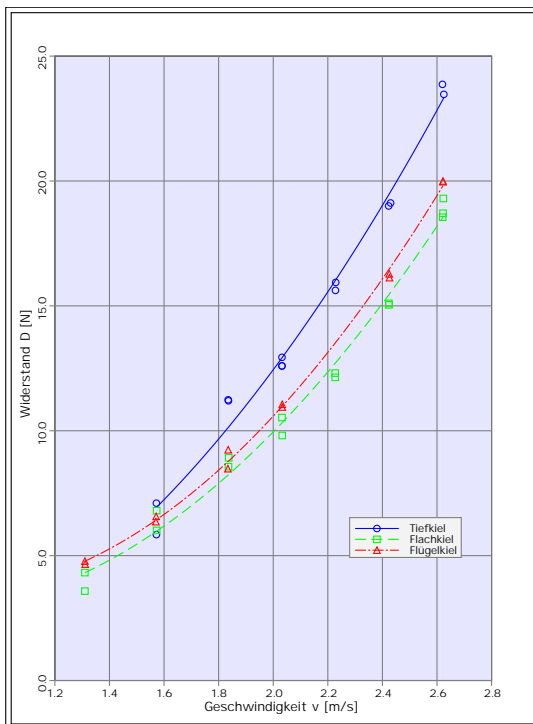


Abb. 8: Schleppwiderstand der einzelnen Kielen

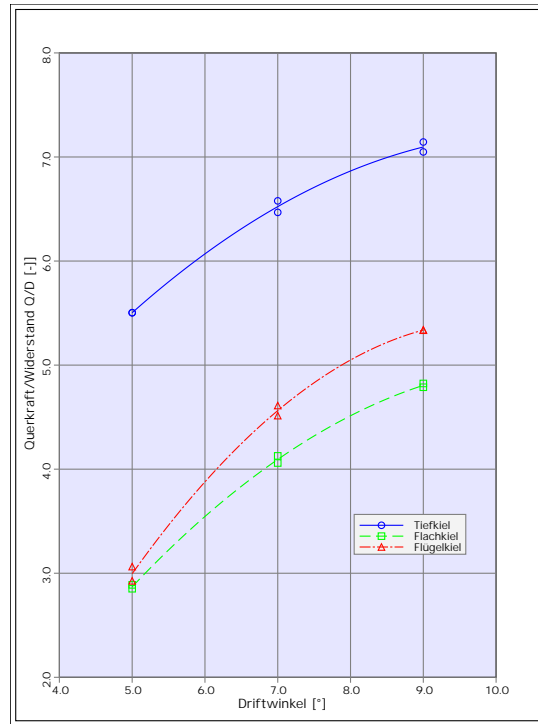


Abb. 10: Gütegrad des Modells mit unterschiedlichen Kielen ($\varphi = 12^\circ$, $F_N = 0.31$)

Nr.	Fn [-]	V-Original [kn]	V-Modell [m/s]	θ (Trimm) [°]	φ [°]	λ [°]	δ [°]	
1	0,20	3,605	1,310	0,07	0,0	0,0	0,0	
2	0,24	4,326	1,572	0,11	0,0	0,0	0,0	
3	0,28	5,047	1,834	0,16	0,0	0,0	0,0	
4	0,31	5,588	2,031	0,21	0,0	0,0	0,0	
5	0,34	6,129	2,227	0,29	0,0	0,0	0,0	
6	0,37	6,669	2,424	0,39	0,0	0,0	0,0	
7	0,40	7,210	2,620	0,60	0,0	0,0	0,0	achterlicher Wind mit Trimmausgleich
8	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	-2,0	0,0	
9	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	0,0	0,0	
10	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	2,0	0,0	
11	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	4,0	0,0	
12	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	-1,0	0,0	
13	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	0,0	0,0	
14	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	4,0	0,0	
15	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	8,0	0,0	Basisversuche für Driftwinkel
16	0,24	4,326	1,572	0,11	12,0	4,0	3,0	
17	0,24	4,326	1,572	0,11	12,0	6,0	3,0	
18	0,24	4,326	1,572	0,11	12,0	8,0	3,0	
19	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	4,0	3,0	
20	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	6,0	3,0	
21	0,28	5,047	1,834	0,16	12,0	8,0	3,0	
22	0,31	5,588	2,031	0,21	12,0	4,0	3,0	
23	0,31	5,588	2,031	0,21	12,0	6,0	3,0	
24	0,31	5,588	2,031	0,21	12,0	8,0	3,0	am Wind wenig bis mittlerer Wind
25	0,31	5,588	2,031	0,21	24,0	4,0	3,0	
26	0,31	5,588	2,031	0,21	24,0	6,0	3,0	
27	0,31	5,588	2,031	0,21	24,0	8,0	3,0	
28	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	4,0	3,0	
29	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	6,0	3,0	
30	0,34	6,129	2,227	0,29	24,0	8,0	3,0	
31	0,37	6,669	2,424	0,39	24,0	4,0	3,0	
32	0,37	6,669	2,424	0,39	24,0	6,0	3,0	
33	0,37	6,669	2,424	0,39	24,0	8,0	3,0	am Wind mehr Wind

Tabelle 2: Versuchsprogramm

	Standard Tiefkiel	Flachkiel	Flügelkiel
Bootsgütegrad [%] $\varphi = 12^\circ$	100	59	68
Kielgütegrad [%], $\lambda = 7^\circ$	100	67	73
Bootsgütegrad [%] $\varphi = 24^\circ$	100	48	66
Kielgütegrad [%], $\lambda = 7^\circ$	100	60	82

Tabelle 4: Mittlere Gütegrade

Kiel	Tiefkiel	Flachkiel	Flügelkiel
Tiefgang [m]	1.95	1.45	1.45
Ruderkräfte [%] bei 7° Abdrift und			
12° Krängung	100	ca. 83	ca. 83
24° Krängung	100	ca. 56	ca. 80

Tabelle 5: Vergleich der Ruderkräfte

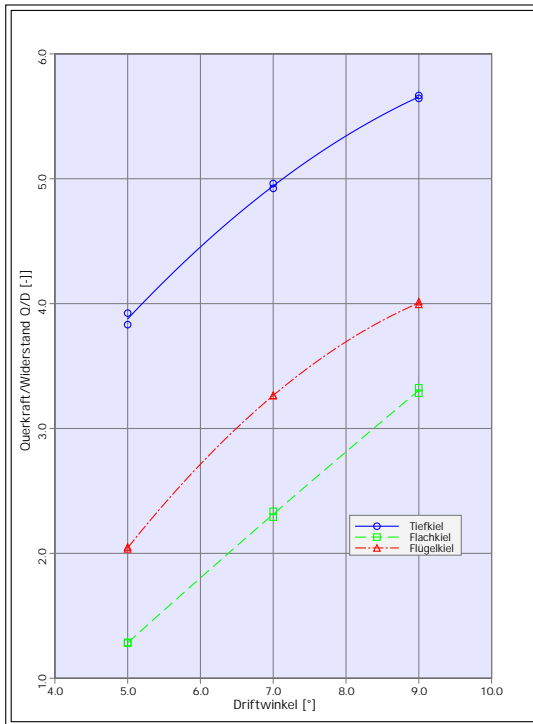


Abb. 11: Gütegrad des Modells mit unterschiedlichen Kielen ($\varphi = 24^\circ, F_N = 0.31$)

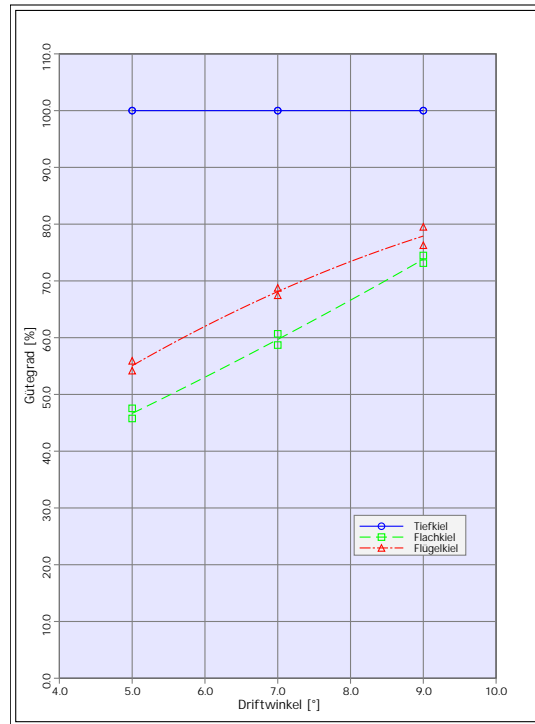


Abb. 13: Gütegrad des Modells in % des Tiefkiels ($\varphi = 12^\circ, F_N = 0.24$)

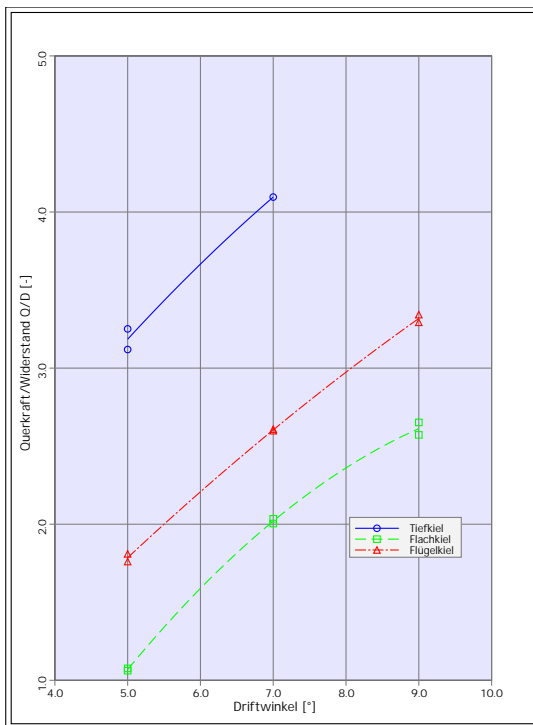


Abb. 12: Gütegrad des Modells mit unterschiedlichen Kielen ($\varphi = 24^\circ, F_N = 0.37$)

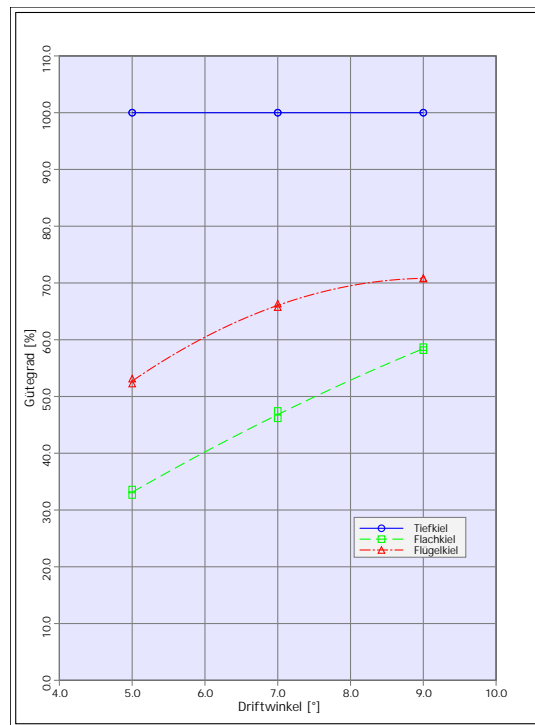


Abb. 14: Gütegrad des Modells in % des Tiefkiels ($\varphi = 24^\circ, F_N = 0.31$)

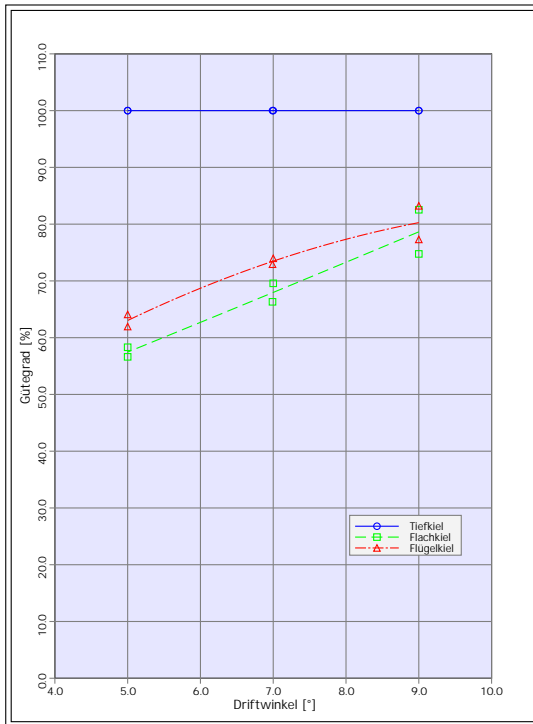


Abb. 15: Gütegrad der Kiele in % des Tiefkiels ($\varphi = 12^\circ, F_N = 0.24$)

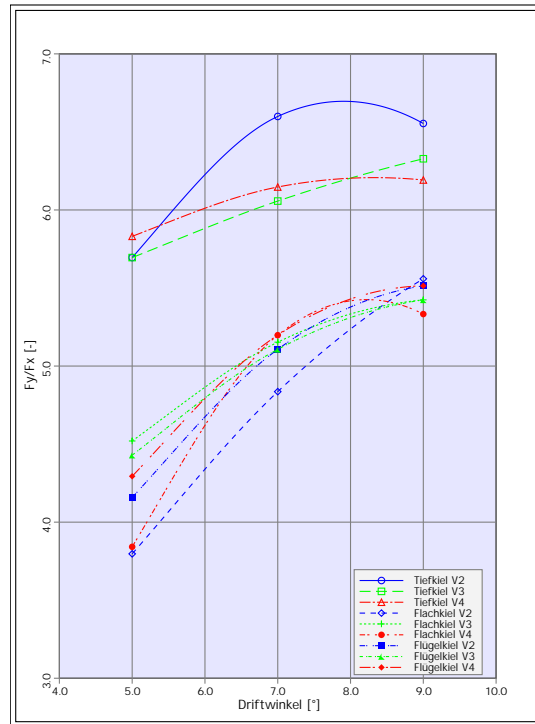


Abb. 17: Gütegrad des Ruders für unterschiedliche Kiele und Geschwindigkeiten ($\varphi = 12^\circ$)

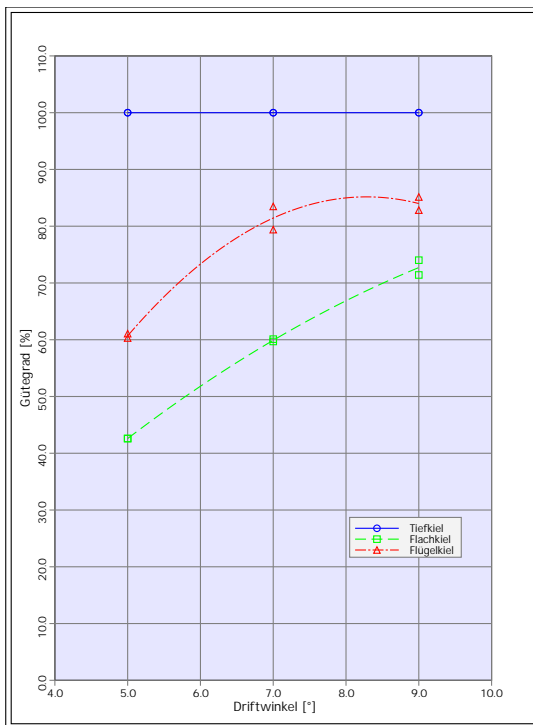


Abb. 16: Gütegrad der Kiele in % des Tiefkiels ($\varphi = 24^\circ, F_N = 0.31$)

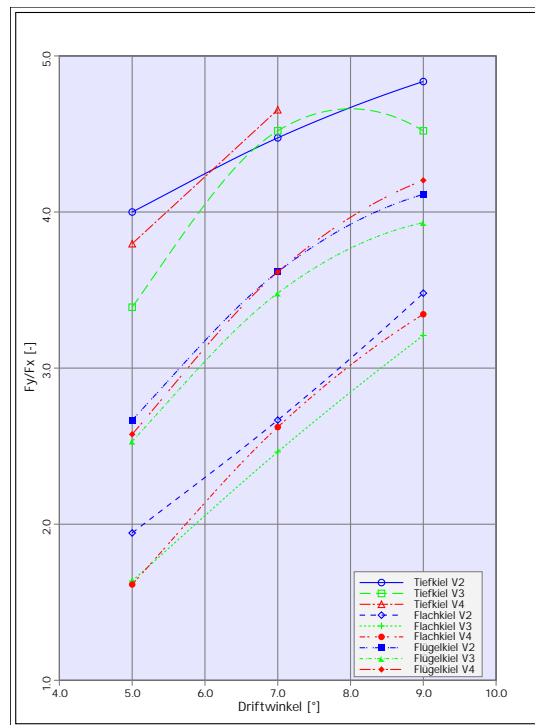


Abb. 18: Gütegrad des Ruders für unterschiedliche Kiele und Geschwindigkeiten ($\varphi = 24^\circ$)

Unterschiede zwischen den Gesamtkräften des Modells und den Einzelkräften am Kiel erklärt werden. Diese Wechselwirkungseffekte richtig zu erfassen, ist sicher noch ein wichtiges Aufgabengebiet. Die besseren Gütegrade des Ruders beim Flügelkiel mit 24° Krängung deuten darauf hin, daß durch die Flügel eine Verringerung oder Veränderung des Randwirbel vom Kiel bewirkt wird und der Gütegrad des Ruders dadurch gegenüber dem Flachkiel um 24% verbessert werden konnte.

2.2 Kielversuche im Kavitationstank

Ergänzend zu den Schleppversuchen in der SVA wurden am Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin im großen Kavitationstank in einem Meßstreckenquerschnitt von 1000×700 mm vier unterschiedliche Kiele im Modellmaßstab 1:5 untersucht, wovon einer der Standard- oder Tiefkiel war, wie er auch bei den Schleppversuchen verwendet wurde. Zu diesem Zweck wurde die freie Flüssigkeitsoberfläche in der Meßstrecke mit einer Platte, die den Bootsboden simulierte, abgedeckt und durch einen Spalt berührungslos das Kielprofil geführt. Oberhalb der Meßstrecke konnten mit Hilfe einer 6 Komponentenwaage alle erforderlichen Kräfte, Momente und damit die Kraftangriffspunkte erfaßt werden.

Diese zusätzlichen Modellversuche haben den Zweck, die qualitative Vergleichbarkeit simulierter Kielversuche im Tank ohne Schiff nachzuweisen und zugleich mehr Informationen über unterschiedliche Kielsysteme zu erhalten. Im Gegensatz zu den Versuchen mit dem gesamten Schiffsmodell wird hier das Druckfeld, welches durch die Umströmung des Rumpfes entsteht, vernachlässigt. Außerdem bleibt die Lage des simulierten Bootsbodens auch bei Krängung des Kiels horizontal. Es ist demnach nicht zu erwarten, daß auch bei Wahl gleicher Reynoldszahlen die Modellversuchsergebnisse der Kiele im Tank quantitativ denjenigen aus der Schlepprinne entsprechen. Erwartet werden hingegen zuverlässige Aussagen beim Vergleich verschiedener Kielkonfigurationen untereinander.

Untersucht wurden der Standardkiel oder Tiefkiel ($T = 1.95m$) (Abb. 2) und drei Flach-

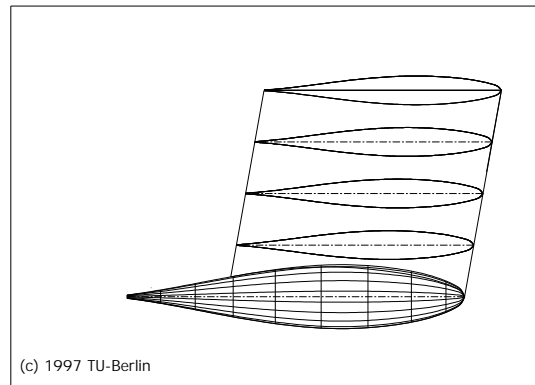


Abb. 19: Flachkiel im Tanktest

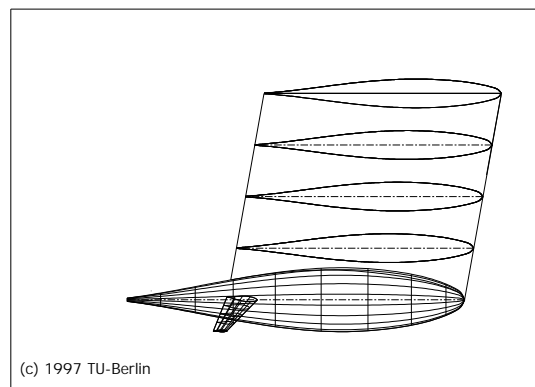


Abb. 20: Flügelkiel im Tanktest

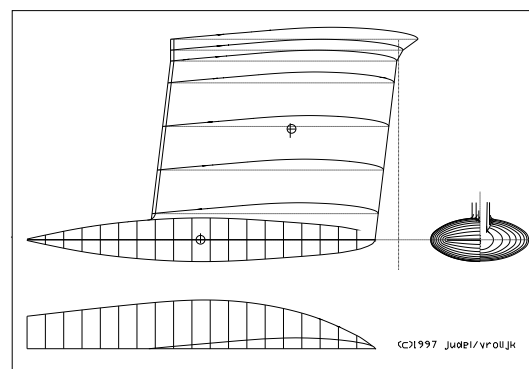


Abb. 21: Flächenkiel im Tanktest

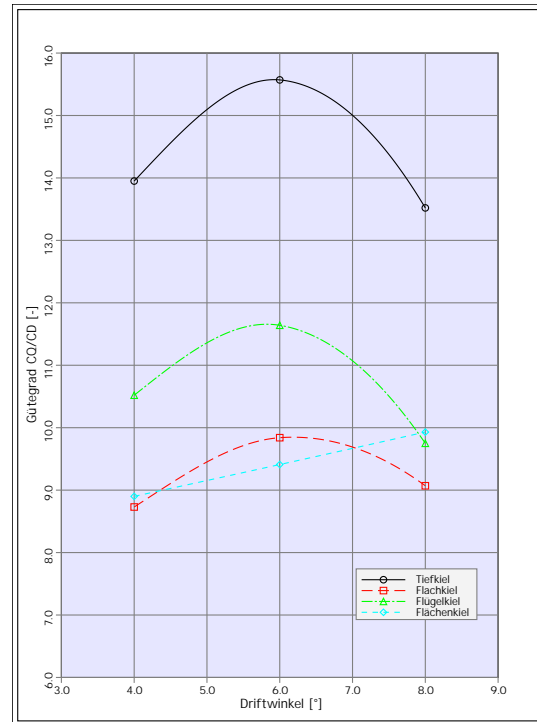
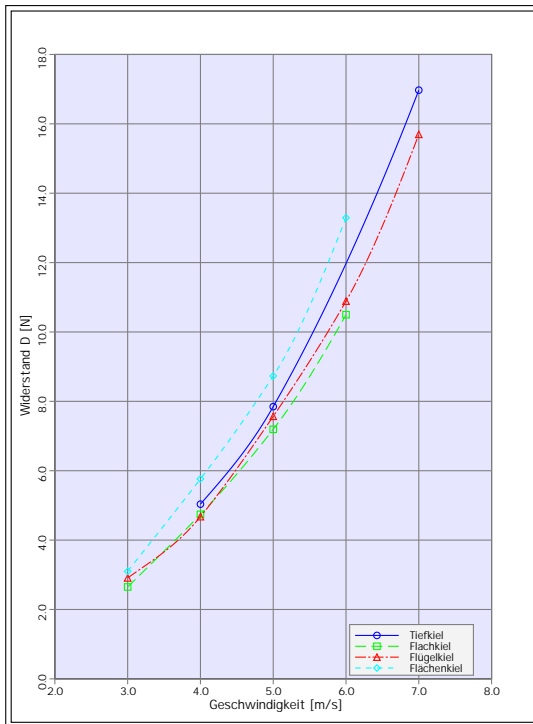


Abb. 22: Schleppwiderstand der Kiele im Tanktest

Abb. 24: Kielgütegrade im Tanktest ($\varphi = 15^\circ$)

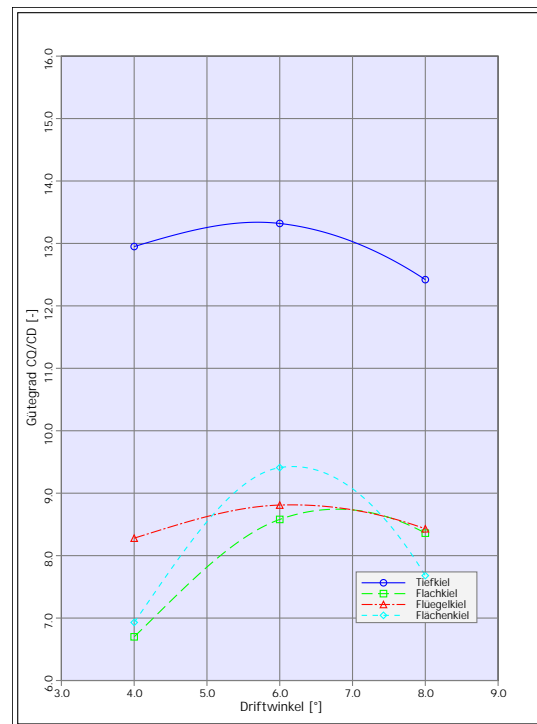
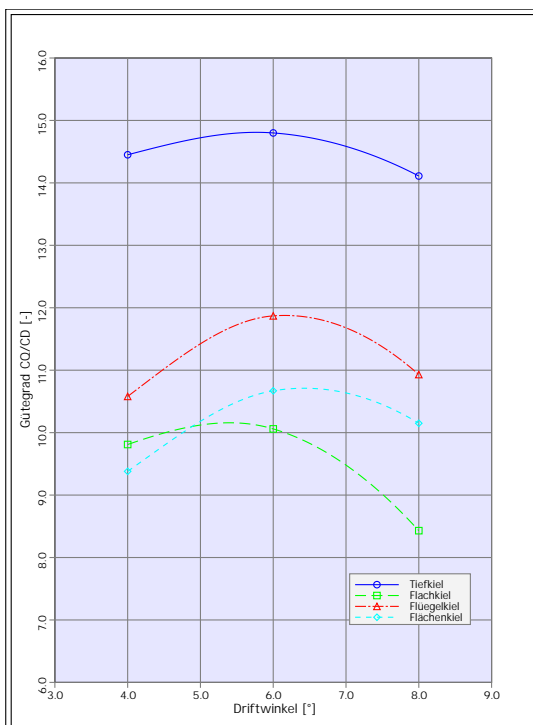


Abb. 23: Kielgütegrade im Tanktest ($\varphi = 0^\circ$)

Abb. 25: Kielgütegrade im Tanktest ($\varphi = 25^\circ$)

kielversionen ($T = 1.45m$) (Abb. 19 bis 21). Die Profile sind numerisch gefräst worden, so daß eine große Maßhaltigkeit garantiert werden kann. Aus Herstellungsgründen ist der Bulb beim Flach- und Flügelkiel rotationssymmetrisch. Die Flügel (NACA 63.2-015) sind nach unten angestellt und schließen mit der Unterkante des Kiels ab. Die Streckungslänge der Flügel beträgt $0.35m$ bzw. am Modell $70mm$. Als dritter Flachkiel wurde eine Version aus dem Büro Judel/Vrolijk gewählt, deren Bulb dem gespiegelten Unterwasserschiff einer Jolle ähnlich ist und folgend als Flächenkiel bezeichnet wird.

Das Versuchsprogramm beinhaltet 4 unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten ($V = 3 - 6 \frac{m}{s}$, $R_N = 1.1 - 2.7 \cdot 10^6$, 4 Driftwinkel ($\lambda = 0^\circ, 4^\circ, 6^\circ$ und 8°), die aufrechte Lage und zwei Krängungswinkel ($\varphi = 15^\circ$ und 25°). Auf den Abbildungen 23 bis 25 sind für alle vier untersuchten Kiele die vergleichenden Gütegrade für eine Anströmgeschwindigkeit von $4.5 \frac{m}{s}$, dem entspricht eine Reynolds-Zahl von $1.5 \cdot 10^6$ (Tiefkiel) bis $1.8 \cdot 10^6$ (flache Kiele) und eine mittlere Froudezahl der Großausführung von 0.2 als Funktion des Driftwinkels dargestellt. Die Diagramme gelten für drei unterschiedliche Krängungswinkel (0° , 15° und 25°).

Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 6 die auf den Tiefkiel bezogenen prozentualen Abweichungen der Gütegrade aller untersuchten Kiele aufgelistet.

Wie auch bei den Modellversuchen in der SVA zeigt der Tiefkiel die besten Eigenschaften, während von den Flachkielen der Flügelkiel zumindest bis zu Krängungswinkeln von 15° überlegen ist. Die Gütegrade des Flachkiels mit Bulb unterscheiden sich von den Flächenbulbkiel bis zu Krängungswinkeln von 15° nur geringfügig.

Die in Klammern angegebenen Zahlen in der Tabelle 6 sind die entsprechenden Werte aus den Modellversuchen mit dem gesamten Schiff. Zu berücksichtigen ist hierbei, daß die Krängungswinkel bei den Modellversuchen in der SVA etwas kleiner waren und der Bulb des Flachkiels eine widerstandsärmere Form hatte. Das erklärt die etwas besseren Gütegrade der Kiele mit Schiff hinreichend. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen kann die Übereinstimmung der qualitativen Ergebnisse als zufriedenstellend angesehen werden

und läßt die Schlußfolgerung zu, daß vergleichende Modellversuche mit Kielen im Umlauf-tank aussagekräftige Schlußfolgerungen zulassen.

Der Flächenkiel und im geringeren Umfang auch der Flügelkiel sind äußerst empfindlich gegen Trimmänderungen. Während Auftriebskräfte (Lift) noch akzeptabel erscheinen, bewirken abwärts gerichtete Kräfte, die zum Beispiel bei achterlichem Wind und vorlichem Trimm auftreten können, eine erhebliche Widerstandszunahme. Bereits bei dem im Umlauf-tank der Meßstrecke sorgfältig ausgerichteten Flächenkiel lagen die Auftriebskräfte bei 25° Krängung bis zu 18% über dem Querkraftanteil.

Nicht betrachtet wurde bisher die Krängungsstabilität. Alle Kiele sind so ausgelegt worden, daß sie das gleiche statische aufrichtende Moment liefern. Das erfordert bei den Flachkielen einen größeren Ballastanteil und damit eine größere Verdrängung des Rumpfes. Dieser Zusatzwiderstand konnte bei den Kieluntersuchungen im Umlauf-tank nicht berücksichtigt werden. Ebenso blieb das dynamische Krängungsmoment unberücksichtigt, welches bei gleicher Querkraft und mit zunehmendem Tiefgang (Streckungslänge) wächst und bei den Flachkielen demnach entsprechend geringer (günstiger) wird. Eine Ausnahme stellt hier der Flügelkiel dar. Die Flügel werden zur Reduktion der induzierten Geschwindigkeiten eingesetzt und erzeugen somit ein zusätzliches krängendes Moment.

Schließlich muß für die Beurteilung der Qualität der unterschiedlichen Kiele der Schleppwiderstand berücksichtigt werden, der auf Abbildung 22 als Funktion der Anströmgeschwindigkeit aufgetragen wurde. Sofern keine Auftriebs- und Querkräfte wirksam werden, wird der Schleppwiderstand der untersuchten Kiele vom Anteil der benetzten Oberfläche und der Kantenlänge am Bootsboden (hier nicht vollständig enthalten) und Bulb bestimmt, während der Druckwiderstand bei allen Kielen sehr ähnlich sein dürfte.

Die Bewertung der einzelnen Kiele ist in Tabelle 7 zusammengefaßt.

λ [°]	φ [°]	Tiefkiel	Flachkiel	Flügelkiel	Flächenkiel
4	0	100%	68 %	73 %	65%
4	15	100%	63% (67%)*	76 %	64%
5	25	100%	58% (60%)**	66 %	63%
Mittelwert:		100 %	63 %	72 %	64%

*) $\varphi = 12^\circ$ **) $\varphi = 24^\circ$ $\lambda = 7^\circ$ aus Schleppversuchen mit dem Modell

Tabelle 6: Gütegrade der Flachkiele

	Tiefkiel	Flachkiel	Flügelkiel	Flächenkiel
mittlerer Gütegrad am Wind *	100	63	72	64
Schleppwiderstand *	100	91	95	115.7
statische Stabilität *	100	100	100	100
dynamische Stabilität/Krängungsmoment	mäßig	sehr gering	gering	gering
Widerstandszunahme durch Trimm	sehr gering	gering	mäßig	groß
Widerstandszunahme bei Tauchbewegungen (Erfahrungswerte ⁺)	gering	gering	mäßig	groß
Widerstandsbeeinflussung durch Rollbewegungen (aus Meßergebnissen [5])	positiv	gering	?	?

*) Angaben in [%] bezogen auf den Tiefkiel

positiv = evt. sogar widerstandsverringern

+) Ein weiteres Forschungsvorhaben zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Kielem ist in Zusammenarbeit mit der SVA geplant

Tabelle 7: Bewertung der verschiedenen Kiele

Kiel	λ	φ	δ	Gitterpunkte	Blöcke
Standardkiel	0	0	0	229 973	50
	4	12	3	235 478	50
	4	24	3	358 445	87
flacher Kiel	0	0	0	247 902	48
	4	12	3	239 975	48
	4	24	3	346 368	87
Flügelkiel	0	0	0	242 502	63
	4	12	3	316 692	59
	4	24	3	396 372	101

Tabelle 8: Diskretisierung des Strömungsgebiets

3 Berechnungen für viskose Strömung

Die Umströmung des Rumpfes von Segelbooten unterscheidet sich deutlich von derjenigen üblicher Handesschiffe. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich aus der Schräganströmung und der komplizierten Kiel-

Ruder-Geometrie. Durch die Anströmung mit Drift entsteht Asymmetrie, womit beide Schiffshälften zu berücksichtigen sind. Außerdem ist die Wechselwirkung zwischen Schiffsrumpf, Kiel und Ruder ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung der Strömung. Bei komplizierten Kielformen, wie z.B. bei Flügelkielen, ist der Rechenaufwand in Bezug auf die Gittergenerierung (Gittertopologie, Anzahl der Git-

terpunkte, Qualität des Rechengitters) und Rechenzeit (Auswahl der Zeitschritte und Anzahl der Iterationen) mehrfach höher als für die alleinige Berechnung der Umströmung eines Segelboottrumpfes.

Ziel der numerischen Untersuchungen war es, die Details der Strömung an den verschiedenen Kielen zu ermitteln, um so eine solide Grundlage für den Vergleich dieser Kiele zu schaffen.

3.1 Rechenverfahren

Die Berechnungen wurden mit zwei Rechenverfahren, TASCflow und Comet durchgeführt. Beide Rechenverfahren liefern qualitativ vergleichbare Rechenergebnisse.

In dem Rechenverfahren TASCflow werden zur Erfassung der inkompressiblen turbulenten Strömung die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANSE) und die Kontinuitätsgleichung numerisch gelöst. Als Turbulenzmodell zur Modellierung der Reynolds-Spannungen wird das $k-\varepsilon$ -Zweigliederturbulenzmodell eingesetzt [6].

Das Turbulenzmodell ist für vollturbulente Strömungen anwendbar. In unmittelbarer Wandnähe, wo diese Annahme nicht mehr gültig ist, wird das logarithmische Wandgesetz verwendet.

Eine Lösung der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen, der Kontinuitätsgleichung und der Gleichungen für das Turbulenzmodell kann nur numerisch erfolgen. Für die Lösung dieser partiellen Differentialgleichungen wird das Finite-Volumen-Verfahren verwendet. Dazu wird der Lösungsraum in einzelne Kontrollvolumina aufgeteilt. Die zu lösenden Gleichungen werden über diese Volumina integriert, diskretisiert und zu einem linearen Gleichungssystem approximiert [7].

Das Rechenverfahren TASCflow basiert auf einer konservativen Finite-Volumen-Methode. Das Verfahren verwendet körperangepaßte, nichtorthogonale, blockstrukturierte Rechengitter in Verbindung mit kartesischen Geschwindigkeitskomponenten und einer nicht versetzten Variablenanordnung [8].

Für die Lösung des resultierenden gekoppelten Gleichungssystems wird ein algebrai-

ches Mehrgitterverfahren verwendet [9]. Damit wird erreicht, daß die Rechenzeit etwa linear mit der Anzahl der Kontrollvolumina ansteigt.

3.2 Randbedingungen

Das Rechengbiet erstreckt sich von einer viertel Schiffslänge vor bis zu einer Schiffslänge hinter dem Schiff sowie eine halbe Schiffslänge nach außen und unter dem Kiel. Beim flachen Kiel wurde für 12° Krängung und 4° Drift die Verformung der freien Wasseroberfläche mit einem potentialtheoretischen Verfahren bestimmt und für die viskose Berechnung als reibungsfreie Wand weiterverwendet. Für alle anderen Rechenfälle ist die Verformung der freien Wasseroberfläche vernachlässigt worden. Am Einströmrand und an den äußeren Rändern wird ungestörte Strömung angenommen. Die Anströmgeschwindigkeit entspricht der Schiffsgeschwindigkeit. Am Ausströmrand werden die Ableitungen der Geschwindigkeit in der Hauptströmungsrichtung gleich Null gesetzt.

3.3 Gittergenerierung

Aufgrund der zahlreichen numerischen Berechnungen war es sinnvoll, die Anzahl der Gitterpunkte des Einzelgitters nicht zu verändern, damit der Rechenaufwand in vertretbaren Grenzen gehalten werden konnte. Die stark unterschiedlichen geometrischen Konfigurationen zwischen den verschiedenen Kielen erfordern die Anwendung von verschiedenen Gittertopologien und auch einer unterschiedlichen Anzahl von Gitterpunkten für jeden Kiel (siehe Tabelle 8).

Da das verwendete Rechengitter im allgemeinen zu grob ist, um jede Einzelheit der Strömung zu erfassen, steht hier der Vergleich der Haupteigenschaften der Strömung im Vordergrund. Jedoch sind die Tendenzen der verschiedenen Kiele zueinander vergleichbar. Für die Erfassung der absoluten Werte sind jedoch höhere Gitterauflösung und eine Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche unumgänglich.

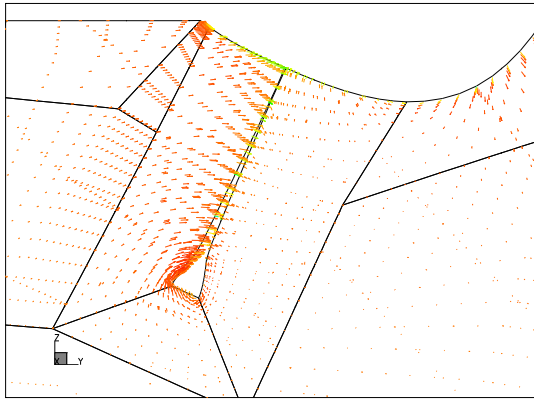


Abb. 26: Geschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Tiefkiels bei $\varphi = 24^\circ$, $\lambda = 4^\circ$ und $\delta = 3^\circ$

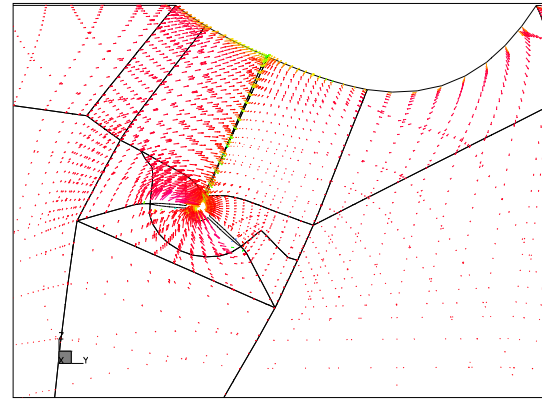


Abb. 28: Geschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Flügelkiels bei $\varphi = 24^\circ$, $\lambda = 4^\circ$ und $\delta = 3^\circ$

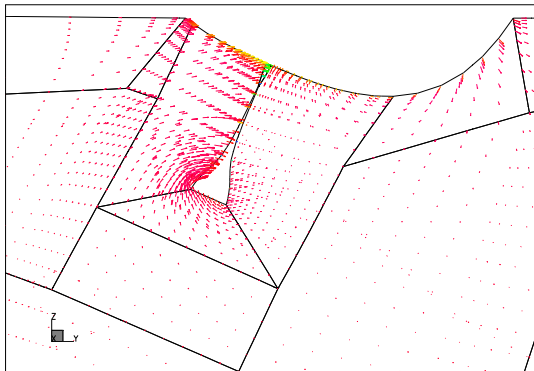


Abb. 27: Geschwindigkeitsvektoren an der Hinterkante des Flachkiels bei $\varphi = 24^\circ$, $\lambda = 4^\circ$ und $\delta = 3^\circ$

stärker ausgebildet sind und somit auch die größten Verluste aufweisen. Beim Flügelkiel ist die Geschwindigkeitsverteilung in diesem Bereich stärker aufgelockert und hat nicht mehr die gleiche Intensität, was sich auch in den Gütegraden dieses Kiels widerspiegelt. Am günstigsten ist das Strömungsbild des Tiefkiels, dessen Randwirbel an der Kielunterkante lange nicht das gleiche Volumen und die gleiche Mächtigkeit wie beim Flügelkiel aufweist.

Der Randwirbel des Flachkiels bleibt bis zum Ruder erhalten, womit insbesondere bei 12° Krängung starke Wechselwirkungskräfte zwischen Kiel und Ruder verbunden sind und der Gütegrad des Ruders bei dieser Kielversion erheblich abnimmt. An dem unteren Rand des Ruders ist die Überlagerung der Randwirbel von Ruder und Kiel zu erkennen. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen einen Vergleich der Strömungsbilder am Ruder für 12° Krängung und 4° Abdrift sowie 3° Ruderwinkel. Die Rudergeometrie blieb beim Tief- und Flachkiel unverändert. Durch die Verwendung von Winglets (Flügeln) können diese Wechselwirkungseffekte gemildert oder ganz abgebaut werden, womit eine Verbesserung der Gütegrade von Kiel und Ruder erreicht werden kann.

Ein Vergleich der Strömungsbilder von den unterschiedlichen Kielkonfigurationen zeigt, daß durch eine weitere Optimierung von Flügelkielen bessere Gütegrade zu erreichen sind. Hierzu gehören insbesondere die Bulbform und die Gestalt der Flügel. Außerdem ist bei flachen Kielen die Wechselwirkung zwi-

3.4 Ergebnisse

Als Rechenergebnisse stehen die Druckverteilung und die Quergeschwindigkeitskomponenten zur Verfügung. Während die Druckverteilung für 4° Driftwinkel und 24° Krängung gezeigt wird, ist die Geschwindigkeitsverteilung für Geradeausfahrt, 4° Driftwinkel und 12° Krängungswinkel sowie 4° Driftwinkel und 24° Krängungswinkel dargestellt worden.

Aus der großen Anzahl der vorliegenden Strömungsbilder werden hier nur einige wenige vorgestellt.

Die Abbildungen 26 bis 28 zeigen den Strömungszustand für 24° Krängung und 4° Abdrift vergleichend für die drei untersuchten Kiele in Verbindung mit dem Rumpf des Segeldynamometers. Deutlich erkennbar ist, daß die Randwirbel am Bulb der Flachkiele

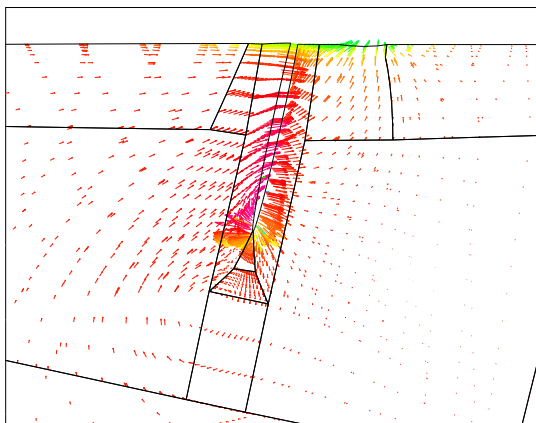


Abb. 29: Geschwindigkeitsvektoren am Ruder (Tiefkiel) bei $\varphi = 12^\circ$, $\lambda = 4^\circ$ und $\delta = 3^\circ$

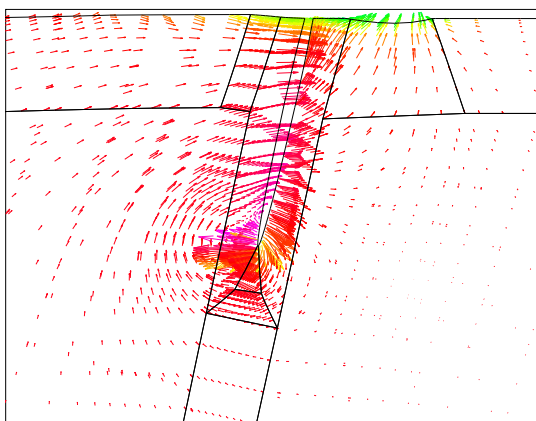


Abb. 30: Geschwindigkeitsvektoren am Ruder (Flachkiel) bei $\varphi = 12^\circ$, $\lambda = 4^\circ$ und $\delta = 3^\circ$

schen Kiel, Bootsrumppf und der freien Wasseroberfläche sowie zwischen Kiel und Ruder ein wichtiges Thema bei der Optimierung von Kielen.

Die Validierung der CFD-Berechnungen mit den Modellversuchsergebnissen stößt auf Schwierigkeiten, da den vorliegenden Rechenresultaten kleinere Driftwinkel (4°) zugrunde liegen. Qualitativ jedoch zeigt der Gesamtwiderstand des Modells mit den unterschiedlichen Kielen für 0° und 24° Krängung die gleiche Tendenz wie die Modellversuche. Das gilt nicht in gleicher Weise für die Querkräfte, so daß eine Gütegradbestimmung bisher noch nicht möglich ist. Ähnliches gilt für die Einzelwertbestimmung von Kiel und Ruder.

3.5 Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, wie komplex die Beschreibung der Umströmung von Kielen selbst bei stationärer Betrachtungsweise und wie hoch bereits in diesem Zustand der Berechnungsaufwand ist. Ungeachtet einiger größerer Abweichungen zwischen Messung und Berechnung konnte gezeigt werden, daß auf der Basis moderner CFD-Methoden Kiele von Segelyachten auf numerischen Wege seitens der Umströmung und der Druckverteilung beschreibbar sind und diese Methoden zukünftig ein wertvolles Hilfsmittel darstellen werden. Wirbelablösungen und Beeinflussungen der Anströmung des Ruders durch den davorliegenden Kiel können durch diese Berechnungen gut sichtbar gemacht werden. Auch wenn der Standardkiel von den flachen Kielen hinsichtlich der Leistungsparameter nicht übertroffen werden kann, wurde durch CFD-Berechnungen gezeigt, daß insbesondere der Flügelkiel deutliche Reserven aufweist.

4 Berechnung der Hydrodynamik mit Standardverfahren

Die hydrodynamischen Eigenschaften eines Segelboottrumpfes mit Anhängen – damit ist insbesondere Widerstand und Querkraft gemeint – werden heutzutage von den meisten Konstruktionsbüros mit Hilfe der sogenannten *Velocity Prediction Programs* (VPP) bereits im Entwurfsstadium analysiert.

In dem VPP werden die hydrodynamischen Eigenschaften des Rumpfs durch Extrapolation und Regression der Ergebnisse aus systematischen Modellversuchen mathematisch beschrieben und mit einer ähnlich gewonnenen mathematischen Beschreibung des Riggs für die interessanten Segelzustände ins Gleichgewicht gebracht.

Um die Qualität der in den Programmen verwendeten Ansätze zu bewerten, wurde das Verfahren zur Bestimmung der hydrodynamischen Kräfte in dem Programm *AHV-PP/1* (Feb. 92) der Firma AeroHydro Inc. mit den Ergebnissen der Modellversuche verglichen [10].

Für eine gegebene parallel zur Wasseroberfläche wirkende Querkraft (F_S), einen gegebenen Krängungswinkel φ und einer Bootsgeschwindigkeit V_S werden nach AHVPP zunächst aus der Geometrie des Rumpfes Tabellen für die benetzte Oberfläche WS und die LSM (Second Moment Length) in Abhängigkeit von dem Krängungswinkel ermittelt.

Der Widerstand in aufrechter Schwimmelage wird konventionell in einen Anteil für den Wellen- oder Restwiderstand, einen für den Reibungswiderstand sowie für den Propellerwiderstand aufgeteilt. Der Restwiderstand R_R wird durch Extrapolation aus den Modellversuchen von Gerritsma [11] ermittelt. Für den Reibungswiderstand wird der übliche Ansatz

$$R_F = \frac{\rho}{2} \cdot V_S^2 \cdot WS \cdot C_F \quad (2)$$

verwendet, wobei der Reibungswiderstandsbeiwert nach der ITTC-Line bestimmt wird:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(R_N) - 2)^2} \quad (3)$$

Die Reynoldszahl wird mit

$$R_N = 0.7 \cdot \frac{V_S \cdot LSM0}{\nu} \quad (4)$$

eingesetzt. $LSM0$ ist der Wert für LSM in der ungekrängten Lage.

Der Propellerwiderstand R_P wurde in unserem Fall nicht berücksichtigt, da am Modell auch kein Propeller vorhanden war.

Die Daten für den aufrechten Widerstand werden von dem Programm tabelliert ausgegeben und dienen unseren Untersuchungen als Eingabe (Tabelle 9).

Abb. 31 zeigt den von AHVPP/1 ermittelten Widerstand im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Verfahren und den Messungen aus dem Schleppversuch. Die Kurve für „Gerritsma (alt)“ basiert auf der alten Delfter Serie für typische IOR Schiffe, und zeigt, daß man mit großen Fehlern rechnen muß, wenn man diese für heutige IMS-Rümpfe anwendet.

Die Vergleichsdaten aus dem Modellversuch wurden mit der Standard-ITTC Methode für die Großausführung umgerechnet. Bei der Extrapolation wurde dabei ein Formfaktor von $k = 0.24$ ermittelt.

```

Resistance File: C:\USR\FAIRLINE\TIEFKIEL.VP1
Segeldynamometer mit Tiefkiel

Centerboard Surface Area (m^2): 0.000
Auxiliary Effective Horsepower: 0.000

Number of Resistance Data Points: 9

Resistance Table (Resistances are in kilograms)
V (kts)   Wave Res   Fric Res   Prop Res
0.000000  0.00000  0.00000  0.00000
2.193697  0.67779  4.7112  0.00000
3.290546  2.6312  9.8609  0.00000
4.387395  6.6829  16.6796  0.00000
5.484243  14.3753  25.0963  0.00000
6.581092  32.5699  35.0591  0.00000
7.677940  94.1122  46.5277  0.00000
8.774790  183.5870  59.4694  0.00000
9.871637  310.1747  73.8565  0.00000

Number of LSM and WS Data Points: 7

LSM and Wetted Surface Table
Heel (deg.)  LSM (m)  WS (m^2)
0.00  9.2059  21.560
2.00  9.2071  21.538
10.00  9.2368  21.330
20.00  9.2556  20.691
25.00  9.2277  20.314
30.00  9.1687  19.967
45.00  8.8054  19.227
    
```

Tabelle 9: Widerstand in aufrechter Lage aus AHVPP/1

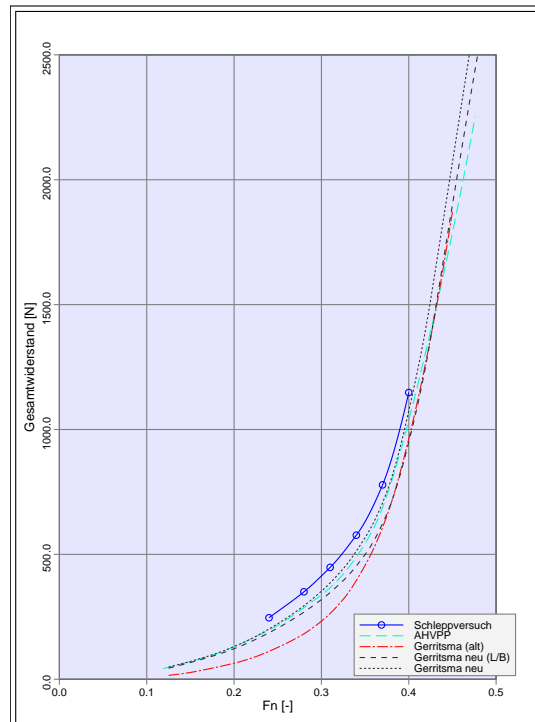


Abb. 31: Widerstandsprognosen in aufrechter Schwimmelage

Um den Einfluß der sich ändernden wellenbildenden Länge bei Krängung zu erfassen werden die Werte für eine effektive Geschwindigkeit

$$V_{EFF} = V_S \cdot \sqrt{\frac{LSM(0)}{LSM(\varphi)}} \quad (5)$$

den Tabellen entnommen. Der Reibungswiderstand wird dabei wie folgt korrigiert:

$$R_F = R_{F\ Tabelle} \cdot \frac{WS(\varphi)}{WS(0^\circ)} \quad (6)$$

Der Widerstand (ohne induzierten Widerstand) ist dann:

$$R_{TU} = R_F + R_R + R_P \quad (7)$$

Aus der durch die aerodynamischen Berechnungen gegebenen Seitenkraft (F_S) kann der erforderliche Querkraftbeiwert des Unterwasserschiffs berechnet werden:

$$C_S = \frac{2 \cdot F_S}{\rho V_S^2 \cdot A_{Ref}} \quad (8)$$

Den Beiwert des induzierten Widerstands erhält man mit

$$C_I = A(\varphi) \cdot C_S^2 \quad (9)$$

wobei

$$A(\varphi) = \frac{WS}{2 \cdot \pi \cdot T_{EFF}^2 \cos^2 \varphi} \quad (10)$$

ist. T_{EFF} bezeichnet dabei den effektiven Tiefgang.

Der induzierte Widerstand ist damit schließlich

$$R_I = \frac{\rho}{2} V_S^2 \cdot A_{Ref} \cdot C_I \quad (11)$$

und der Gesamtwiderstand im gekrängten Zustand

$$R_T = R_R + R_F + R_I. \quad (12)$$

Den entsprechenden dimensionslose Beiwert erhält man mit

$$C_D = \frac{R_T}{\frac{\rho}{2} V_S^2 \cdot A_{Ref}}. \quad (13)$$

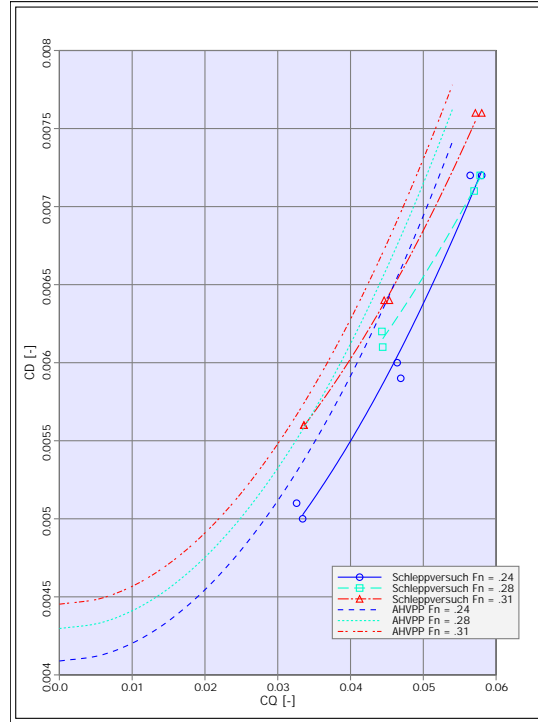


Abb. 32: Vergleich der Widerstandsbeiwerte bei 12° Krängung

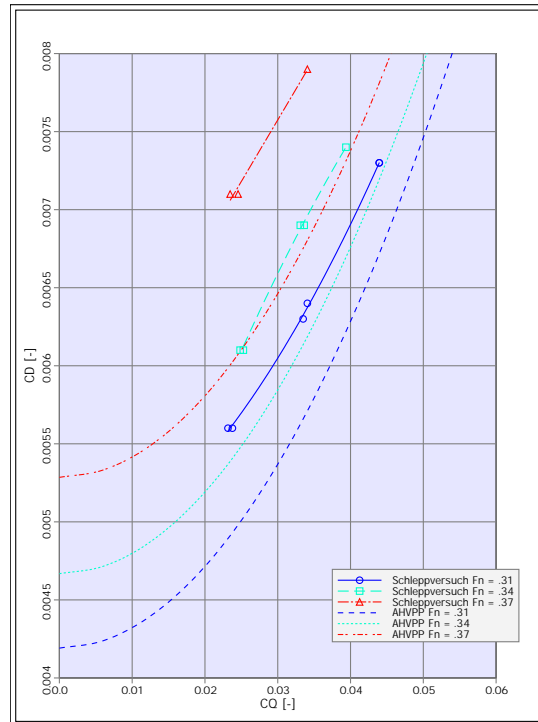


Abb. 33: Vergleich der Widerstandsbeiwerte bei 24° Krängung

Die Abbildungen 32 und 33 zeigen die Widerstandsbeiwerte (CD) über den für die Großausführung ermittelten Querkraftbeiwerten (CL). Wie auch in Abbildung 31 handelt es sich um Daten des Modells mit dem tiefen Standardkiel (Abb. 2).

Während bei 12° Krängung die Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Daten als ausreichend angesehen werden kann, sind die Abweichungen bei großen Krängungswinkeln erheblich. Als allgemeine Tendenz zeigt sich, daß der gemessene Widerstand größer ist, als von den Rechenverfahren prognostiziert. Dies mag vor allem dadurch begründet sein, daß die Linien des Dynamometers – trotz der Typähnlichkeit – außerhalb der Formvariationen der Delfter Serie liegen.

Bei Betrachtung der absoluten Werte liefert der Vergleich der gemessenen und berechneten Daten den Schluß, daß die Segelleistung des Dynamometers durch das VPP überschätzt wird und die Chancen bei Regatten damit geringer sind.

5 Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich die Grenzen und Möglichkeiten der verwendeten Prognoseverfahren. Die Modellversuche mit dem »Segeldynamometer« dienten dabei als Grundlage, da hier das gesamte System Schiff mit Kiel und Ruder untersucht worden ist und Umrechnungen der Schleppversuchsergebnisse auf die Großausführung für die CFD-Berechnungen und Vergleichsmessungen der Kiele im Kavitationstank nicht erforderlich waren. Eine Ausnahme stellen die Untersuchungen mit dem VPP-Verfahren dar, da in diesem Fall nur Fahrtzustände des Originals berechnet werden konnten.

Es ist unbestritten, daß die Kielversuche im Umlauftank für den stationären Fall zwar nicht die gleichen quantitativen Daten wie im Modellversuch mit dem Gesamtsystem liefern, deren relative Aussagen aber beim Vergleich der unterschiedlichen Kiele zueinander absolut zuverlässig sind. Dabei zeigt sich, daß der Tiefkiel den Flachkielen weit überlegen ist. Mit Flügeln (Winglets) kann zwar der Gütegrad verbessert werden, erreicht aber in

keinem Fall die Werte des Tiefkiels. Hingegen erfüllt der Flächenbulbkiel nicht die an ihn gestellten Erwartungen, zumal bei unterschiedlichem Trimm des Bootes mit erheblichen Zusatzwiderständen gerechnet werden muß. Diese Untersuchungen sollten unbedingt fortgesetzt werden, um andere Kielformen (z.B. Tandemkiele, Kimmkiele, Kielschwert-Systeme u.a.) aber auch weitere Flügel- und Bulbvarianten auf ihre Tauglichkeit zu prüfen und weiterzuentwickeln. Auch instationäre Analysen sollen in diese Betrachtungen einbezogen werden. Ein entsprechendes Versuchsprogramm ist in Zusammenarbeit mit der SVA Potsdam geplant.

Unentbehrlich erscheinen in Zukunft für die Optimierung von Rumpf, Kiel und Ruder CFD-Berechnungen, obwohl der hierfür erforderliche Rechenaufwand erheblich ist. Schon heute konnten mit den vorliegenden Ergebnissen Wechselwirkungseffekte zwischen Kiel und Ruder eindeutig nachgewiesen werden. Auch für die Anordnung von Winglets an unterschiedlichen Bulbformen geben die Strömungsbilder wichtige Hinweise. Allerdings ist die relativ grobe Gitteranordnung für komplizierte Kielkonfigurationen noch nicht ausreichend. Außerdem sollte später die freie Flüssigkeitsoberfläche in die CFD-Berechnungen einbezogen werden. Die bisher hierfür übliche potentialtheoretische Anbindung erscheint nicht zufriedenstellend. Da die Rechnerkapazität ständig gesteigert wird, bleibt zu hoffen, daß in absehbarer Zeit auch komplexe Systeme gelöst werden können und zu absoluten Ergebnissen führen, die für zuverlässige Leistungsprognosen geeignet sind.

Die Grenzen herkömmlicher VPP-Berechnungsverfahren für die Ermittlung des Widerstands und der Querkraft werden durch den Vergleich mit den Modellversuchsergebnissen nachhaltig demonstriert. Bereits geringe Abweichungen von der Standardrumpfform führen zu abweichenden Daten und stellen eine Optimierung des Entwurfs mit Hilfe derartiger Programme in Frage. Außerdem können schwierige Kielkonfigurationen nur unzureichend erfaßt werden. Da für die Ermittlung der aerodynamischen Kräfte sicher ähnliches gilt, sollten neue Berechnungsmethoden angestrebt werden.

6 Symbole

A_{Ref}	Referenzfläche
B_{WL}	Breite der Wasserlinie
C_F	Reibungsbeiwert
C_S	Querkraftbeiwert
C_I	Beiwert des induzierten Widerstands
C_D	Widerstandbeiwert
LSM	Second Moment Length
F_N	Froude Zahl = V/\sqrt{gl}
F_S, Q	Querkraft
R_F	Reibungswiderstand
R_N	Reynoldszahl = $V \cdot l/\nu$
R_R	Restwiderstand
$R_{T, D}$	
R	Gesamtwiderstand
Δ	Displacement
V_S	Schiffsgeschwindigkeit
WS	Benetzte Oberfläche
δ	Ruderwinkel
ϵ	Gleitzahl
λ	Abdriftwinkel
φ	Krägungswinkel
ρ	Dichte
ν	kinematische Viskosität = μ/ρ
ψ, θ	Trimmwinkel

- [7] **M. Abdel-Maksoud, S. Bschorer und G. Scheuerer:** *Numerische Berechnung der viskosen Strömung um einen rotierenden Propeller*, Schiffbautechnische Gesellschaft, 1995
- [8] **M. Raw und et al:** *An Element-Based Finite Volume Method for Computing Viscous Flow*, Int. J. Num. Meth. Fluids, 1995
- [9] **M. J. Raw:** *A Coupled Algebraic Multigrid Method for the 3D Navier-Stokes Equation in Fast Solvers for Flow Problems*, Vol 49, pp. 204–215 W. Hackbusch and G. Wittum, 1995
- [10] AeroHydro, Inc., P.O. Box 684/Main Street, Southwest Harbour, ME 04679 USA *AHVPP/1 Velocity Prediction Program*, 2 1992
- [11] **J. Gerritsma, R. Omnink und A. Verslius:** *Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series*, International Shipbuilding Progress, 1981

Literatur

- [1] **H. Brandt:** *Das Forschungsprojekt eines Segeldynamometers*, in: *17. Symposium Yachtentwurf und Yachtbau*, pp. 9–42, Hamburg, 1996
- [2] **H. Brandt und K. Hochkirch:** *Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aero- und hydrodynamischen Kräfte*, ISM-Bericht 97/4, 1. Zwischenbericht zum BMBF-Projekt 616-3892-MTK 593, Technische Universität Berlin, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, 1997
- [3] **M. Fröhlich:** *Optimierung von Kielen einschließlich Rumpf für Segelyachten auf der Basis eines numerischen Rechenverfahrens für viskose und instationäre Strömung*, Projekt 1022, Schiffbau Versuchsanstalt Potsdam GmbH, 1997
- [4] **H. Brandt und B. Krüger:** *Untersuchungen von Kielmodellen im Kavitationstank*, ISM-Bericht 97/6, Technische Universität Berlin, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, 1997
- [5] **T. Voges:** *Induzierter Widerstand und Auftrieb an Kielen mit oszillierender Bewegung*, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, 1994
- [6] **B. E. Launder und D. B. Spalding:** *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng, Vol. 3, pp. 269–289, 1974