

# Segelleistungsprognose aus Messungen im Originalmaßstab

Karsten Hochkirch\*  
Hartmut Brandt \*\*

Hamburg, den 04/05.11.2000

## Abstract

*Mit einem »Segeldynamometer« wurden Messungen der aerodynamischen Kräfte im Originlmaßstab durchgeführt. Für die verschiedensten Windgeschwindigkeiten und Kurse zum Wind konnten mit dieser speziellen Meßyacht die resultierenden aerodynamischen Kräfte bestimmt werden.*

*Die Messungen zeigen, daß u.a. durch den Trimm der Segel ein starker Einfluß auf die Höhe des virtuellen Kraftangriffspunktes möglich ist und dadurch höhere Geschwindigkeiten erzielt werden können als konventionelle VP-Programmen prognostizieren. Um diesen Effekt in der VPP-Formulierung richtig zu erfassen, wird ein entsprechend erweitertes Modell vorgeschlagen und in einem VP-System implementiert. Die mit diesem Programm berechneten Geschwindigkeiten zeigen gute Übereinstimmung mit den Meßdaten.*

## 1 Einleitung

Geschwindigkeitsprognoseverfahren (VPP) für Segelyachten sind heutzutage weit verbreitet und werden von verschiedenen Interessengruppen genutzt: Zum einen wird die Geschwindigkeitsprognose bei der Bewertung der Leistung des Seglers in Regatten mit verschiedenen Booten eingesetzt. Während man in der Vergangenheit einfache Vermessungsformeln wie BOM<sup>1</sup> oder IOR<sup>2</sup> verwendet hat, die nur geometrische Größen der Schiffe berücksichtigen, wird heutzutage das International Measurement System (IMS) eingesetzt, um die Leistung verschiedener Schiffe untereinander zu vergleichen. Bei diesem System entscheidet das Verhältnis zwischen

---

\*mailto:K.Hochkirch@gmx.de

\*\*mailto:Brandt@ism.tu-berlin.de

<sup>1</sup>BOM – Builders Old Measurement

<sup>2</sup>IOR – International Offshore Rule

einer von einem Leistungsprognoseprogramm ermittelten theoretisch möglichen Geschwindigkeit des Schiffes und der real gesegelten Zeit über Sieg oder Niederlage.

Weiterhin werden von den Konstrukteuren Geschwindigkeitsprognosen durchgeführt, um die Leistung der Entwürfe bereits in der Designphase abzuschätzen, und Entwurfsvarianten vergleichen zu können. Konstruktionserfolge können deswegen nur erzielt werden, wenn die physikalischen Zusammenhänge hinreichend von dem VPP wiedergegeben werden können. Die Prognosen der heute allgemein verfügbaren Verfahren sind jedoch noch nicht ausreichend genau, um alle Einflußgrößen richtig zu beurteilen.

Die Ergebnisse dieser VPP's hängen vor allem von den verwendeten mathematischen Modellen der einzelnen Kraftkomponenten ab, die man entweder aus experimentellen oder numerischen Untersuchungen ableitet. Zu Berücksichtigen ist dabei, daß in der Modellversuchstechnik sowie auch bei numerischen Verfahren viele Vereinfachungen verwendet werden, die die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einschränken.

Durch den Einsatz eines einzigartigen Meßinstruments, das sogenannte »Segeldynamometer«, können die bei der Geschwindigkeitsprognose eingesetzten Rechenmodelle mit Meßwerten einer real segelnden Yacht überprüft werden ohne auf Maßstabeffekte angewiesen zu sein. Mit diesen Daten können Fehler der Rechenmodelle identifiziert und verbessert werden.

Im Rahmen dieses Beitrags soll gezeigt werden, daß die mit Hilfe des Meßinstruments »Segeldynamometer« qualitativ hochwertige Daten im Originalmaßstab gesammelt werden können. Bereits aus den bisher gesammelten Daten konnte ein aerodynamisches Modell abgeleitet werden, mit dessen Hilfe eine bessere Prognose des Leistungspotentials der Yacht möglich ist.

Im folgenden sollen zunächst Geschwindigkeitsprognosen für das »Segeldynamometer« mit den gemessenen Geschwindigkeiten gegenübergestellt werden, um damit die Problematik zu verdeutlichen. Danach wird gezeigt, wie mit Hilfe der Meßergebnisse der des »Segeldynamometers« ein aerodynamisches Kraftmodell abgeleitet wird und damit eine bessere Geschwindigkeitspronose möglich wird.

## 2 Geschwindigkeitsprognose von Segelyachten

Betrachtet man eine Segelyacht, die sich bei konstanten Wind- und Seeverhältnissen mit gleichförmig vorwärts bewegt, so müssen die auf sie wirkenden Kräfte und Momente im Gleichgewicht sein. Bild 1 zeigt die wichtigsten Kräfte, die bei einer Geschwindigkeitsprognose berücksichtigt werden sollten. Den aerodynamischen Kräften des Riggs stehen die hydrodynamischen Kräfte an Kiel, Ruder und Rumpf gegenüber.

Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung des Segelzustandes bei einer konstanten Windgeschwindigkeit und einem fest gewählten Kurs zum Wind sind



## 2 GESCHWINDIGKEITSPROGNOSE VON SEGELYACHTEN

Für alle Teile der Yacht müssen die Kräfte für den jeweiligen Betriebszustand mathematisch modelliert werden. Zur Vereinfachung wird in vielen VP-Programmen auf die Modellierung der Abdrift und des Ruderwinkels verzichtet und das gesamte Unterwasserschiff als eine Einheit betrachtet. Daß bereits eine Verbesserung der Geschwindigkeitsprognose durch Berücksichtigung des Ruderwinkels erreicht werden kann, wurde von VAN OOSSANEN (1995) gezeigt.

Für die Modellierung der einzelnen Kräfte kommen gegenwärtig drei verschiedene Verfah-

Modul	Freie Variable	Zeichen	Nimmt Einfluß auf... (d.h. $\frac{\partial f_i}{\partial \xi_i} \neq 0$ )			
			$F_X$	$M_X$	$F_Y$	$M_Z$
Rumpf	Geschwindigkeit	$V_S$	⊗	⊙	○	○
	Krängung	$\varphi$	⊗	⊗	○	○
	Abdrift	$\lambda$	○		○	○
	Ruderwinkel	$\delta$				
	Reffaktor	$\sigma$				
	Trimmfaktor	$\tau$				
Kiel	Geschwindigkeit	$V_S$	⊙	⊙	○	○
	Krängung	$\varphi$	⊙	⊙	○	○
	Abdrift	$\lambda$	○	○	○	○
	Ruderwinkel	$\delta$				
	Reffaktor	$\sigma$				
	Trimmfaktor	$\tau$				
Ruder	Geschwindigkeit	$V_S$	⊙	⊙	○	○
	Krängung	$\varphi$	⊙	⊙	○	○
	Abdrift	$\lambda$	○	○	○	○
	Ruderwinkel	$\delta$	○	○	○	○
	Reffaktor	$\sigma$				
	Trimmfaktor	$\tau$				
Rigg	Geschwindigkeit	$V_S$	⊗	⊗	○	○
	Krängung	$\varphi$	⊗	⊗	○	○
	Abdrift	$\lambda$				
	Ruderwinkel	$\delta$				
	Reffaktor	$\sigma$	⊗	⊗	○	○
	Trimmfaktor	$\tau$	⊗	⊗	○	○

⊗ – starke Kopplung vorhanden und wird von allen VPP's berücksichtigt

⊙ – starke Kopplung wird bei den meisten Programmen bei den Rumpfkraften berücksichtigt

○ – starke Kopplung vorhanden, wird jedoch nur von wenigen VPP's berücksichtigt

Das Gleichgewicht  $\sum F_Y \stackrel{!}{=} 0$  wird von Programmen, die nicht den Abdriftwinkel berechnen, implizit vorausgesetzt.

Tabelle 1: Die wichtigsten Kopplungen zwischen den freien Variablen und den Gleichgewichtsbedingungen bei einer stationär segelnden Yacht

		Methoden		
		experimentell	potentialtheoretisch	RANSE
RIGG	Vortrieb	z.B. Hazen (1980)	z.B. Milgram (1971)	z.B. Caponnetto et. al. (1999)
	Querkraft			
	krängendes Moment			
	gierendes Moment			
	trimmendes Moment			
RUMPF	Widerstand	z.B. Keuning und Sonnenberg (1999)	z.B. Kuhn und Scragg (1993)	z.B. Fröhlich (1997)
	Querkraft			
	aufrichtendes Moment			
	Giermoment			
	Trimmoment			

Einsatz in VP-Programmen:	fast immer	selten	sehr selten	unbekannt
---------------------------	------------	--------	-------------	-----------

Tabelle 2: Methoden zur Modellierung der Kraftanteile und deren Einsatz zur Geschwindigkeitsprognose

ren in Frage. Neben den traditionelle Verfahren auf experimenteller Basis – angefangen bei den *Gimcrack-Koeffizienten* von DAVIDSON (1936) für die aerodynamischen Kräfte oder Modellversuche für das Unterwasserschiff, gewinnen numerische Verfahren zunehmend an Bedeutung, werden aber nur in einzelnen Fällen für die Geschwindigkeitsprognose eingesetzt. Tabelle 2 stellt den Einsatz dieser Verfahren zur Geschwindigkeitsprognose bei Segelyachten dar. Der gegenwärtige Stand der Technik für allgemeine Prognoseverfahren sind Modelle aus experimentellen Untersuchungen – bei den hydrodynamischen Kräften meistens aus der bekannten Delfter Serie (DSYHS) (GERRITSMAN ET AL., 1981; KEUNING UND SONNENBERG, 1999, u.a.) und für die aerodynamischen Kräfte werden die sogenannten IMS Koeffizienten verwendet, die auf der Arbeit von HAZEN (1980) beruhen und vom ITC<sup>3</sup> in regelmäßigen Abständen erweitert und modifiziert werden (vgl. CLAUGHTON, 1999), um eine bessere Beurteilung der Segler zu gewährleisten.

## 2.1 Standardverfahren

Mit zwei verschiedenen VP-Programmen wurden für dieses Schiff Leistungsprognosen durchgeführt. Zum einen mit dem Program *AHVPP/1<sup>4</sup>* (AeroHydro, Inc., 1992) und zum anderen mit dem Programm des International Measurement System (IMS)<sup>5</sup>(vgl. POOR, 1986). In Bild 16<sup>6</sup>

<sup>3</sup>ITC – International Technical Committee

<sup>4</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Dipl.-Ing. R. Siegel, AeroHydro Rep. Germany

<sup>5</sup>Mit freundlicher Unterstützung von Friedrich Judel

<sup>6</sup>Die Polardiagramme befinden sich auf den letzten Seiten dieses Papers

Länge über Alles	$L_{OA}$	=	9.99 m
Länge in der Wasserlinie	$L_{WL}$	=	9.50 m
größte Breite	$B$	=	2.98 m
Breite in der Wasserlinie	$B_{WL}$	=	2.53 m
Tiefgang (seeklar mit Besatzung, auf ebenem Kiel)	$T$	=	2.05 m
Rumpftiefgang	$T_C$	=	0.46 m
Displacement (seeklar)	$\Delta_{(leer)}$	=	4160 kg
Gewicht Crew und Ausrüstung	$\Delta_{(C+G)}$	=	400 kg
Displacement (incl. Crew und Ausrüstung)	$\Delta$	=	4560 kg
Verdrängung in Seewasser ( $\rho = 1015 \text{ kg/m}^3$ )	$\nabla$	=	4.492 m <sup>3</sup>
Ballast	$\Delta_{(Ballast)}$	=	1150 kg
Segelfläche am Wind	$AS$	=	55.9 m <sup>2</sup>

Tabelle 3: Hauptabmessungen des »Segeldynamometers« - mit Crew und Ausrüstung

sind die Ergebnisse dieser beiden Verfahren für verschiedene Windgeschwindigkeiten zusammen mit den Meßwerten der Großausführung dargestellt. Dabei muß beachtet werden, daß bei den Rechnungen kein Spinnaker berücksichtigt wurde.

Insbesondere prognostiziert AHVPP/1 geringere Luv Geschwindigkeiten und höhere Geschwindigkeiten auf raumen Kursen als nach IMS angegeben werden. Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Modellversuchen und den Annahmen des Programms AHVPP/1 wurden bereits von BRANDT ET AL. (1997) diskutiert. Es ist deutlich zu sehen, daß beide Verfahren die Segelleistung der Yacht nur unzureichend prognostizieren. Insbesondere *am Wind* zeigen sich erhebliche Geschwindigkeitsdifferenzen.

## 3 Großausführungsversuche

### 3.1 Das »Segeldynamometer«

In einem durch das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und verschiedenen Partnern aus der Industrie geförderten Projekt am Institut für Schiffs- und Meerestechnik (ISM) der Technischen Universität Berlin (TUB) wurde in Deutschland erstmals ein sogenanntes Segeldynamometer entwickelt und bereits erfolgreich eingesetzt, um heute verwendete Verfahren zu verifizieren (vgl. BRANDT UND HOCHKIRCH, 2000). Vergleichbare Projekte wurden bisher nur in den USA von MILGRAM (1993) und in Japan von MASUYAMA UND FUKASAWA (1997) durchgeführt.

Das »Segeldynamometer« konnte bereits 1998 auf der Hamburger Bootsmesse besichtigt werden und wurde in diesem Zusammenhang von BRANDT UND HOCHKIRCH (1998) vorgestellt. Die an Bord eingesetzte Meßtechnik soll hier nicht detailliert diskutiert werden und es

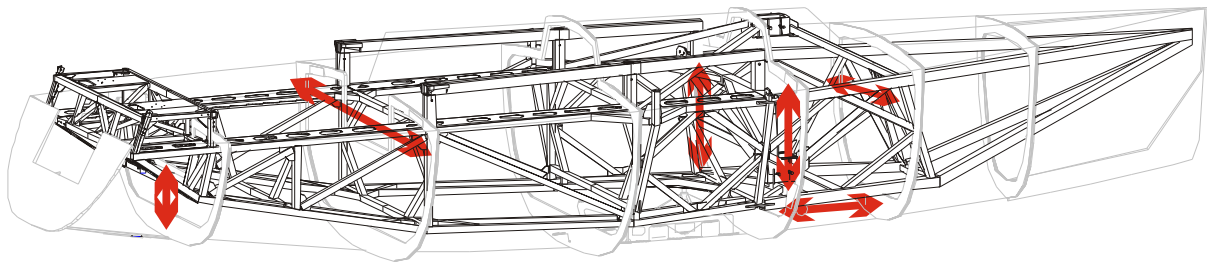


Bild 2: Funktionsprinzip der Riggwaage

wird auf HOCHKIRCH (2000) für eine ausführliche Beschreibung verwiesen. Es handelt sich dabei um ein moderne Segelyacht von 10 m Länge, deren Hauptabmessungen in Tabelle 3 zusammengefaßt sind.

Das »Segeldynamometer« verfügt neben diversen anderen Meßgeräten über eine Sechskomponenten-Waage, welche die Messung der resultierenden aerodynamischen Kräfte ermöglicht. Bild 2 zeigt eine prinzipielle Darstellung dieser Riggwaage. Im Innenraum des Schiffes befindet sich eine steife Schweißkonstruktion aus Aluminiumprofilen, auf der das gesamte Rigg befestigt ist. An allen Stellen, an denen das Rigg oder dieser Riggträger das Deck durchdringt, wurde ein Abstand von 50 mm gewährleistet und nur mit einer flexiblen Membran gegen das Eindringen von Wasser verschlossen. Der Riggträger selbst ist über 6 Kraftmeßzellen statisch bestimmt mit dem Rumpf verbunden und erlaubt damit die direkte Messung der durch das Rigg erzeugten Kräfte.

Da die Kraftaufnehmer der Riggwaage – im Gegensatz zu Mehrkomponentenwaagen bei Modellversuchen – aufgrund der sich ständig ändernden Krängungs- und Trimmwinkel der Yacht neben den aerodynamischen Kräften auch durch unterschiedliche Gravitationskräfte beaufschlagt werden, mußte ein spezielles Kalibrierungsverfahren entwickelt werden, das neben den Signalen der Kraftaufnehmer auch die Lage der Waage mit berücksichtigt (vgl. HOCHKIRCH, 2000). Bild 3 zeigt das »Segeldynamometer« bei Kalibrierungsmessungen an der Ostsee: Mit einem dünnen Seil werden Kräfte auf das Rigg aufgebracht und deren Angriffspunkt und die Kraftrichtung mit einem Theodoliten bestimmt. Die Stärke der Kraft wird mit einer kalibrierten Meßdose registriert. Weitere Kalibrierungsmessungen wurden auch an Land durchgeführt.

### 3.2 Aerodynamisches Modell aus den Messungen

Für die Modellierung der aerodynamischen Kräfte wird aus den Meßwerten ein einfaches globales Kraftmodell abgeleitet, daß von seiner Struktur dem von HAZEN (1980) verwendeten entspricht und so mit den Verfahren, die bei den anderen Prognoseprogrammen verwendet



Bild 3: Kalibrierung der Riggwaage mit Messungen an Land und im Wasser

werden verglichen werden kann. Um den Rahmen dieser Arbeit einzugrenzen, wird hier für alle Kurse nur die Konfiguration Großsegel mit Genua III eingehender betrachtet.

### 3.3 Auftrieb und Widerstand des Riggs

Die aerodynamischen Kräfte werden am geeignetsten durch den Auftriebsbeiwert

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho_L}{2} V_{WA}^2 AS} \quad (1)$$

und den Widerstandsbeiwert

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho_L}{2} V_{WA}^2 AS} \quad (2)$$

dargestellt. Dabei ist  $V_{WA}$  die scheinbare Windgeschwindigkeit auf Höhe des Segelschwerpunktes,  $AS$  die nominelle Segelfläche am Wind, die analog zu IMS (vgl. POOR, 1986) mit

$$AS = \frac{AS_{Gross}}{1.16} + \frac{IJ}{2} \quad (3)$$

aus der Fläche des Großsegels ( $AS_{\text{Gross}}$ ) und dem Vorsegeldreieck berechnet wird. Mit der scheinbaren Windrichtung  $\beta_A$  auf Schwerpunkthöhe und den im schiffsfesten Koordinatensystem B gemessenen Kräften  $F_X$  und  $F_Y$  erhält man den Auftrieb mit

$$D = F_X \sin \beta_A + F_Y \cos \beta_A \quad (4)$$

und die Querkraft mit

$$L = F_X \cos \beta_A - F_Y \sin \beta_A. \quad (5)$$

Sowohl der Auftriebsbeiwert  $C_L$ , als auch der Widerstandsbeiwert  $C_D$  sind von dem scheinbaren Windeinfallswinkel abhängig. Der Widerstandsbeiwert besteht dabei aus einem Anteil, der vor allem durch viskose Effekte an den Segeln hervorgerufen wird ( $C_D^{(vis)}(\beta_A)$ ), einem Widerstand der Spieren und des stehenden Gutes ( $C_{DP}(\beta_A)$ ), sowie einem induzierten Widerstand ( $C_{DI}(C_L)$ ), der von dem produzierten Lift abhängig ist.

Anders als bei den hydrodynamischen Kräften, deren Einflußparameter (Krängung, Trimm, Geschwindigkeit etc.) relativ exakt gemessen werden können, sind die Eigenschaften des Riggs weiterhin wesentlich von Trimm<sup>7</sup> und Segelstellung abhängig.

Von KERWIN (1978) wurden zur Beschreibung der aerodynamischen Auftriebsbeiwerte die Parameter  $\tau$  und  $\sigma$  eingeführt, um den unterschiedlichen Trimmöglichkeiten des Riggs Rechnung zu tragen. Wenn das Rigg mit voller Segelfläche und optimalem Segelprofil getrimmt ist, haben beide Parameter den Wert 1.0. Dies ist gleichzeitig der maximal mögliche Wert.

Das Reffen der Segel wird durch den Parameter  $\sigma$  – oder auch *REEF* – ausgedrückt. Durch Reffen wird die effektive Segelfläche um einen  $\sigma^2$  proportionalen Wert verkleinert. Außerdem senkt sich direkt proportional zu  $\sigma$  der Segelschwerpunkt.

Der Parameter  $\tau$  – oder auch *FLAT* – beschreibt direkt den Trimm der Segel. Ein Wert von 1.0 bedeutet, die Segel produzieren den maximalen Vortrieb, ein Wert von 0.5 bedeutet, daß die Segel derart flach getrimmt wurden, daß sie nur noch den halben Auftrieb erzeugen.

Damit kann man für Auftriebs- und Widerstandsbeiwert schreiben:

$$C_L = C_L^{(opt)}(\beta_A) \sigma^2 \tau \quad (6)$$

$$C_D = C_D^{(vis)}(\beta_A) \sigma^2 + C_{DI}(C_L) + C_{DP}(\beta_A). \quad (7)$$

Mit der projizierten Fläche von Mast und stehendem Gut in Schiffslängsachse ( $AP_X$ ) bzw. ( $AP_Y$ ) von der Seite kann man mit den Widerstandsbeiwerten  $C_{WPX}$  und  $C_{WPY}$  den zusätzlichen Widerstand mit

$$C_{DP}(\beta_A) = \frac{C_{WPX}AP_X |\cos \beta_A| + C_{WPY}AP_Y |\sin \beta_A|}{AS} \quad (8)$$

<sup>7</sup>Gemeint ist der Trimm der Segel.

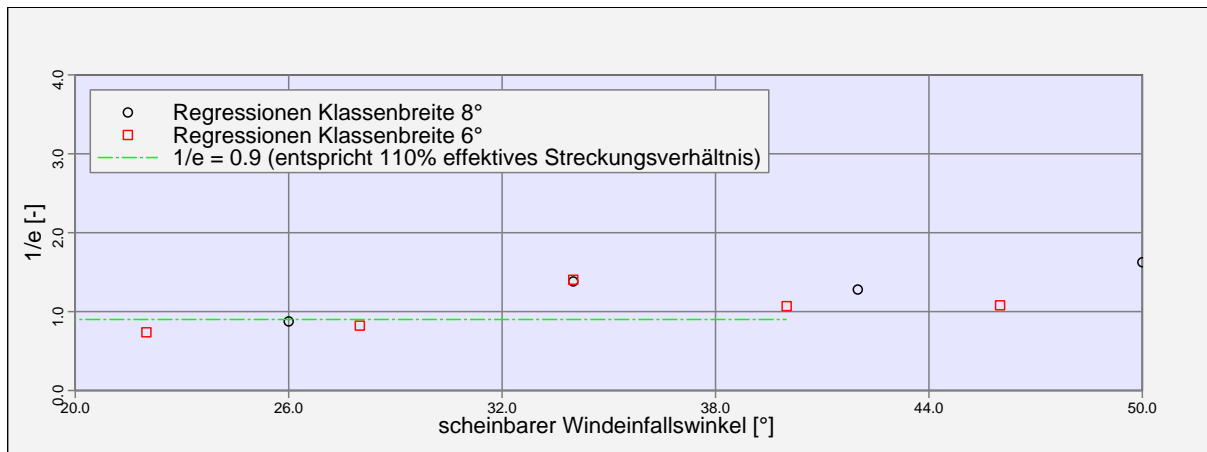


Bild 4: Effektivität des Riggs aus Klassen modelliert

berechnen. Die Segelfläche ( $AS$ ) im Nenner ist erforderlich, um eine direkte Addition der Beiwerte in (7) zu ermöglichen. Für die Widerstandsbeiwerte werden nach CLAUGHTON (1999) die Werte  $C_{WPY} = 1.13$  und  $C_{WPX} = 0.8$  angenommen, um vergleichbare Werte zu erhalten<sup>8</sup>.

Betrachtet man weiterhin nur Messungen mit voll gesetztem Segel, so kann man für den Widerstandsbeiwert auch schreiben

$$C_D - C_{DP} = a_0 + \underbrace{\frac{C_L^2}{e \pi AR}}_{C_{DI}} \quad (9)$$

Die Parameter  $a_0$  und  $1/e$  sind von der scheinbaren Windrichtung abhängig. Ordnet man die gemessenen Werte nach Klassen von Windeinfallswinkeln und bestimmt diese Parameter für jede dieser Klasse, erhält man die in Bild 4 dargestellten Werte für die Effektivität des Riggs und damit den induzierten Widerstand

$$C_{DI} = \frac{1}{e} \frac{C_L^2}{\pi AR_{Rigg}}, \quad (10)$$

wobei das Streckungsverhältnis mit der Höhe des Mastes ( $H_{Rigg}$ ) aus

$$AR_{Rigg} = \frac{H_{Rigg}^2}{AS} \quad (11)$$

berechnet wird.

Wie in Bild 4 zu sehen ist, kann der Wert für  $1/e$  für scheinbare Windeinfallswinkel bis etwa  $40^\circ$  mit etwa 0.9 abgeschätzt werden, was der Annahme einer effektiven Masthöhe von

<sup>8</sup>Die Wahl der Werte für  $C_{WP}$  hat keinen Einfluß auf das Ergebnis der späteren Geschwindigkeitsprognose, sofern dort auch der gleiche Wert verwendet wird. Diese Formulierung wird nur eingeführt, um ggf. spätere Vergleiche mit anderen Prognoseverfahren zu ermöglichen.

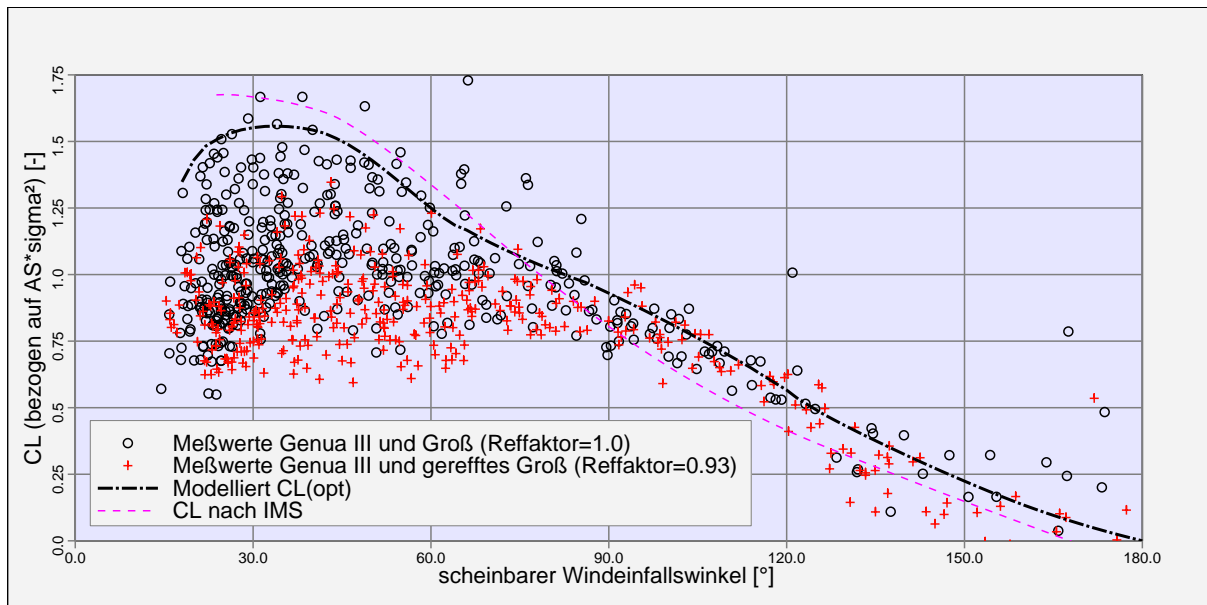


Bild 5: Aerodynamischer Auftriebsbeiwert für Groß und Genua III

110 % nach KERWIN (1978) oder HAZEN (1980) aufgrund einer virtuellen Vergrößerung des Streckungsverhältnisses durch ein bis zum Deck dicht geholtcs Vorsegel entspricht. Für höhere Winkel als  $40^\circ$  beginnen Ablösungen und andere viskose Effekte den Widerstandsbeiwert übermäßig stark zu beeinflussen. Für die Analyse der gemessenen Daten wird deshalb der Wert  $1/e$  konstant mit 0.9 angenommen und die durch Ablösung und andere viskose Effekte verursachten Anteile gesondert bestimmt.

Aus den Meßwerten wurden mit (1), (2) sowie (8) und (10) die bei den Meßfahrten erreichten Werte für  $C_L$  über dem scheinbaren Windeinfallswinkel aufgetragen und die in Bild 5 dargestellten Kurve für  $C_L^{(opt)}$  ermittelt.

### 3.4 Lage des aerodynamischen Kraftangriffspunktes

Aus den Meßwerten konnte die Lage eines theoretischen Kraftangriffspunktes in der Mittschiffsebene bestimmt werden. Bild 6 zeigt Meßwerte für die Höhe des Kraftangriffspunktes in schiffsfesten Koordinaten in Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung der aerodynamischen Kraft

$$\eta = \tan^{-1} \frac{F_Y}{F_X}. \quad (12)$$

Im Gegensatz zu der weit verbreiteten Annahme, daß die Höhe des Kraftangriffspunktes konstant angenommen werden kann, ist aus Bild 6 deutlich zu entnehmen, daß eine starke Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung der Kraft existiert. Für die Kombination aus Groß

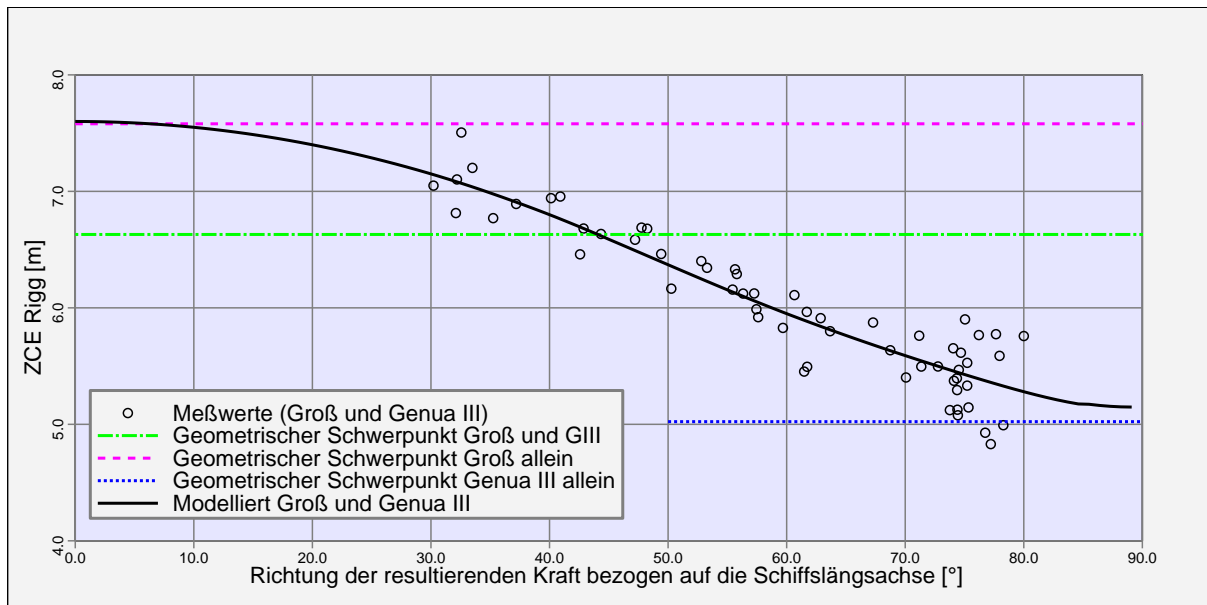


Bild 6: Höhenlage des aerodynamischen Kraftangriffspunktes in Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung der Kraft

und Genua ist dies vor allem dadurch zu erklären, daß bei Kursen *vor dem Wind* die Genua im Windschatten des Großsegels steht und nicht zur Vortriebserzeugung beiträgt<sup>9</sup>. Auf Kursen *am Wind* ist das Vorsegel stets dicht und durch Entlastung des Großsegels wird die Krängung reduziert.

Die Kurve in Bild 6 basiert in den Bereichen mit Meßwerten auf einer quadratischen Regression und sind von dort ausgehend sinnvoll extrapoliert, um für die später folgende Geschwindigkeitsprognose eine differenzierbare Funktion zu liefern.

Bild 7 zeigt die Meßwerte für die Lage des aerodynamischen Kraftangriffspunktes in der Schiffslängsrichtung. Für den Fall *am Wind* liegt der aerodynamische Druckpunkt vor dem geometrischen Schwerpunkt. Dies bestätigt, daß der Druckpunkt eher in der Viertellinie als im Flächenschwerpunkt angenommen werden kann. Wie in Bild 8 dargestellt, wandert bei raumeren Kursen der virtuelle Druckpunkt nach achtern, da die Segel aufgefiert werden und damit die Krafteinleitung auf der Leeseite erfolgt. Durch Projektion des Kraftvektors auf die Mittschiffsebene verschiebt sich der Druckpunkt weiter nach achtern.

<sup>9</sup>Bei diesen Untersuchungen wurde die Genua auch *vor dem Wind* auf der Leeseite gefahren und nicht ausgebaumt

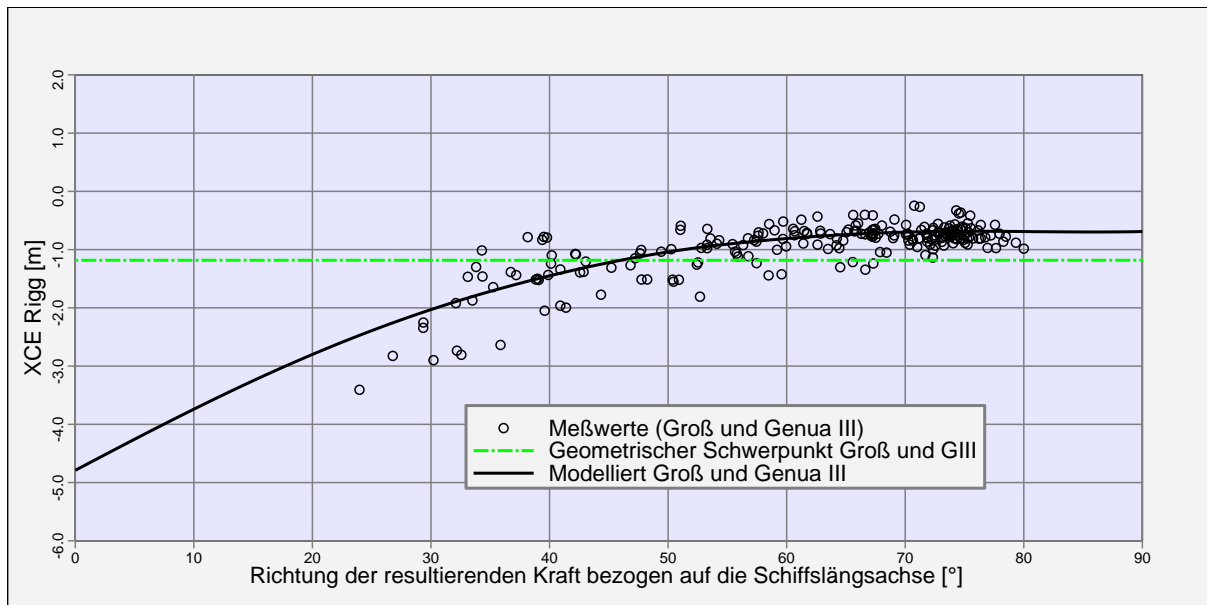


Bild 7: Lage des aerodynamischen Kraftangriffspunktes in der Schiffslängsachse

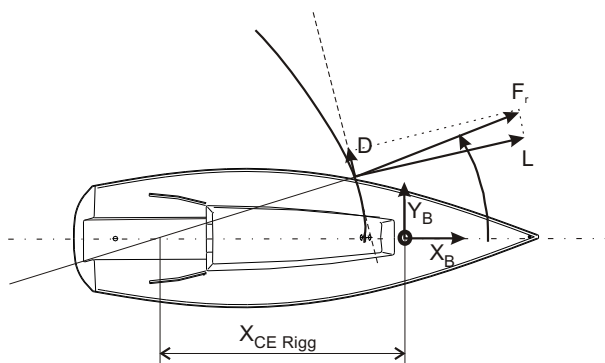


Bild 8: X-Position des aerodynamischen Kraftangriffspunktes und Definition der Kraftrichtung  $\eta$  nach (12)

Der Angriffspunkt wird im schiffsfesten Koordinatensystem (B) angegeben. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Zentrum der Linearbeschleunigung des Lagereferenzsystems (vor dem Mastfuß). Für raue Kurse ist die X-Koordinate negativ.

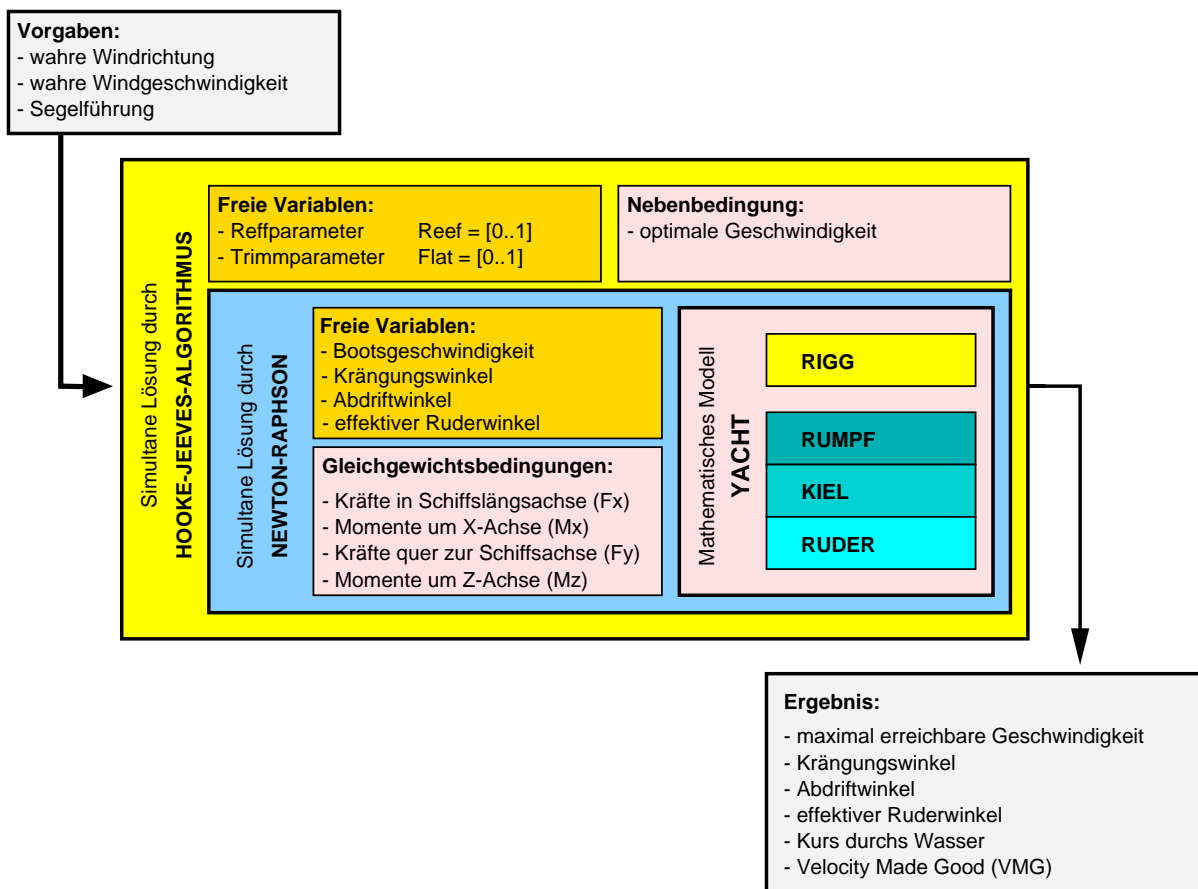
## 4 Ergebnisse

Mit Hilfe des aus den Messungen ermittelten aerodynamischen Modells und einem hydrodynamischen Modell, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll (vgl. HOCHKIRCH, 2000), wurde eine Geschwindigkeitsprognose implementiert, die in Bild 9 schematisch dargestellt ist.

In Bild 17 sind die ermittelten Geschwindigkeiten den Meßwerten gegenübergestellt. Sowohl bei den Meßwerten als auch bei der Prognose wurde kein Spinnaker gesetzt. Weiterhin ist zu beachten, daß hier auch der Abdriftwinkel mit berücksichtigt wurde und die Schiffsgeschwindigkeit über dem wahren Kurs des Schiffes zum Wind dargestellt ist.

Die Streuung der Meßwerte ist, durch unterschiedlichen Trimm des Riggs und unterschiedliche Leistung der Rudergänger, relativ groß. Bei der Berechnung der Segelleistung wird dage-

gen immer von optimalem Segeltrimm und optimaler Ruderführung ausgegangen, so daß die ermittelten Werte Grenzkurven für die erreichbare Geschwindigkeit darstellen. Ein weiterer Gesichtspunkt, der nicht vernachlässigt werden darf, ist der Einfluß der Gewichtsverlagerung durch die Mannschaft. Bild 10 zeigt das vom Rigg erzeugte Krängungsmoment für Meßwerte und aus der VPP-Simulation. Dabei wurde eine Rechnung mit und eine weitere ohne Verlagerung des Mannschaftsgewichtes durchgeführt. Man erkennt, daß die Meßwerte im Bereich zwischen diesen beiden Kurven liegen. Dies ist damit zu erklären, daß nicht bei allen Messun-



Für vorgegebene wahre Windeinfallswinkel und wahre Windgeschwindigkeiten wird zunächst eine Lösung für die Bootsgeschwindigkeit, Krängung, Abdrift und Ruderwinkel gesucht. Dabei müssen die Gleichgewichtsbedingungen für die Kräfte in Schiffsängs- und -querachse sowie die krängenden und aufrichtenden Momente und die Momente um die vertikale Achse im Gleichgewicht sein. Eine simultane Lösung für das aus diesen Bedingungen folgende nichtlineare Gleichungssystem für die vier freien Variablen wird mit Hilfe eines *Newton-Raphson* Verfahrens bestimmt.

In einer äußeren Schleife erfolgt eine Optimierung des Segeltrimms und der zu setzenden Segelfläche mit der Nebenbedingung maximaler Geschwindigkeit. Auch hier handelt es sich um ein nichtlineares Gleichungssystem; aufgrund der Ungleichheitsnebenbedingungen für die freien Variablen und der damit verbundenen unstetigen Zielfunktion muß ein Lösungsverfahren 0. Ordnung verwendet werden.

Bild 9: Schematische Darstellung des von HOCHKIRCH (2000) verwendeten Leistungsprognoseprogramms (VPP)

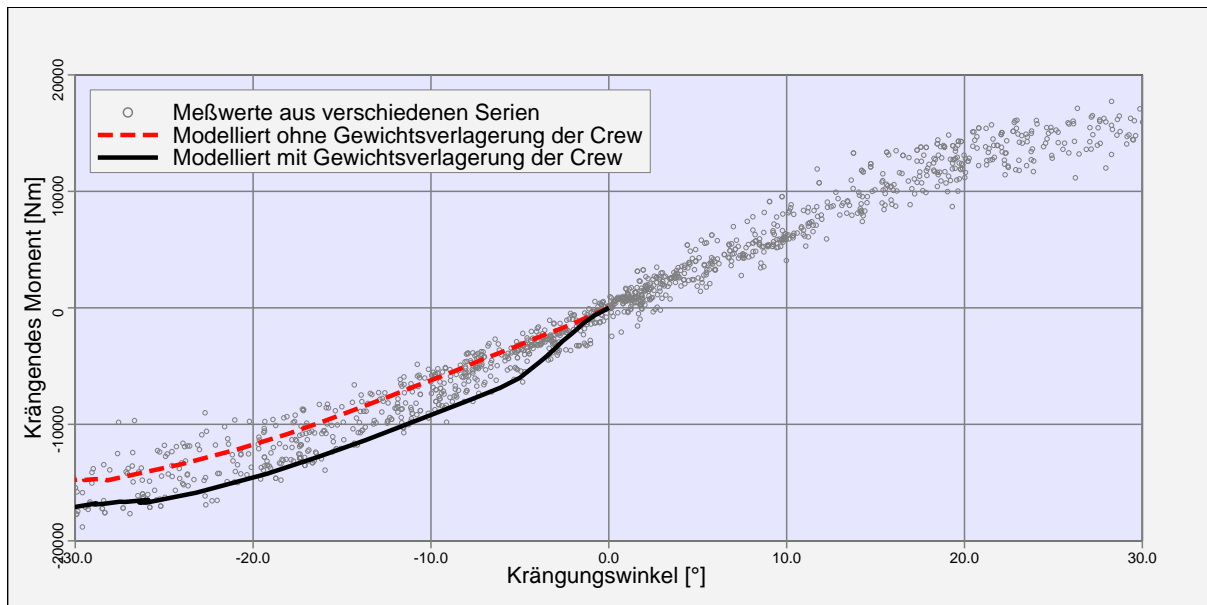


Bild 10: Einfluß der Verlagerung des Crewgewichtes auf das Moment um die Schiffslängsachse

gen eine maximale Verlagerung der Mannschaft erfolgen konnte, da sich auch Crewmitglieder zum Trimmen der Segel auf der Leeseite oder zur Bedienung der Meßeinrichtungen *unter Deck* aufhielten.

In Bild 11 ist die Auswirkung durch die Verlagerung des Crewgewichtes auf die Schiffsgeschwindigkeit für einen Kurs von  $60^\circ$  zum wahren Wind bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten dargestellt. Der Geschwindigkeitszuwachs beträgt bei höheren Windgeschwindigkeiten über 3 % und ist damit von erheblicher Bedeutung.

#### 4.1 Vergleich der Ergebnisse mit AHVPP/1

Mit dem Leistungsprognoseprogramm AHVPP/1<sup>10</sup>(AeroHydro, Inc., 1992) wurden für *Dyna* die in Bild 18 dargestellten Geschwindigkeiten<sup>11</sup> ermittelt.

Da von AHVPP/1 der Abdriftwinkel nicht berücksichtigt wird, sind in Bild 18 die Geschwindigkeiten über dem wahren Windeinfallswinkel aufgetragen. Ein direkter Vergleich mit Bild 17 ist deshalb nicht möglich. Die Geschwindigkeitsprognose durch AHVPP/1 ist insbesondere auf den Kursen *Am-Wind* vollkommen unzureichend. Die Leistung des Schiffes wird teilweise um fast 40 % unterschätzt. Auf *raumeren* Kursen sind die Abweichungen geringer, aber auch dort

<sup>10</sup>Die Berechnungen mit AHVPP/1 wurden dem Autor freundlicherweise von Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Siegel, AeroHydro Repräsentant in Deutschland, zur Verfügung gestellt.

<sup>11</sup>Beim Vergleich mit Bild 17 ist zu beachten, daß die Windgeschwindigkeiten in Knoten angegeben sind.

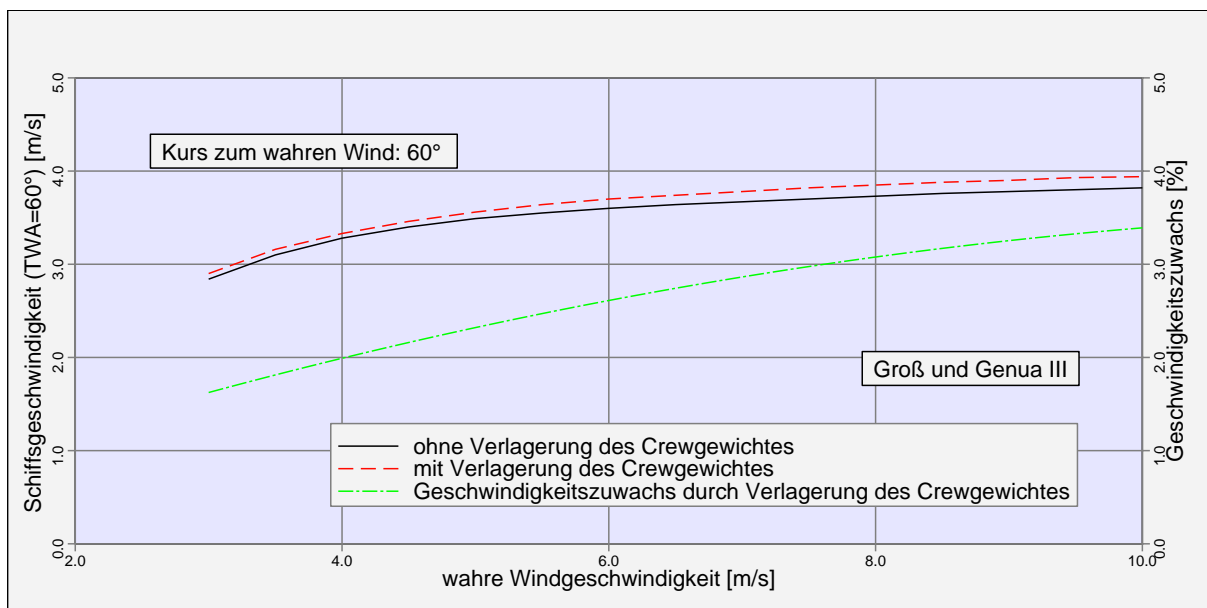


Bild 11: Einfluß der Verlagerung des Crewgewichtes auf die mögliche Geschwindigkeit bei einem Kurs von  $60^\circ$  zum Wind

treten für geringe Windgeschwindigkeiten große Fehler auf: Die Leistung des Schiffes wird hier überbewertet.

## 4.2 Vergleich der Ergebnisse mit dem IMS VP-Programm

Im Rahmen des IMS-Vermessungssystems wird für eine Yacht eine Geschwindigkeitsprognose mit einem ähnlichen Verfahren durchgeführt (vgl. POOR, 1986). Einschränkend muß an dieser Stelle erwähnt werden, daß die Leistungsprognose nach IMS hauptsächlich zu Vermessungszwecken dient und deswegen vor allem die relative Einordnung verschiedener Bootstypen zueinander im Vordergrund der Entwicklung dieser Rechenprogramme steht und weniger die absolute Leistung eines einzelnen Schiffes. Das IMS-Verfahren hat sich in den letzten Jahren für diesen Zweck durchaus bewährt. In Bild 19 sind die Geschwindigkeitsprognosen nach dem IMS Vermessungsprogramm<sup>12</sup> den Meßwerten und der Geschwindigkeitsprognose des Verfassers gegenübergestellt.

Die von dem IMS-Programm berechneten Werte stimmen wesentlich besser mit den Meßwerten überein als die von AHVPP/1. Leider lagen keine Berechnungen für höhere Kurse zum Wind als etwa  $40^\circ$  vor, so daß die Kurven dort enden. Allerdings wird auch hier für geringe Windstärken die Segelleistung stark überschätzt (vgl. Kurven für  $V_{WT} = 6, 8$  und  $12$  kn).

Da ebenso wie bei AHVPP/1 die Abdriftwinkel im Rahmen der IMS-Geschwindigkeitspro-

<sup>12</sup>Diese Berechnungen wurden dem Autor freundlicherweise von F. Judel zur Verfügung gestellt.

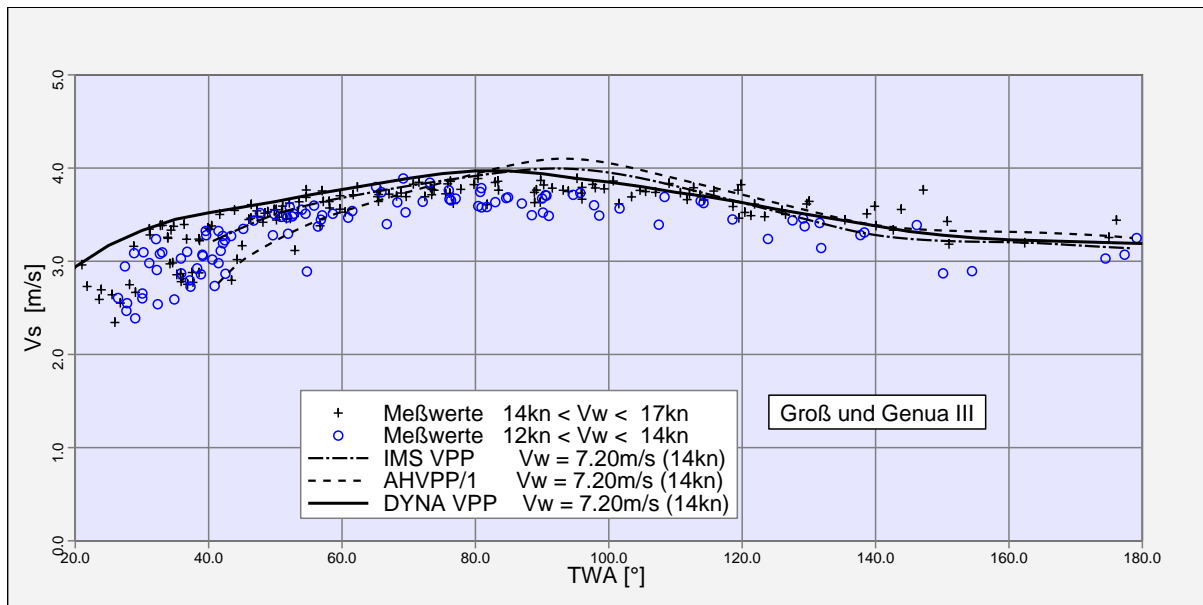


Bild 12: Vergleich der gemessenen Segelleistung mit den Geschwindigkeitsprognosen nach IMS und AHVPP/1 und dem vom Verfasser implementierten Verfahren (ohne Abdrift)

gnose nicht berücksichtigt werden, sind auch diese Daten über dem wahren Windeinfallswinkel aufgetragen und können so nicht direkt mit Bild 17 verglichen werden.

In Bild 12 sind die gemessenen Geschwindigkeiten den berechneten Werten vom IMS-VPP, AHVPP/1 und dem vom Verfasser entwickelten VPP für eine wahre Windgeschwindigkeit von 7,20 m/s (14 kn) gegenübergestellt. Die durch Kreise gekennzeichneten Punkte entsprechen dabei Messungen, bei denen *maximal* eine Windgeschwindigkeit von 7,20 m/s herrschte und bei den mit Kreuzen gekennzeichneten Messungen wurden Windgeschwindigkeiten über 7,20 m/s gemessen. Insbesondere im *Am-Wind*-Bereich sind große Unterschiede deutlich. Auch das IMS-Programm unterschätzt die erreichbare Geschwindigkeit auf diesen Kursen. Für sehr hohe *Am-Wind*-Kurse ist eine Betrachtung des wahren Windeinfallswinkels nicht mehr geeignet. Daher sind in Bild 13 die gleichen Meßwerte der Geschwindigkeitsprognose des Verfassers unter Berücksichtigung der Abdrift gegenübergestellt<sup>13</sup>. Von wenigen Ausnahmen – vor allem auf *raumen Kursen* – abgesehen, bildet die berechnete Kurve für  $V_{WT} = 14$  kn die obere Grenze der für diese Geschwindigkeit erreichten Meßwerte und repräsentiert damit die mit dieser Yacht maximal erreichbare Geschwindigkeit.

In Bild 14 sind die Meßwerte für die mit oder gegen den Wind gut gemachten Geschwindigkeiten

$$VMG = V_s \cos(\beta_T + \lambda) \quad (13)$$

<sup>13</sup>Auch hier ist es nicht möglich, die alternativen Verfahren darzustellen, da bei diesen Verfahren die Abdrift nicht ermittelt wird.

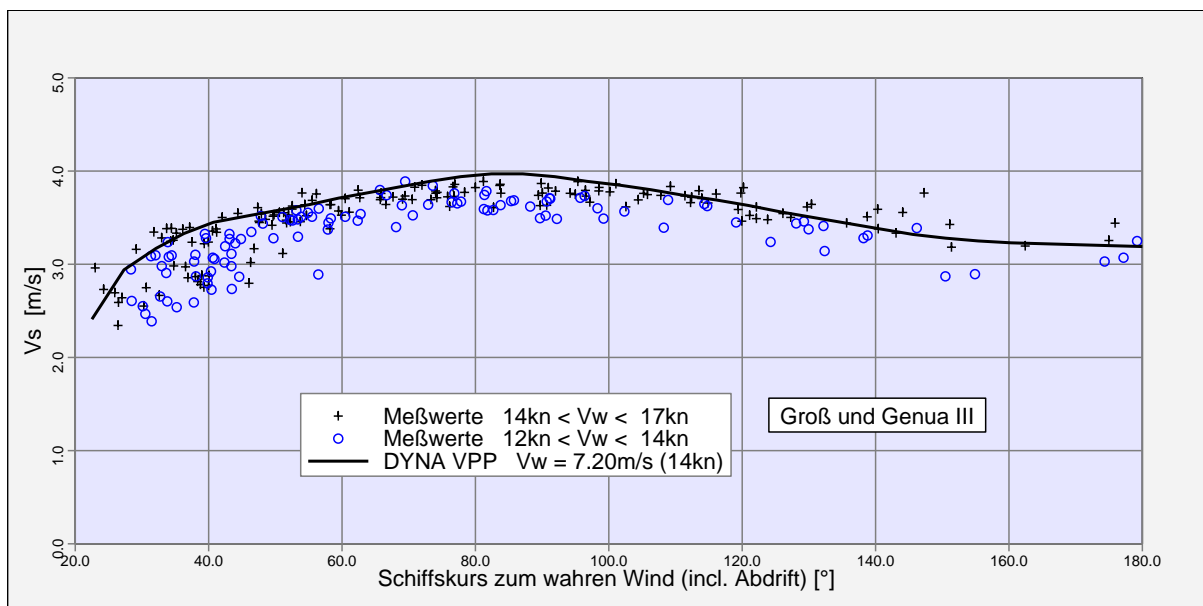


Bild 13: Vergleich der gemessenen Segelleistung mit den Geschwindigkeitsprognosen des Verfassers unter Berücksichtigung der Abdrift

über der wahren Windgeschwindigkeit aufgetragen; im Vergleich dazu die entsprechenden Prognosen des IMS Programms, von AHVPP/1 und des hier vorgestellten Verfahrens. Während alle Verfahren für die Lee – Geschwindigkeit übereinstimmende und von den Messungen bestätigte maximale Geschwindigkeiten vorhersagen, gibt es bei der Luv-Geschwindigkeit gravierende Unterschiede. Sowohl AHVPP/1 wie auch das IMS Programm unterschätzen die erreichbare Luv-Geschwindigkeit für alle Windgeschwindigkeiten. Weiterhin muß ergänzt werden, daß diese beiden Verfahren zudem die unvermeidliche und die Luv-Geschwindigkeit stark beeinflussende Abdrift nicht berechnen, so daß für diese Verfahren nur ein angenäherter Wert

$$VMG^* = V_S \cos \beta_T \quad (14)$$

dargestellt werden konnte, der immer höher als die tatsächliche  $VMG$  ist. D. h. die Differenz zwischen den gemessenen Daten und der Prognose ist noch größer.

### 4.3 Beurteilung

Wie in Bild 18 und Bild 19 deutlich erkennbar, liefern beide hier zum Vergleich herangezogenen Rechenverfahren ungenaue Leistungsprognosen. Während das IMS-Programm in weiten Bereichen noch akzeptable Ergebnisse produziert, weichen die prognostizierten Geschwindigkeiten nach AHVPP/1 zum größten Teil stark von den Meßdaten ab. Die Differenzen von

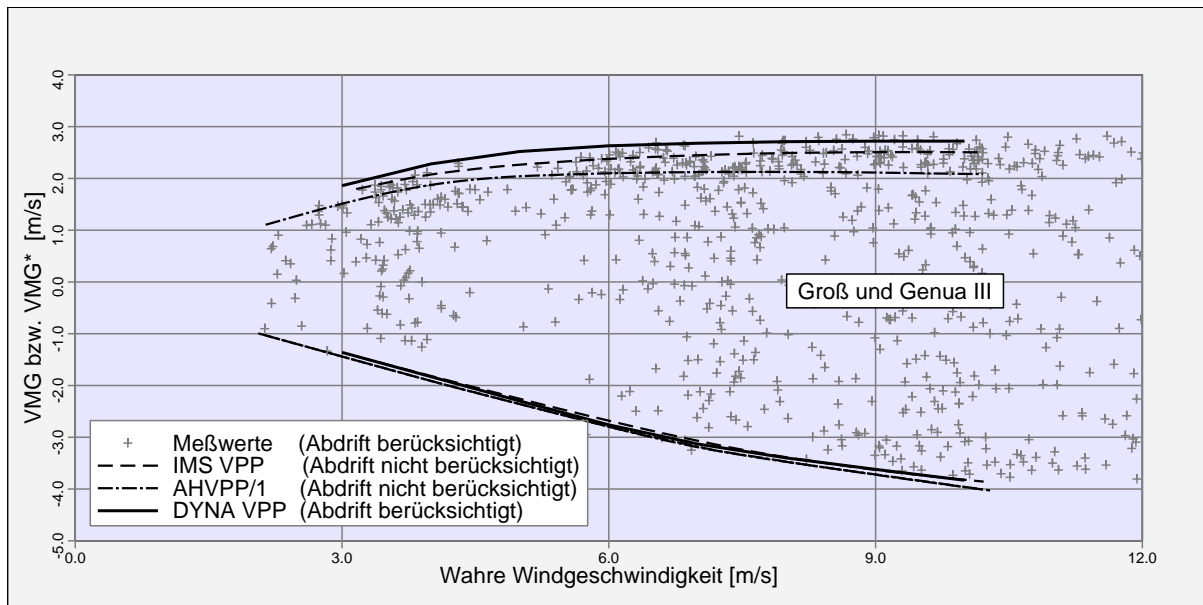


Bild 14: Vergleich der maximalen Luv- und Lee-Geschwindigkeiten

AHVPP/1 sind im wesentlichen durch das Alter des Programms (1992) und der somit bedingte Einsatz der alten Delfter Serie zu erklären<sup>14</sup>.

Weitere Gründe für das Versagen der anderen Verfahren sind insbesondere auf der aerodynamischen Seite zu suchen. Wie durch die Messungen der Großausführung nachgewiesen werden konnte (vgl. HOCHKIRCH, 2000) wird der größte Teil des Rumpfwiderstands – der Restwiderstand – sowohl vom IMS-Programm<sup>15</sup> und mit Einschränkungen auch von AHVPP/1 näherungsweise richtig prognostiziert. Die anderen hydrodynamischen Widerstandsanteile sind insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten von geringerer Bedeutung und nicht in der Lage, derartige Leistungsdifferenzen zu produzieren.

Bild 15 zeigt die optimalen Auftriebsbeiwerte der Segel dieser beiden alternativen Verfahren zusammen mit der aus den Großausführungsversuchen ermittelten Kurven. Die Ergebnisse beider Verfahren unterscheiden sich deutlich: Während auf Kursen *Am-Wind* geringere Auftriebsbeiwerte gemessen wurden als in beiden Programmen angenommen werden, konnten auf *raumeren* Kursen höhere Auftriebsbeiwerte ermittelt werden. Da die Auftriebsbeiwerte stark von der Segelführung abhängig sind, ist die jeweilige Mannschaft mit verantwortlich. Ein alleiniger Einfluß der Segler bei den Großausführungsmessungen kann allerdings ausgeschlossen

<sup>14</sup>Die alte Delfter Serie basiert auf IOR-ähnlichen Rümpfen, die teilweise erheblich von den heutigen IMS-geprägten Rumpfformen abweichen.

<sup>15</sup>Die Widerstandsprognose basiert auf der neuen DSYHS.

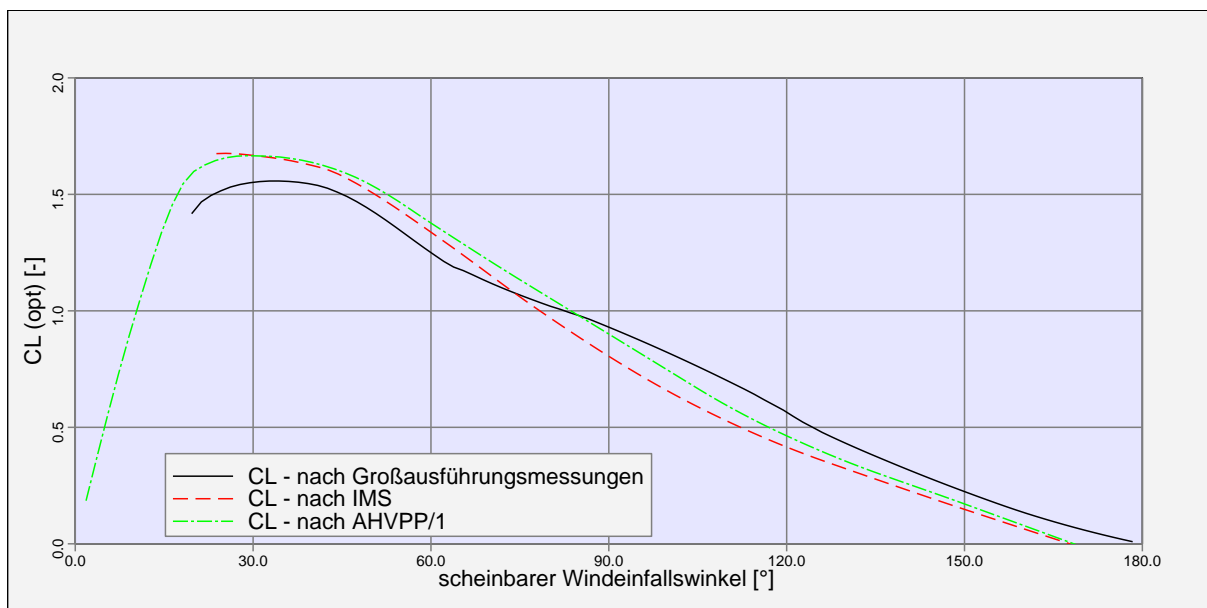


Bild 15: Vergleich der optimalen Auftriebsbeiwerte nach AHVPP/1, dem IMS-Programm und aus den Großausführungsversuchen

werden, da bei den einzelnen Meßserien jeweils verschiedene Steuerleute<sup>16</sup> die Segel getrimmt haben und keine wesentlich abweichenden Werte erreicht wurden.

Nun prognostizieren beide alternativen Verfahren trotz höherer Auftriebsbeiwerte wesentlich geringere  $V_{Luv}$  Geschwindigkeiten. Als ein wesentlicher Grund dafür ist insbesondere die Lage des aerodynamischen Kraftangriffspunktes (Bild 6) zu sehen. Während die beiden alternativen Verfahren diesen Punkt etwa auf Höhe des Schwerpunktes des gesamten Segelplans annehmen konnte aus den Messungen gezeigt werden, daß eine signifikante Abhängigkeit von dem Kurs zum Wind vorliegt. Es wird deutlich, daß vor allem auf Kursen *am Wind* damit das krängende Moment zu hoch angenommen wird und damit nur eine geringere Geschwindigkeit berechnet wird.

Allerdings ist in Bild 6 für Kurse *am Wind* immer noch eine recht hohe Streuung zu sehen. Diese Streuung ist durch verschiedene Trimmeinstellungen der verschiedenen Segler zu erklären, der nicht durch die Faktoren *REEF* oder *FLAT* allein beschrieben werden kann.

## 5 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Großausführungsmessungen konnten erweiterte Modelle für die aerodynamischen und hydrodynamischen Kräfte einer Segelyacht abgeleitet werden. Mit diesen Modellen

<sup>16</sup>unter anderen auch sehr erfolgreiche Regattasegler

ist bereits eine bessere Geschwindigkeitsprognose möglich. Es zeigt sich, daß die maximalen Auftriebsbeiwerte des Riggs aus dem Windkanalversuchen nicht in den Großausführungsmessungen erreicht wurden. Außerdem konnte gezeigt werden, daß die Lage des virtuellen Kraftangriffs der aerodynamischen Kräfte für verschiedene Kurse und unterschiedlichen Trimm stark variiert. Eine Vernachlässigung dieses Effektes führt unweigerlich zu fehlerhaften Geschwindigkeitsprognosen. Während bereits ein globales Modell für die Höhe des Kraftangriffspunktes aus den Messungen abgeleitet werden konnte, sind weitere Versuche erforderlich, um den Einfluß eines unterschiedlichen Segeltrimms sowohl auf die Auftriebsbeiwerte, wie auch auf die Schwerpunkthöhen zu analysieren. Das »Segeldynamometer« steht für derartige Untersuchungen als einmaliges Gerät zur Verfügung.

Das mit Hilfe der Meßdaten abgeleitete Geschwindigkeitsprognoseprogramm verwendet dieses globale Modell und erfaßt wesentlich besser das Leistungspotential der Yacht.

## **6 Danksagung**

Die Autoren möchten sich bei allen Industriepartnern und dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) bedanken, da ohne deren finanzielle oder personelle Hilfe dieses Projekt nicht möglich geworden wäre. Neben vielen anderen Beteiligten sollen hier insbesondere *AeroSail*, München, *judel/vrolijk engineering GmbH & co.*, Bremerhaven, *Peter Frisch GmbH*, München, *navcon GbR*, Wolgast, *North Diamond Sailmakers*, Kopenhagen, *Pantaenius*, Hamburg, *Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH (SVA)* und *VDO Kienzle AG*, Frankfurt am Main, genannt werden.

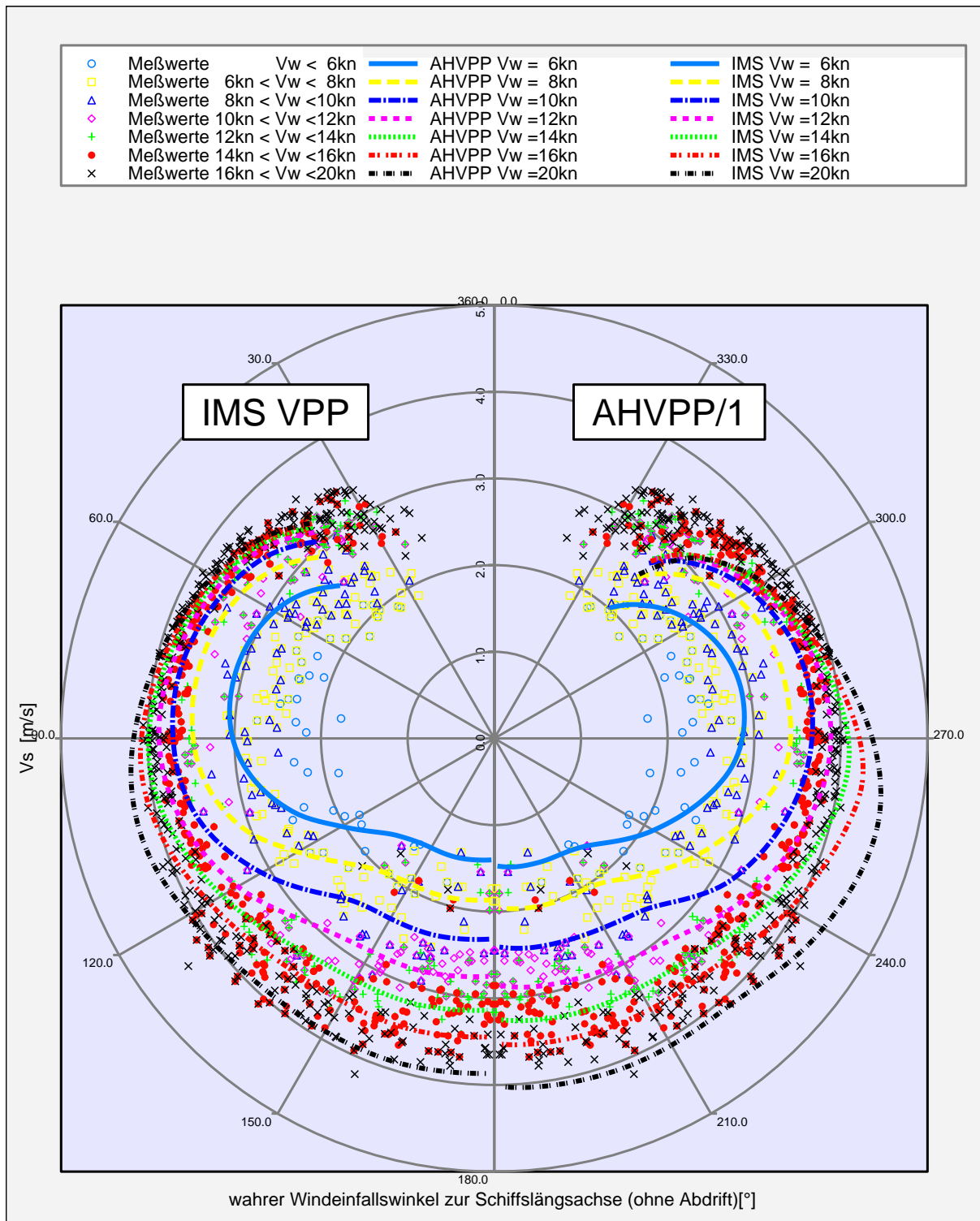


Bild 16: Vergleich der Geschwindigkeitsprognosen nach AHVPP /1 und IMS ohne Spinnacker mit Meßwerten (Abdrift nicht berücksichtigt)

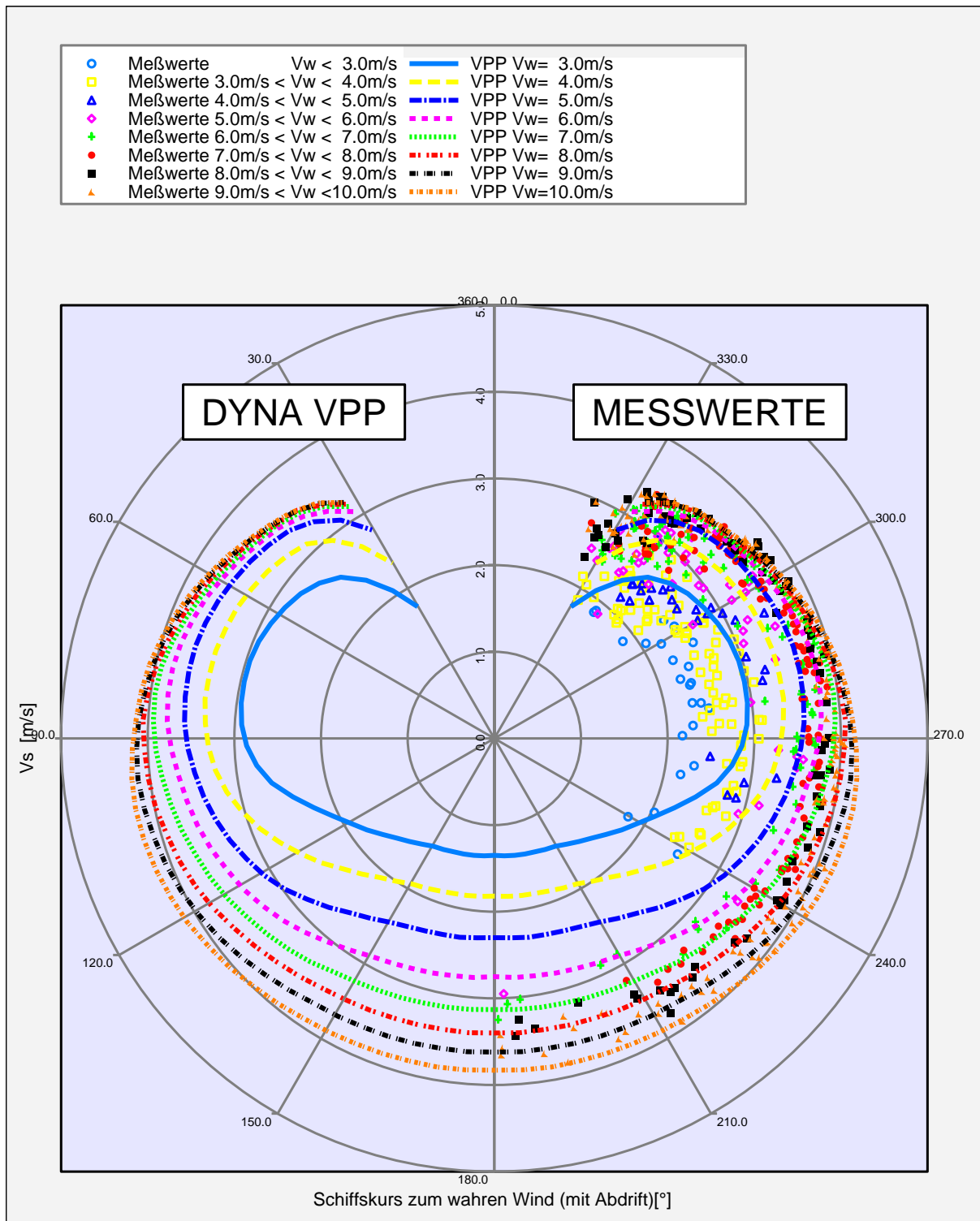


Bild 17: Vergleich der prognostizierten Geschwindigkeiten mit den Meßwerten (ohne Spinnaker, Abdrift berücksichtigt)

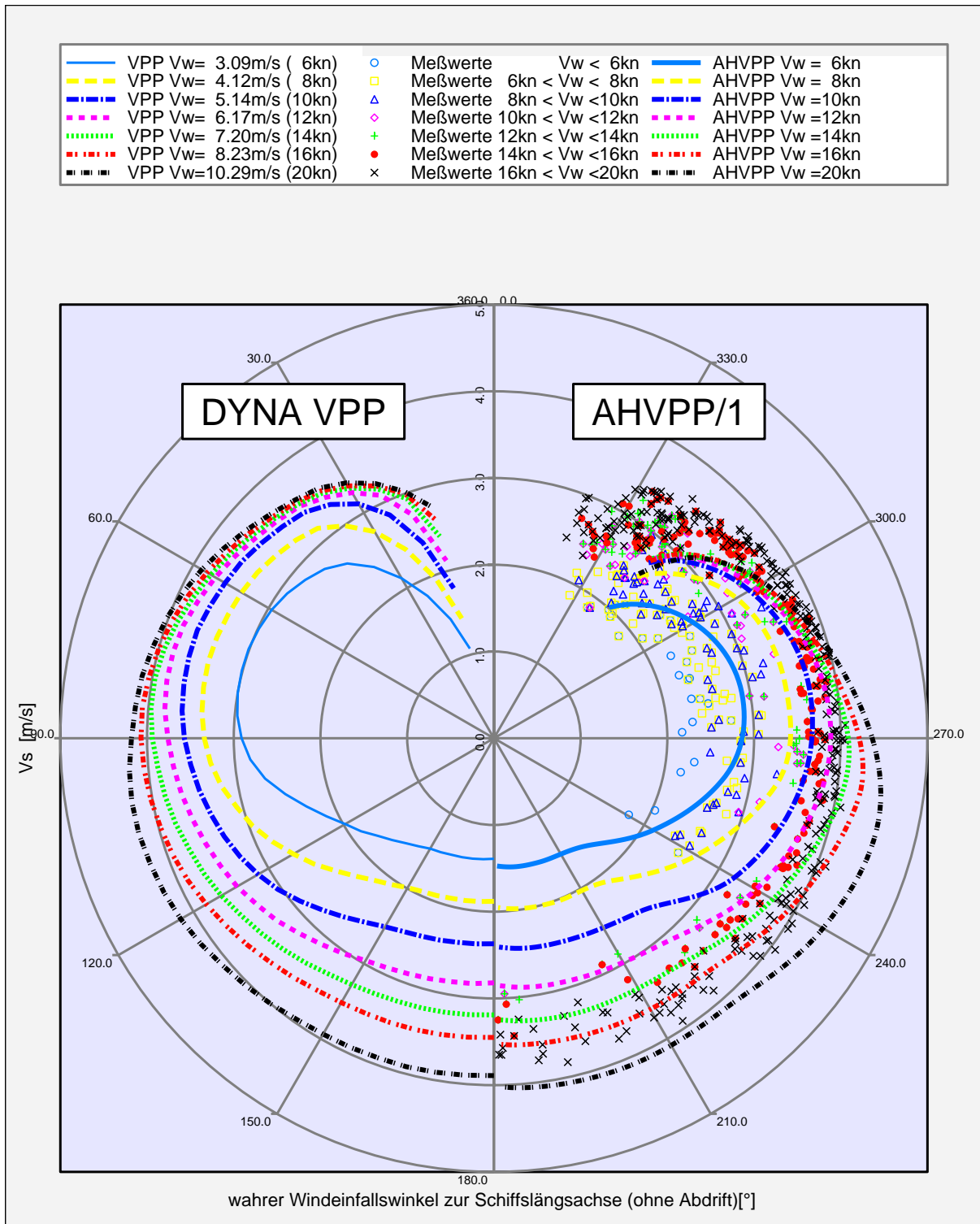


Bild 18: Vergleich der mit AHVPP/1 prognostizierten Geschwindigkeiten (Kurven rechts), den Meßwerten und der Geschwindigkeitsprognose des Verfassers (links) (ohne Spinnaker, Abdrift nicht berücksichtigt)

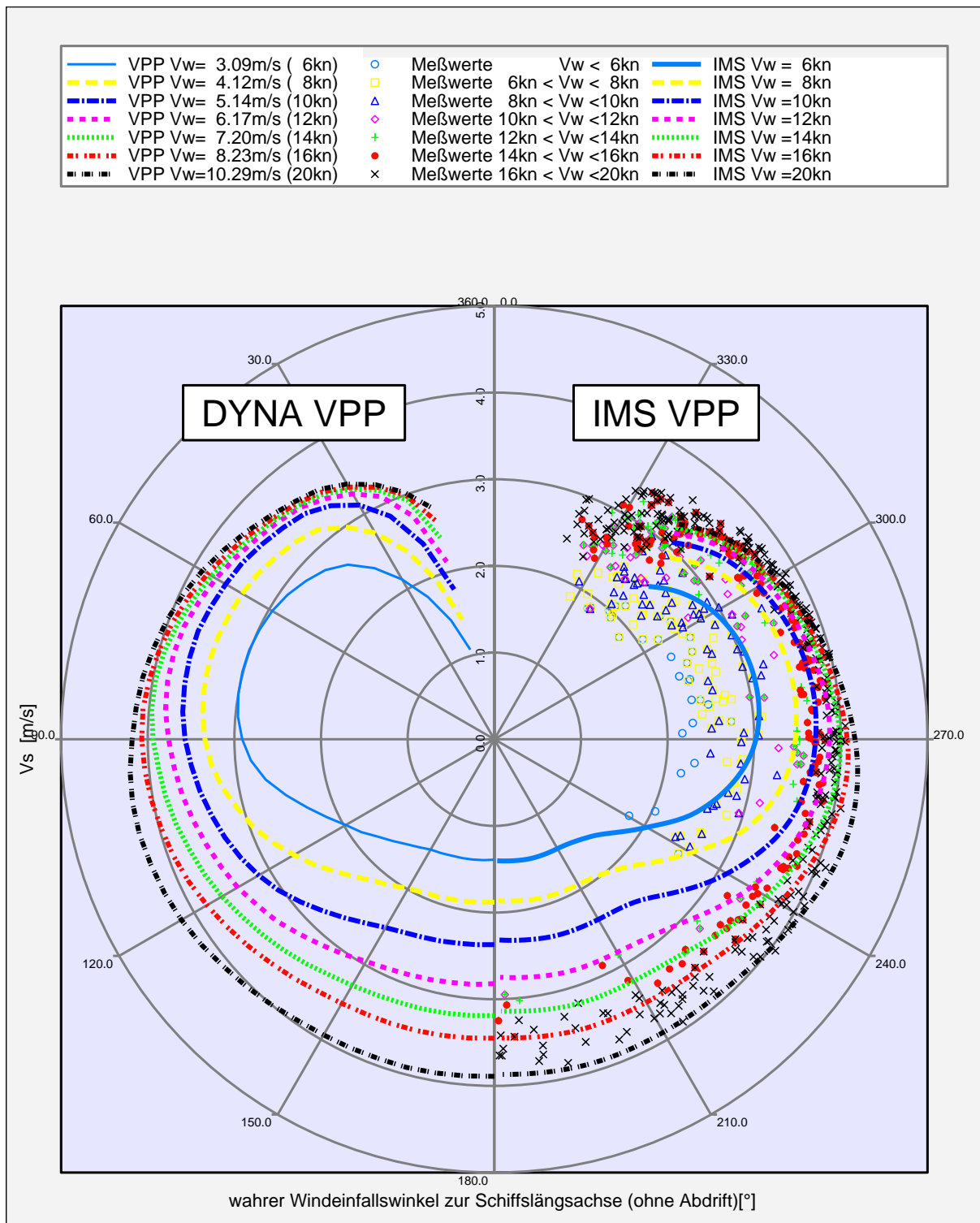


Bild 19: Vergleich der mit dem IMS-Vermessungsprogramm prognostizierten Geschwindigkeiten (Kurven rechts), den Meßwerten und der Geschwindigkeitsprognose des Verfassers (links) (ohne Spinnaker, Abdrift nicht berücksichtigt)

## 7 Literatur

- AeroHydro, Inc. (1992): *AHVPP/1 velocity prediction program*, AeroHydro, Inc., P.O. Box 684/Main Street, Southwest Harbour, ME 04679 USA
- Brandt, H. und Hochkirch, K.** (1998): *Erfassung der hydrodynamischen Kräfte, 19. Symposium Yachtentwurf und Yachtbau*, Hamburg
- Brandt, H. und Hochkirch, K.** (2000): *Entwicklung eines Segeldynamometers zur Erfassung der aero- und hydrodynamischen Kräfte*, ISM-Bericht 00/3, Abschlußbericht zum BMBF-Projekt 18S0164, Technische Universität Berlin, Institut für Schiffs- und Meerestechnik
- Brandt, H., Hochkirch, K., Abdel-Maksoud, M. und Fröhlich, M.** (1997): *Leistungsanalysen für das Segeldynamometer*, *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, 91, Hamburg
- Caponnetto, M., Castelli, A., Dupont, P., Bonjour, B., Mathey, P.-L., Sanchi, S. und Sawey, M. L.** (1999): *Sailing yacht design using advanced numerical flow techniques*, *The Fourteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Claughton, A.** (1999): *Developments in the IMS VPP formulations*, *The Fourteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Davidson, K. S. M.** (1936): *Some experimental studies of the sailing yacht*, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 44
- Fröhlich, M.** (1997): *Optimierung von Kielen einschließlich Rumpf für Segelyachten auf der Basis eines numerischen Rechenverfahrens für viskose und instationäre Strömung*, Projekt 1022, Schiffbau Versuchsanstalt Potsdam GmbH
- Gerritsma, J., Omnink, R. und Verslius, A.** (1981): *Geometry, resistance and stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series*, International Shipbuilding Progress
- Hazen, G. S.** (1980): *A model of sail aerodynamics for diverse rig types*, *Proceedings of New England Sailing Yacht Symposium*
- Hochkirch, K.** (2000): *Entwicklung einer Meßyacht zur Analyse der Segelleistung im Originalmaßstab*, Mensch & Buch Verlag, Berlin, ISBN 3-89820-119-8, Dissertation, TU-Berlin
- Kerwin, J. E.** (1978): *A velocity prediction program for ocean racing yachts revised to February, 1978*, Technical Report 78-11, Massachusetts Institute of Technology
- Keuning, J. A. und Sonnenberg, U. B.** (1999): *Approximation of the calm water resistance on a sailing yacht based on the "Delft Systematic Hull Series"*, *The Fourteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Kuhn, J. C. und Schlageter, E. C.** (1993): *The effect of flare and overhangs on the motions of a yacht in head seas*, *The 11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Masuyama, Y. und Fukasawa, T.** (1997): *Full scale measurement of sail force and the validation of numerical calculation method*, *The Thirteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Milgram, J. H.** (1971): *Sail force coefficients for systematic rig variations*, Technical & Research Report R-10, Society of Naval Architects and Marine Engineers
- Milgram, J. H.** (1993): *The MIT Sailing Dynamometer*, Technical report, Massachusetts Institute of Technology
- Poor, C. L.** (1986): *A description of the new international rating system*, Publications of the United States Yacht Racing Union (USYRU)

van Oossanen, P. (1995): *Improvement of sailing yacht performance prediction by including force-moment equilibrium for the calculation of helm angle in a velocity prediction program, The Twelfth Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis*

## 8 Symbole

$\beta_A$	scheinbare Windrichtung
$\Delta$	Displacement
$\delta$	Ruderwinkel
$\eta$	Wirkungsrichtung der resultierenden aerodynamischen Kraft
$\nabla$	Verdrängung
$\lambda$	Abdriftwinkel
$\rho_L$	Dichte der Luft
$\sigma$	Reffaktor
$\tau$	Trimmfaktor
$\varphi$	Krägungswinkel
$A_S$	Referenz Segelfläche
$B_{WL}$	Breite in der Wasserlinie
$B$	Breite
$C_D$	Widerstandsbeiwert nach (2)
$C_L$	Auftriebsbeiwert nach (1)
$C_{DI}$	induzierter Widerstand
$D$	Drag – Widerstand
$e$	Kehrwert des Oswald Gütefaktors
$F_X$	Kraft in Schiffslängsrichtung
$F_Y$	Kraft in Schiffslängsrichtung
$I$	Basis des Vorsegeldreiecks
$J$	Höhe des Vorsegeldreiecks
$L_{OA}$	Länge über alles
$L_{WL}$	Länge der Wasserlinie
$L$	Lift – Auftrieb
$M_X$	Moment um die Schiffsachse
$M_Z$	Giermoment
$T_C$	Rumpftiefgang
$T$	Tiefgang
$V_S$	Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
$V_{WA}$	scheinbare Windgeschwindigkeit
$VMG^*$	Mit oder gegen den Wind gut gemachte Geschwindigkeit (ohne Berücksichtigung der Abdrift)
$VMG$	Mit oder gegen den Wind gut gemachte Geschwindigkeit (mit Berücksichtigung der Abdrift)