207 | April 1968

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

B. Wagner und P. Boese

Windkanaluntersuchungen einer Segelyacht mit verschiedenen Segelführungen

TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 207

Windkanaluntersuchungen einer Segelyacht mit verschiedenen Segelführungen

von

B. Wagner und P. Boese

Hamburg, April 1968

Windkanaluntersuchungen einer Segelyacht mit verschiedenen Segelführungen.

Inhaltsübersicht

1. Einführung

2. Modellbeschreibung

3. Versuchseinrichtung

4. Versuchsdurchführung und Versuchsprogramm

5. Definition und Darstellung der Kraft- und Momentkomponenten

6. Darstellung der Meßwerte

7. Versuchsergebnisse

7.1. Vollständiges Yachtmodell
- 1.1. Großsegel und Fock
- 1.2. Großsegel und Genua
- 1.3. Großsegel und Spinnaker
- 1.4. Druckpunktvorlagen
- 1.5. Vergleich der Besegelungen

7.2. Rumpf ohne Besegelung

7.3. Untersuchung der Besegelung ohne Rumpf
- 3.1. Großsegel und Fock
- 3.2. Großsegel und Genua
- 3.3. Großsegel
- 3.4. Vorsegel
- 3.5. Druckpunktvorlagen für die Segel einzeln und im Verband

7.4. Auswirkungen von Änderungen der herkömmlichen Takelage

8. Zusammenfassung und Folgerungen

Schrifttum

Schrifttum

[1] Croseck, H.: Beiträge zur Theorie des Segelns. Berlin 1925, Verlag von Julius Springer.

[2] Rösingh, W.H.C.E.: Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit von Segelschiffen. Werft-Reederei-Hafen.23.Jahrgang (1942), S. 269.

[3] Curry, M.: Regatta-Segeln. Schweizer Druck- und Verlagshaus, Zürich 1949.

[4] Everett, H.A.: Aerodynamic Experiments upon a Yachts Main Sail. SNAME 1915, S.1.

[5] Warner, E.P.: The Aerodynamics of Yacht Sails. SNAME 1925, S. 207.

[6] Davidson, K.S.M.: Some Experimental Studies of the Sailing Yacht. SNAME 1936, S. 288.

[7] Marchaj, C.A. und A.Q. Chapleo: A Preliminary Note on the Results of Rigid Sail Tests in the Unheeled Position. University of Southampton, Advisory Committee for Yacht Research, Febr. 1961.

[8] Marchaj, C.A.: Wind Tunnel Tests of a 1/3rd Scale Model of an X-one Design Yacht's Sails. University of Southampton, Advisory Committee for Yacht Research, Okt. 1962.

[9] Sainsbury, J.C.: Sailing Yacht Performance. Ship and Boat Builder,1963.

[10] Marchaj, C.A.: Sailing Theory and Practice. Verlag Dodd, Mead and Company, New York 1964.

[11] Wagner, B.: Windkanalversuche mit dem Takelagemodell einer Viermastbark. IfS-Bericht Nr. 172, Okt. 1966; Schiff und Hafen 19 (1967) S. 13-20.

[12] Wagner, B.: Windkräfte an Überwasserschiffen. Jahrbuch der STG 61 (1967).

1. Einführung

In Deutschland sind bisher kaum Arbeiten bekanntgeworden, die sich mit der Untersuchung der Kräfte auf Yachtbesegelungen befaßten. Croseck veröffentlichte 1925 [1] u.a. Kraftbeiwerte für Einzelsegel (Rechtecksegel, Gaffelsegel). Rösingh gab in einer Arbeit über die Fahrtgeschwindigkeitsberechnung für Segelyachten [2] Segelpolaren und Kraftbeiwerte für die "Rainbow" an ("America's Cup" Verteidiger von 1934). M. Curry gab in seinem Buch verschiedene Hinweise über die günstige Gestaltung von Yachtsegeln, die sich teilweise auf Windkanalversuchsergebnisse stützen [3].

Die angelsächsischen Länder waren auf dem Gebiet der Yachtforschung wesentlich aktiver. Everett [4] untersuchte schon 1915 ein Gaffelsegel im Windkanal. Warner [5] nahm 1925 Druckverteilungsmessungen an verschiedenen Horizontalschnitten eines Hochsegels vor und untersuchte verschiedene Wölbungsformen von Segeln auf ihre Zweckmäßigkeit. Die Bedeutung der Arbeit Davidsons von 1936 [6] liegt besonders in der Behandlung der hydrodynamischen Kräfte am Yachtrumpf. Seine aus dem Großversuch gewonnenen Beiwerte der Kraftkomponenten der Besegelung ("Gimcrack-Koeffizienten") werden bis in die heutige Zeit benutzt.

In jüngster Zeit wird besonders intensive Yachtforschung an der University of Southampton betrieben (Marchaj und Chapleo 1961 [7], Marchaj 1962 [8], Sainsbury 1963 [9], vergl. auch Marchaj 1964 [10]). Untersucht wurden u.a. verschiedene Sloop-Takelungen mit unterschiedlichen Vorsegeln, Schotungen der Vorsegel und des Großsegels in aufrechter Lage und bei Krängung. Teiluntersuchungen befaßten sich mit verschiedenen Segel- und Wölbungsformen.

Leider bleibt ein großer Teil der Forschungsergebnisse aus Wettbewerbsgründen geheim und wird dem Segler nicht zugänglich gemacht. Erinnert sei z.B. an den enormen Aufwand zur Vorbereitung der Regatten um den America's Cup.

Betrachtet man die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen an Yachtbesegelungen, so fällt auf, daß man das Hauptaugenmerk auf den Kurs "am Wind" richtete. Es fehlen meist Versuche bei raumem Wind und mit Spinnaker. Im Hauptteil der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß moderne Yachtbesegelungen "am Wind" schon sehr nahe am erreichbaren Optimum liegen, während die auffälligsten Schwächen derselben Besegelung besonders auf den ebenfalls wichtigen Kursen "mit halbem Wind" und "mit raumem Wind" liegen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Windkräfte an Schiffen" des IfS ergab sich die Möglichkeit, auch eine Segelyacht im Windkanal zu untersuchen. Da es sich nur um eine Teiluntersuchung innerhalb eines umfassenden Programms der Untersuchung verschiedener Schiffstypen im Windkanal handelte, konnte selbstverständlich nur ein sehr kleiner Teil der anstehenden Fragen behandelt werden.

Die Untersuchung gliedert sich in zwei Teile:

1. Eine Standard-Takelage mit Rumpf sollte auf möglichst allen Kursen zum Wind und bei den wichtigsten Segelführungen (einschließlich Spinnaker) untersucht werden. Das gibt die Möglichkeit, die Wirksamkeit der verschiedenen Segelführungen quantitativ vergleichen zu können und schafft die Grundlage für Fahrtgeschwindigkeitsberechnungen und den Vergleich mit anderen Takelungen.

2. Eine Standard-Takelage sollte ohne Rumpf gemessen werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, den Rumpfeinfluß abzuschätzen. Untersuchungen der Einzelsegel ermöglichen einen Vergleich ihrer Wirksamkeit und lassen auf Interferenzerscheinungen schließen. Ferner sollten verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der herkömmlichen Takelage in bezug auf ihre Wirksamkeit überprüft werden (verschieden starkes Auswehen, Mastdrehen, Mastverkleiden und -drehen, loses Unterliek, geänderter Holepunkt der Genua), und zwar mit und ohne Vorsegel.

2. Modellbeschreibung (vergl. Abb. 1).

Für die Untersuchungen wurde das Modell eines 7KR-Seekreuzers gewählt, den man als typisch für eine moderne Hochseeyacht bezeichnen kann. (Modell-Maßstab 1 : 20).

Der Überwasserrumpf und die Aufbauten wurden aus Teakholz hergestellt. Mast, Großbaum und Spinnakerbaum sowie Beschläge wurden in Messing ausgeführt, für die Wanten und Stage wurde flexibler Stahldraht verwendet. Die Segel bestanden aus Segeltuch Dacron 100 g/m^2, jeweils aus einem Stück (Ausnahme: Spinnaker). Am Großsegel-Achterliek waren Segellatten aus biegsamem Kunststoff aufgeklebt.

Um beim Großsegel bei Faltenfreiheit die gewünschte Wölbung (Wölbungstiefe ca. 9 % der Sehnenlänge) einstellen zu können, waren Mast und Großbaum geschlitzt und das Segeltuch zwischen den Mast- und Großbaumhälften eingeklemmt. Der Mast war abnehmbar und drehbar gelagert, die Verspannung war am Topp angebracht (keine Saling). Die Holepunkte für alle Schoten wurden so gewählt, wie es in der Segelpraxis üblich ist (s. Modellskizze).

Hauptabmessungen

Rumpf Länge	L_{OA} = 0.562 m	Lateralfläche	A_{L_R} =	0.0354 m^2	Rumpf o.Rigg
	L_{WL} = 0.405 m			0.0461 m^2	Rumpf m.Rigg
Breite	B_{max} = 0.156 m				
Masthöhe über WL	0.808 m				
Segelhöhe über WL	0.790 m				

Besegelung	Fläche A_S	Höhe H	Länge L_S	Seitenverhältnis $\lambda = H^2/A_S$
Großsegel und Fock	0.1605 m^2 *	0.667 m	0.480 m	2.77
Großsegel und Genua	0.1986 m^2 *	0.667 m	0.480 m	2.24
Großsegel	0.0936 m^2 *	0.667 m	0.259 m	4.75
Genua	0.1050 m^2 *	0.667 m	0.317 m	4.24
Fock	0.0669 m^2	0.646 m	0.202 m	6.25
Spinnaker	0.1630 m^2	–	–	–
maximale Fläche	0.3616 m^2	–	–	–
vermessene Fläche	0.1538 m^2	–	–	–

* projizierte Flächen

3. Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung ist bereits ausführlicher besohrieben worden [11] [12] und soll deshalb nur kurz erläutert werden.

Das Modell wurde in einem Rechteckstrahl von 1.75 m Breite und 1.00 m Höhe untersucht, der unten von einer Bodenplatte begrenzt wurde. In die Bodenplatte war eine das Modell tragende Drehscheibe eingelassen. Die unterhalb der Drehscheibe befindliche 3-Komponenten-Federgelenk-Waage ermöglichte die Messung von Widerstand, Querkraft und Giermoment.

Die Strömung war bis auf eine 26 mm dicke Anlaufgrenzschicht homogen, (die Stromfäden waren nahezu parallel). Modell (und damit auch die Segel) konnten durch Drehen der Drehscheibe beliebig zur Strömung angestellt werden. Die mitgemessenen Teilkräfte auf die Drehscheibe wurden korrigiert. Die Waage ist zur Messung großer Momente geeignet. Wegen der kurzen Modellänge ist deshalb die Meßgenauigkeit der Giermomente (und damit der Druckpunktvorlagen) geringer als die der Kraftkomponenten (zur Meßgenauigkeit vergl. auch [10]).

Wichtige Versuchsdaten:

Strahlquerschnitt	$A =$	$1.75\ m^2$	
Staudruck	$q =$	$12.12\ kp/m^2$	
	(Vorkammerdruck	$p_v = 12\ kp/m^2$)	
Strahlgeschwindigkeit	$V =$	ca.14.10 m/S	
Reynoldszahl	$R_n = \frac{V \cdot LS}{\nu}$	ca. $4.5 \cdot 10^5$	(bezügl. Segellänge)
Versperrung	$\frac{AS(max)}{A}$	ca. 0.206	maximal

Abb. 2 zeigt das Modell und die Versuchseinrichtung.

4. Versuchsdurchführung und Versuchsprogramm

Der Vorkammerdruck wurde während der Messung konstant gehalten. Eine Korrektur des Einflusses der Strahlversperrung auf den Staudruck und die wirksame Schräganströmung am Modell erfolgte nicht. Die Korrektur ist gering und für den Aussagewert der Versuchsergebnisse ohne Belang.

Der Modellrumpf wurde auf die Drehscheibe so aufgeschraubt, daß Mitte Drehachse $L_{OA}/2$ entsprach. Großbaumwinkel, Vorsegel-Holepunkt und Auswehen des Großsegels wurden bei jedem Versuch genau registriert. Das Auswehen des Großsegels, verbunden mit dem Steigen des Großbaums, wurde reproduzierbar eingestellt, nachdem das "natürliche Auswehen" bei einem Staudruck festgestellt worden war, bei dem für den Modellzustand das Verhältnis Baumgewicht zu Segeldruck dem Wert der Großausführung bei der Windstärke Bf. 4 entsprach. Durch bewußtes Einstellen eines anderen Auswehens läßt sich dessen Einfluß auf die Kraftbeiwerte ermitteln. Als Maß für das Auswehen wurde der größte Abstand der Verbindungslinie Segelkopf-Segelschothorn von dem Segel selbst gewählt. Dieses Maß kann in Prozenten der Größe des Abstandes Segelkopf-Segelschothorn angegeben werden.

Bei festgelegten Segeln wurde das Modell durch Drehen der Drehscheibe verschieden zur Strömung angestellt. Die Vorsegel wurden jeweils so geschotet, daß im Bereich anliegender Strömung ($\varepsilon \leq 30°$) maximale Querkraft erreicht wurde. Diese Schotung wurde dann bei den übrigen Kursen beibehalten. Die Fälle, in denen durch ein Auffieren der Vorsegel eine weitere Steigerung des Querkraftmaximums erreicht wurde, sind in den Diagrammen gesondert hervorgehoben. Zu den verschiedenen Segelstellungen wurden alle Kurswinkel eingestellt, bei denen die Segel noch nicht zu stark killten oder halsten, so daß jeweils über den gesamten realisierbaren Bereich gemessen wurde.

Das Rollmoment wurde nicht ermittelt, ebensowenig wurden die Kraftkomponenten und Giermomente für den gekrängten Zustand bestimmt. Die Abb. 3 bis 6 zeigen während der Modellversuch aufgenommene Fotos.

Versuchsprogramm

Zunächst wurde das gesamte Modell (einschließlich Rumpf) bei verschiedenen Segelführungen untersucht, ebenfalls der Rumpf allein.
Dann wurde der Mast ohne Rumpf auf der Drehscheibe verspannt. Ohne Rumpfeinfluß wurden wiederum verschiedene Segelführungen untersucht; außerdem wurden die Segel auch einzeln gemessen und Änderungen der Takelage in bezug auf ihre Wirksamkeit überprüft.

Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Modell (Besegelung)	Großbaum-stellung δ_S°	Auswehen mm	Bemerkung	Ergebnisse Tab.	Abb.
1. Yacht mit Großsegel und Fock	0, 10	25	–	1.1, 1.2	7
	20	70	–	1.3	7
	30	65	–	1.4	7
	60	95	–	1.5	7
2. Yacht mit Großsegel und Genua	10	25	–	2.1	12
	20	70, 26	–	2.2,2.3	12,13
	30	65	–	2.4	12
	60	92	–	2.5	12
3. Yacht mit Spinnaker	60	95	δ_{Sp}=45,°90°	3.1,3.2	14
	30	95	0°,45°	3.3,3.4	14
4. Yacht-Rumpf	0	–	mit u. ohne Rigg	4.	17
5. Großsegel und Fock	0, 10	25	–	5.1,5.2	18
	10	25	Mast 58°gedr.	5.3	25
	20	70	–	5.4	18
	0	25	Mast verkleidet	5.5	25
6. Großsegel und Genua	0, 10	25	Holepkt. 1	6.1,6.2	19
	20	70	Holepkt. 1	6.3	19
	10	25	Holepkt. 2	6.4	26
	10	25	Mast verkleidet	6.5	26
7. Großsegel	10	25	Mast 0°,58°	7.1	20,23
	20	25,50,70	–	7.2,7.3,7.4	20
	10	25	Mast verkleidet 55°gedreht	7.5	23
			optimal gedreht	7.6	23
	10	25	loses Unterliek	7.7	23
8. Fock	–	–		8.	21
9. Genua	–	–		9.	21

5. Definition und Darstellung der Kraft- und Momentkomponenten (vergl. Abb. 7).

Die Kraftkomponenten und Momente erhält man in Abhängigkeit vom Anströmwinkel ε (bezogen auf die Schiffslängsrichtung, "Kurs") und von der Segel- oder Großbaumstellung δ_S (vergl. Abb. 7). Der Anströmwinkel des Segels ε_S ergibt sich als Differenz von Kurs und Segelstellung.

Aus der Windkanalmessung ergaben sich unmittelbar: der Widerstand D in Anströmrichtung, die Querkraft C ("Auftrieb") senkrecht zur Anströmrichtung und das Giermoment N um die Drehachse in $L_{OA}/2$.

Aus D und C lassen sich in einfacher Weise die Längskraft X (maßgebend für den Vortrieb) und die Seitenkraft Y (maßgebend für Krängung und Abtrift) ermitteln. Aus dem Giermoment kann man nach $x_F = N/Y$ die Druckpunktvorlage x_F bestimmen, die bei der Konstruktion einer Yacht beachtet werden muß.

In Abb. 2 sind die Kraftkomponenten in Form der in der Aerodynamik üblichen dimensionslosen Beiwerte dargestellt, die auf den Staudruck $q = \frac{\rho}{2} V^2$ der Anströmgeschwindigkeit und die Segelfläche A_S bezogen sind:

z.B. Querkraftbeiwert $c_C = \frac{C}{q \cdot A_S}$.

Hier wurde A_S, die wirkliche Segelfläche (Tuchfläche), benutzt. (Für Vergleichsdarstellungen könnte z.B. aber auch die vermessene Segelfläche benutzt werden.)

Giermomentenbeiwert $c_N = \frac{N}{q \cdot A_S \cdot L}$.

Als Bezugslänge L im Nenner wurde bei den Versuchen mit Rumpf die Länge über alles L_{OA} und bei den Versuchen ohne Rumpf die Segellänge L_S gewählt. Die relative Druckpunktvorlage ergibt sich zu

$$\frac{x_F}{L} = \frac{c_N}{c_y} \quad ;$$

Aus Vergleichsgründen wurden die auf den Mastfußpunkt bezogenen Druckpunktvorlagen und Giermomentenbeiwerte c_{NM} berechnet, wobei als Bezugslänge immer L_S genommen wurde:

$$\frac{x_{F_M}}{L_S} = \frac{x_F - 0.048}{L_S} \quad ; \qquad c_{NM} = \frac{x_{F_M}}{L_S} \cdot c_y \quad .$$

6. Darstellung der Meßwerte

Gerade beim Vergleich verschiedener Besegelungen genügt nicht die übliche Auftragung der Kraft- und Momentenbeiwerte als Funktion des Anströmwinkels ε bzw. Segelanströmwinkels ε_s, also die Betrachtung jeweils nur einer Kraftkomponente. Die in der Aerodynamik häufig verwendete "Polarendarstellung" der Kraftbeiwerte $c_C = f(c_D)$ bietet die Möglichkeit der kombinierten Betrachtung von Widerstand und Querkraft. Für bestimmte Anströmwinkel der Besegelung wird der Querkraftbeiwert c_C über dem zugehörigen Widerstandsbeiwert c_D aufgetragen. Die einzelnen Punkte werden zur"Segelpolaren" verbunden. Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten der Polarendarstellung, die zwei verschiedenen Versuchstechniken entsprechen:

1. Darstellung von $c_C = f(c_D)$ für konstante Segelstellungen δ_s. Sie entspricht der für die vorliegenden Untersuchungen benutzten Versuchsmethode: Eine bestimmte Segel- (Großbaum-) Stellung δ_s wurde eingestellt und festgelegt. Während des Versuches wurden die unterschiedlichen Segelanströmwinkel durch Drehen des gesamten Modells bzw. Riggs erhalten; das Vorsegel konnte durch Fernbedienung nachreguliert werden.

2. Trägt man für eine vorgegebene Windrichtung zum Schiff ε für verschiedene Segelstellungen δ_s die Querkraftbeiwerte c_C über den zugehörigen Widerstandsbeiwerten c_D auf und verbindet die Punkte, so erhält man die andere mögliche Polarendarstellung. Die Versuchstechnik hierfür ist aufwendiger, da eine genaue fernbedienbare Segelverstellung nötig ist. Es ist aber möglich, diese Polaren auch aus den Querkurven ε = konst. der Darstellung c_C, $c_D = f(\varepsilon)$ für δ_s = konst. ("Methode 1") zu gewinnen.

Durch eine einfache Konstruktion, die schon von Croseck 1925 beschrieben wurde (Kurseck, vergl. [1] und Abb. 8), kann man für einen gegebenen Kurs zum Wind ε den maximalen Längskraftbeiwert c_X mit zugehörigem Seitenkraftbeiwert c_Y und Segelstellung δ_s gewinnen. Das ist allerdings nicht unbedingt die optimale Segelstellung. Bei einer genaueren Analyse muß der Widerstandsanstieg durch Abtrift - erforderlich zur Kompensation der Seitenkraft Y - und der Widerstandsanstieg bei Krängung berücksichtigt werden, die einen echten Vortriebsverlust darstellen.

7. Versuchsergebnisse

7.1. Vollständiges Yachtmodell (Segel und Rumpf).

Die Ergebnisse für die Windkräfte haben für alle Segelführungen ähnliche Tendenzen:

Mit zunehmendem Anstellwinkel der Segel wachsen Querkraft und Widerstand stetig an (Bereich anliegender Strömung). Ist ein gewisser Anstellwinkel erreicht, so verringert sich der Anstieg der Querkraft, da sich die Strömung an Teilen des Segels ablöst. Bei noch größeren Anstellwinkeln erreicht die Querkraft ihr Maximum und nimmt dann bei voller Ablösung ab, während der Widerstand weiter anwächst.

Wie bereits erwähnt, ist zur Beurteilung der Kraftkomponenten für das Segeln die Polarendarstellung $c_C = f(c_D)$ besser geeignet als die Darstellung c_C, $c_D = f(\varepsilon)$.
Wie aus Abb. 8 zu ersehen ist, erreicht man auf "Hoch-am-Wind"-Kursen den größten Vortrieb beim Zustand anliegender Strömung. Die Querkraft soll in diesem Bereich möglichst groß und der Widerstand möglichst klein sein. Der optimale Anstellwinkel, d.h. die Segelstellung, die die größte Geschwindigkeit liefert, ist in diesem Bereich allerdings immer etwas kleiner als der Winkel für die größte Längskraft X, da die Seitenkraft Y und damit Abtrift und Krängung verringert werden. Wenn im folgenden die Rede von der zu einem Kurs gehörenden Vortriebskomponente ist, so soll allerdings die maximal erreichbare Längskraft gemeint sein.

Auf "raumeren Kursen", d.h. von Kursen "Am Wind" über "Halber Wind" bis "Backstags" erreicht man im Bereich teilweise abgelöster Strömung, d.h. im Querkraftmaximum, den größten Vortrieb. Die Größe der Längskraft ist in diesem Bereich in erster Linie von der erreichbaren Querkraft abhängig, die Größe des dabei auftretenden Widerstandes spielt jetzt eine untergeordnete Rolle.

Da die Besegelung aus zwei Flächen besteht, die zudem verwunden sind, ist der Bereich des Querkraftmaximums breiter

als bei Tragflügeln. Trotzdem ist es ratsam, auf einen kleinen Teil der maximalen Querkraft zu verzichten, um nicht bei kleinen Kurs- oder Windrichtungsänderungen in den Bereich voll abgelöster Strömung mit wesentlich geringerer Längskraft zu geraten.

Bei achterlichem Wind, d.h. vom "Backstags-" bis "Vor-dem-Wind"-Kursen kann die Segelstellung für maximale Querkraft nicht mehr realisiert werden, da ein weiteres Auffieren des Großsegels durch die Wanten begrenzt ist. In den meisten Fällen ist dies auch gar nicht erforderlich, da im Bereich voll abgelöster Strömung größere Vortriebskräfte erreicht werden. Wichtig ist es auf diesen Kursen, einen möglichst großen Widerstand zu erreichen. (siehe Abb. 8).

Wie allerdings die Versuchsergebnisse zeigen, ist bei allen Besegelungen die eben beschriebene Polarenform nur bei dichtgeholtem Segel (Baumwinkel $\delta \leq 10^{\circ}$) zu erreichen. Wird der Baum aufgefiert, so verformen sich die Segel (Auswehen), Vorsegel und Großsegel stehen meist ungünstiger zueinander, und auch die Richtung des Rumpfes zum Wind ist ungünstiger. Die Folge ist, daß im Bereich anliegender und teilabgelöster Strömung erheblich größere Widerstände auftreten. Auch das Querkraftmaximum wird verringert, bis schließlich bei raumen und achterlichen Kursen eine so geringe Querkraft erreicht wird, daß die Polare völlig entartet.

7.1.1. Großsegel und Fock

Die Auftragung von Querkraft und Widerstand über dem Winkel ε erfolgte in Abb. 9. Die gleichen Meßwerte sind in Abb. 10 in Polarenform aufgetragen, wobei in dieser Darstellung die Punkte für gleiche Segelstellung δ_s und anwachsende Kurse des Bootes zum Wind ε verbunden worden sind.

Im Bereich anliegender Strömung zeigt sich ein Widerstandsunterschied zwischen den Großbaumstellungen $\delta_s = 0^{\circ}$ und 10°.

Da der Holepunkt der Fock bei allen Stellungen gleich bleibt, liegt dies offensichtlich daran, daß Großsegel und Fock bei $\delta_s = 10^o$ günstiger zueinander stehen als bei $\delta_s = 0^o$. Das Querkraftmaximum liegt bei $c_C = 1{,}7$. Im Bereich des Maximums streuen die Meßpunkte stärker, je nach der Sorgfalt, mit der man die Vorsegelschot einstellt, um das Maximum an Querkraft zu erreichen. Ab $\delta_s = 20^o$ tritt ein stärkeres Auswehen des Großsegels ein, da der Großbaum nicht mehr direkt über dem Holepunkt der Schot steht. Die Folge ist ein starker Abfall der Querkraft und ein Anwachsen des Widerstandes.

Trotz der geringen Zahl der Meßpunkte ist das Charakteristische aus der Polarendarstellung für konstante Kurse ε und anwachsende Baumwinkel δ_s zu erkennen (Abb. 11).
Je nach der Stellung der Segel zum Rumpf und zueinander und je nach der Verformung der Segel selbst (Auswehen) haben die Polaren einen unterschiedlichen Verlauf (z.B. ist die Querkraft auf den Rumpf für $\varepsilon > 80^o$ negativ und verringert somit die gesamte Querkraft, vergl. Abb. 17).

Auf Kursen "Sehr-hoch-am-Wind" ($\varepsilon < 30^o$) wird das Maximum der Polaren nicht ganz erreicht, da der Baum nicht mit $\delta_s < 0^o$ (nach Luv) angestellt werden kann.

Auf Kursen "Hoch-am-Wind" ($30^o \leq \varepsilon < 45^o$) liegt der günstigste Bereich für die normale Yachttakelage. Hier wird das größte Querkraftmaximum erreicht. Um bei zunehmendem ε volle Ablösung zu vermeiden, muß das Segel weiter aufgefiert werden ($\delta_s > 10^o$). Dadurch weht es stärker aus, was ein Ansteigen des Widerstandes und einen Abfall der Querkraft zur Folge hat.

Auf Kursen "Am Wind" $45^o \leq \varepsilon < 90^o$ werden daher die Polaren immer ungünstiger in bezug auf Querkraft, so daß die maximal erreichbaren Längskraftkomponenten relativ klein bleiben.

Bei "raumem und achterlichem Wind" $\varepsilon \geq 90^o$ ergeben sich die größten Längskraftkomponenten bei voll abgelöster Strömung. Ein ausgeprägtes Querkraftmaximum kann ohnehin nicht erreicht werden, da die Segel zu stark auswehen und bei zu kleinen Anstellwinkeln der obere Bereich des Großsegels heftig killt.

Auf Kursen $\varepsilon > 130 \div 150^{\circ}$ ist das Auffieren des Großbaumes auf $\delta_s = 60^{\circ}$ durch die Wanten begrenzt.

Durch Schraffur in Abb. 11 ist die Begrenzung der maximal erreichten Beiwerte angedeutet. Daraus ist ersichtlich, daß lediglich auf "Hoch-am-Wind"-Kursen diese Beiwerte ausgenutzt worden können; auf allen anderen Kursen sind die wirklich erreichten Beiwerte ungünstiger.

7.1.2. Großsegel und Genua

Da hier der Flächenanteil des Vorsegels an der Gesamtfläche größer ist als für "Großsegel und Fock" (53 % gegen 42 %), sind die Kraftkomponenten stärker von der Genuastellung abhängig.

Zum Vergleich mit den übrigen Besegelungen wird in Abb. 12 die Auftragung der Ergebnisse in Polarenform für konstante Segelstellungen benutzt.

Die Polare für $\delta_s = 10^{\circ}$ der auf die vorhandene Segelfläche bezogenen Beiwerte unterscheiden sich nur wenig von den Ergebnissen für "Großsegel und Fock".

Im Bereich größerer Querkraft sind die Widerstandsbeiwerte etwas höher als bei "Großsegel und Fock". Das kann auf den größeren induzierten Widerstand wegen des kleineren Seitenverhältnisses zurückgeführt werden ($\lambda = 2{,}24$ gegen $\lambda = 2{,}77$).

Die Polare für $\delta_s = 10^{\circ}$ läßt zwei Maxima erkennen:
Bei einem Segelanströmwinkel von $\varepsilon_s = 30^{\circ}$ löst sich die Strömung ab und die Querkraft vermindert sich stark. Durch sorgfältiges Auffieren der Genua kann die Strömung zumindest an der Genua wieder zum Anliegen gebracht werden. Die Querkraft erreicht bei einem Segelanströmwinkel von $\varepsilon_s = 45^{\circ}$ ein neues etwa gleich hohes Maximum, allerdings bei größerem Widerstand.

Man sollte also beim Segeln im Bereich des Querkraftmaximums

($40^\circ \leq \varepsilon < 55^\circ$) die Genua stärker auffieren, um ein Ablösen der Strömung hinauszuzögern.

Die Polaren für $\delta_s = 30^\circ$ und 60° bestätigen die bei "Großsegel und Fock" gefundenen Tendenzen:
Bei größeren Baumwinkeln werden die Querkraftmaxima kleiner. Bei $\delta_s = 30^\circ$ ist allerdings noch ein ausgeprägter Abreißpunkt vorhanden, da die Genua, die günstiger angestellt werden kann, einen größeren Flächenanteil besitzt.

An Hand der Abb. 13 soll demonstriert werden, wie groß der Verlust an Vortrieb durch das Auswehen ist.

Bei der Baumstellung $\delta_s = 20^\circ$ liegt der Großbaum nicht mehr über dem Kolepunkt der Schot und das Großsegel weht stärker aus. In der Abbildung sind die Polaren für schwaches und für starkes Auswehen eingetragen.
Z.B. könnte man auf dem Kurs $\varepsilon = 45^\circ$ durch weitgehendes Verhindern des Auswehens eine mehr als doppelt so große Längskraft erreichen, allerdings auf Kosten einer etwas vergrößerten Seitenkraft (vergl. Abb. 13).

7.1.3. Großsegel und Spinnaker

Zu drei Stellungen des Spinnakerbaumes ($\delta_{sp} = 0, 45, 90^\circ$) wurden zwei nach Augenschein und Segelerfahrung passende Großbaumstellungen ($\delta_s = 30$ und 60°) untersucht.

Die Ergebnisse sind wiederum in Polarenform dargestellt worden (Abb. 14). In das Diagramm sind die jeweils erreichbaren Längskraftkomponenten eingetragen.

Es zeigt sich, daß bei dem Kurs $\varepsilon = 100^\circ$ die Stellung $\delta_s = 30^\circ$, $\delta_{sp} = 45^\circ$ (von den untersuchten Stellungen) und bei $\varepsilon = 140^\circ$ die Stellung $\delta_s = 60^\circ$, $\delta_{sp} = 90^\circ$ am günstigsten sind. Es ist zu vermuten, daß auf den Zwischenkursen durch Segelstellungen, die zwischen den gewählten liegen, ähnliche Längskraftbeiwerte erzielt werden können. Die für die Zwischenkurse eingetragenen Längskraftkomponenten

stellen daher nicht das Optimum dar. Die Stellung $\delta_S = 60^\circ$, $\delta_{S_p} = 45^\circ$ ist in allen Fällen die schlechteste, da das Großsegel zu weit aufgefiert ist.

7.1.4. Druckpunktvorlagen

Die Lage des Druckpunktes für die Segelstellung $\delta_S = 10^\circ$ bzw. 30° in Abhängigkeit vom Kurs $x_{FM} = f(\varepsilon)$ zeigen die Abb. 9 ("Großsegel und Fock") und 15 ("Großsegel und Genua", "Großsegel und Spinnaker").
Für alle Versuche zeigt sich die gleiche Tendenz:

Bei größer werdenden Kursen wandert der Druckpunkt zunächst nach vorne und erreicht bei $\varepsilon = 30 \div 35^\circ$ die vorderste Lage für "Großsegel und Fock" $x_{FM/L_S} = 0$ (im Mast) und bei "Großsegel und Genua" $x_{FM/L_S} = -0.02$ (2 % hinter dem Mast).
Mit ablösender Strömung wandert er wieder nach hinten und liegt dann etwa bei $x_{FM/L_S} = -0.04$ ("Großsegel und Fock") bzw. bei $x_{FM/L_S} = -0.07$ ("Großsegel und Genua").

Für "Großsegel und Spinnaker" schwankt der Druckpunkt mit ± 3 % der Segellänge um die Lage des Mastes.

7.1.5. Vergleich der Besegelungen

Ein genauer Vergleich der verschiedenen Segelführungen, zur Beantwortung der Frage, mit welcher Besegelung man auf einem gegebenen Kurs die höchste Geschwindigkeit erreicht, ist nur mit Hilfe einer genauen Geschwindigkeitsberechnung möglich. Neben der auf dem jeweiligen Kurs erreichbaren Längskraft muß die Größe der Seitenkraft und die Lage des Druckpunktes der Höhe und der Länge nach berücksichtigt werden.

Unterscheiden sich jedoch Querkraft und Druckpunktvorlagen der zu vergleichenden Fälle nur wenig, so ist ein Vergleich

der erreichbaren Längskraft bereits aussagekräftig genug. In Abb. 16 sind für die untersuchten Besegelungen die auf jedem Kurs erreichbaren Längskraftbeiwerte c_X aufgetragen worden. Um die unterschiedlichen Segelflächen zu berücksichtigen, sind die Beiwerte auf die Segelfläche für "Großsegel und Genua" (als Standardbesegelung) bezogen.

Auf Kursen "Hoch-am-Wind" ($\varepsilon < 40^\circ$) sind die auf die jeweilige Fläche bezogenen c_X-Werte für "Großsegel und Fock" etwas größer als bei "Großsegel und Genua", allerdings bei einem entsprechend größeren Seitenkraftbeiwert c_Y. Berücksichtigt man allerdings die kleinere Segelfläche bei "Großsegel und Fock" (Faktor 0.808), so bringt die Besegelung "Großsegel und Fock" nur auf Kursen "Sehr-hoch-am-Wind" ($\varepsilon < 25^\circ$) Vorteile. Auf allen übrigen Kursen "Am Wind" bringen "Großsegel und Genua" 25 bis 40 % größere c_X-Werte.

Bei $\varepsilon = 65^\circ$ bzw. 75° erreichen "Großsegel und Fock" bzw. "Großsegel und Genua" ihre maximale Längskraft. Darüber fallen die Kräfte stark ab wegen der bereits erwähnten ungünstigen Einflüsse (Auswehen und schlechte Stellung der Segel zueinander).
Erst auf raumen Kursen ($\varepsilon > 90^\circ$) erreicht man mit Hilfe des Spinnakers auf Grund der größeren Fläche (Faktor 1,29) einen größeren Vortrieb. (Die eingetragenen Punkte sind wirklich erreicht worden, dazwischen liegende Werte können vermutlich mit anderen Segelstellungen erreicht werden). Zwischen den Kursen 70° und 90° scheint also die normale Yachttakelage eine ausgeprägte Schwäche zu besitzen, da die Genua nicht mehr effektiv ist und der Spinnaker noch nicht gesetzt werden kann.

Welchen Vortrieb man erreichen könnte, wenn man auf allen Kursen die Segel so einstellen könnte, daß die Einhüllende der Polaren für "Großsegel und Fock" (Abb. 11) verwirklicht würde, zeigt die Auftragung der c_X-Werte für die "ideale Polare" bezogen auf die Fläche von "Großsegel und Genua". Auf allen Kursen zwischen 35 und 115° erhielte man eine z.T. um 25 % größere Längskraft. Erst auf Kursen $\varepsilon > 115^\circ$ werden "Großsegel und Spinnaker" auf Grund der größeren Fläche günstiger.

7.2. Rumpf ohne Besegelung

In den bisherigen Versuchsergebnissen sind die Teilkräfte auf den Rumpf enthalten. Die Gesamtkräfte sind allerdings nur auf die Segelfläche bezogen worden. Die Anteile des Rumpfes lassen sich prinzipiell aus einem Vergleich der Messungen mit und ohne Rumpf ermitteln, wobei die Interferenz zwischen Mast und Segeln berücksichtigt werden müßte. Einfacher ist die hier angewandte direkte Messung der Teilkräfte auf den Rumpf sowie den Rumpf mit Rigg. Die Ergebnisse sind wichtig für die Berechnung des Windwiderstandes bei geborgenen Segeln (Fahrt mit Motor). Außerdem interessiert der prozentuale Anteil der Rumpfkraft an den Gesamtkräften.

In Abb. 17 sind die Querkraft- und Widerstandsbeiwerte des Rumpfes (korrigiert für die Anlaufgrenzschicht der Bodenplatte, vergl. [12]) über dem Anströmwinkel ε aufgetragen, und zwar mit und ohne Rigg. Deutlich ist der erhebliche Einfluß des Riggs auf die Widerstandsbeiwerte zu erkennen, besonders bei Anströmung von vorn (Gesamtwiderstand beträgt das 3,7-fache des Rumpfwiderstandes für $\varepsilon = 0^\circ$). Der Einfluß des Riggs auf die Querkraft ist wesentlich geringer.

Im Bereich des Querkraftmaximums ergaben sich folgende Anteile des Rumpfes an den Gesamtkräften für "Großsegel und Fock" ("Großsegel und Genua"):

	C_{Rumpf}/C_{gesamt}	D_{Rumpf}/D_{gesamt}	ε
$\delta_s = 0^\circ$	0.036	0.096	30°
10°	0.046 (0.039)	0.115 (0.125)	40° (40°)
20°	0.031 (0.016)	0.155 (0.103)	60° (70°)

7.3. Untersuchung der Besegelung ohne Rumpf

Der Mast des Yachtmodelles wurde derart montiert, daß die Höhe des Großbaumes über der Drehscheibe der Höhe über dem Aufbau des Yachtmodelles entspricht, da anzunehmen ist, daß auf diese Weise der Spiegelungseffekt bei beiden Versuchsserien etwa gleich ist.

Die bisher benutzten Segel wurden einzeln und im Verband untersucht.

7.3.1. Großsegel und Fock

Die Ergebnisse wurden wieder in Polarenform für konstante Großbaumstellungen δ_S und variierten "Kurs" ε dargestellt (Abb. 18).

Die Polaren haben sehr ähnliche Formen wie für die entsprechenden Segel mit Rumpf (man beachte, daß beide auf die gleiche Fläche bezogen sind).

Im Bereich anliegender Strömung ($\varepsilon < 40^\circ$) weist die Polare für Segel ohne Rumpf um etwa 15 % geringere Widerstände auf. Auch der maximale Querkraftbeiwert liegt nicht mehr bei $c_C = 1{,}7$, sondern bei $c_C = 1{,}6$. Im Bereich abgelöster Strömung äußert sich der Rumpfeinfluß ebenfalls in einem höheren Widerstand und erhöht somit den Vortrieb.

Die Großbaumstellung $\delta_S = 10^\circ$ ist günstiger als $\delta_S = 0^\circ$. Bei $\delta_S = 20^\circ$ macht sich das Auswehen negativ bemerkbar.

7.3.2. Großsegel und Genua

Deutlich ist in der Auftragung Abb. 19 zu erkennen, wie durch geeignetes Auffieren der Genua die Teilablösung hinausgezögert und die Querkraft gesteigert werden kann.

Vergleicht man die Großbaumstellungen $\delta_S = 0^\circ$ und 10°, so sieht man, daß erst im Bereich größerer Anstellwinkel ($\varepsilon > 30^\circ$)

die Stellung $\delta_s = 0^o$ günstiger ist als $\delta_s = 10^o$. Dies gilt für die optimale Schotung der Genua auf allen Kursen. Wird die Genau zu dicht gefahren, so sind die Widerstände größer und die erreichbaren Querkräfte kleiner.

Im Bereich anliegender Strömung treten bei "Großsegel und Genua" in etwa die gleichen Widerstands- und Querkraftbeiwerte auf wie bei "Großsegel und Fock". Bei abgelöster Strömung sind "Großsegel und Genua" wegen der stärkeren Abdeckung ungünstiger.

7.3.3. Großsegel (vergl. Abb. 20)

Durch den normalen Mast an der Eintrittskante wird der Widerstand des Segels wesentlich erhöht. Ablösung tritt schon sehr früh ein, so daß das Querkraftmaximum bei $c_C = 1{,}2$ liegt (Abb. 20). Das Großsegel allein ist also wesentlich schlechter als die Besegelungen Großsegel und Vorsegel.

Wichtig für die Segelpraxis ist außerdem, daß der Bereich des Querkraftmaximums bedeutend schmaler ist, als bei unterteilten Segelflächen. Beim Segeln in diesem Bereich kann ein geringfügiges Schwanken der Windrichtung oder des Kurses eine starke Vortriebsverminderung zur Folge haben.

Aus der Abbildung ist der schädliche Einfluß des Auswehens des Großsegels zu erkennen.
Bei den Großbaumstellungen $\delta_s \leq 10^o$ kann man das Auswehen sehr gering halten (25 mm entsprechen 3,5 % nach Definition Abschnitt 3). Bei $\delta_s > 10^o$ weht das Großsegel je nach der Windstärke mehr oder weniger stark aus. Bei einem Auswehen von 7,1 % (50 mm) erhöht sich der Widerstand um ca. 10 %, bei einem Auswehen von 9,9 % (70 mm) sogar um 50 %.

Durch welche Maßnahmen das Großsegel zu einem effektiven Segel gemacht werden kann, soll in Abschnitt 7.4. gezeigt werden.

7.3.4. Vorsegel

Bei diesem Versuch wurden die Vorsegel genauso geschotet wie im Verband mit dem Großsegel hoch am Wind. Der Anstellwinkel müßte definiert werden als Richtung der Sehne zwischen Vorliek und Schothorn und der Windrichtung. Durch ein Auffieren der Schot verringert sich dieser Winkel, gleichzeitig vergrößert sich aber auch die Wölbung des Segels.

Solange das Segel "dicht" gefahren wird, entspricht dem so definierten Anstellwinkel etwa der Winkel zwischen der Verbindungslinie Vorliek-Holepunkt (wie im Decksriß eingezeichnet, vergl. Abb. 1) und der Windrichtung.

Für die Fock ist dieser Winkel $\delta_v = 12{,}5^\circ$ und für die Genua $\delta_v = 12^\circ$ (Holepunkt 1) und $\delta_v = 17{,}5^\circ$ (Holepunkt 2).

Auf Grund des größeren Seitenverhältnisses (Fock $\Lambda = 6{,}25$, Genua 4,24) gegen die Besegelung "Großsegel und Fock" ($\Lambda = 2{,}77$) und wegen der scharfen Eintrittskante beträgt der Widerstandsbeiwert nur 1/3 bis 1/2 des Wertes der gesamten Besegelung. Aus diesem Grunde bringen die Vorsegel alleine auf Kursen "Hoch-am-Wind" größere auf die jeweilige Fläche bezogene Längskraftbeiwerte als z.B. "Großsegel und Fock". Z.B. ist für $\varepsilon = 30^\circ$ der größte Längskraftbeiwert bei der Fock um 34 % und bei der Genua um 27 % größer als für "Großsegel und Fock" (Abb. 21).

Durch ein Auffieren im Bereich des Querkraftmaximums konnte nur bei der Genua eine Verbesserung erreicht werden, bei der Fock war das Gegenteil der Fall, da zwar die Wölbung vergrößert aber das Auswehen dadurch verstärkt wurde.

7.3.5. Druckpunktvorlagen für die Segel einzeln und im Verband

Die Wanderung des Druckpunktes zeigt die gleiche Tendenz wie bei den Versuchen für Rumpf und Besegelung (Abb. 22).

Bei anliegender Strömung ($\varepsilon < 30^{\circ}$) liegt der Druckpunkt für "Großsegel und Fock" bei $x_{FM}/L_S = -0{,}025$ und für "Großsegel und Genua" bei $x_{FM}/L_S = -0{,}015$. Bei abgelöster Strömung ($\varepsilon > 70^{\circ}$) lauten die entsprechenden Werte für beide Besegelungen $x_{FM}/L_S = -0{,}11$.

Für das Großsegel mit Profilmast allein liegt der Druckpunkt bei $x_{FM}/L_S = -0{,}3$, bzw. bei abgelöster Strömung bei $x_{FM}/L_S = -0{,}38$ (bezogen auf Mitte Mast). Für die Fock allein liegt der Druckpunkt bei $x_{FM}/L_S = 0{,}45$ (0,60 hinter dem Segelhals) und für die Genua bei $x_{FM}/L_S = 0{,}14$ (0,53 hinter dem Segelhals).

7.4. Auswirkung von Änderungen der herkömmlichen Takelage

Aus den Untersuchungen der Einzelsegel geht hervor, wie wenig effektiv das Großsegel gegenüber den anderen Segeln ist. Das besagt natürlich noch nichts über seine Wirkung im Verband mit anderen Segeln. Selbst durch ein relativ kleines Vorsegel wie die Fock kann der schädliche Masteinfluß vermindert werden, so daß beide Segel zusammen recht günstige Beiwerte erzielen.

In einer weiteren Versuchsreihe sollte die Möglichkeit einer Verbesserung der herkömmlichen Besegelung untersucht werden.

Durch eine Drehung des Mastes um 58° zur Mittschiffslinie konnte erreicht werden, daß die Leeseite des Segels fast ohne Knick in die Kontur des Mastes überging. Dadurch wurde der Widerstand im Bereich des Querkraftmaximums um ca 40 % gesenkt und der Querkraftbeiwert selbst von c_C = 1,2 auf 1,5 erhöht (Abb. 23). Für den "Am-Wind"-Kurs $\varepsilon = 30^\circ$ bedeutet das eine Steigerung der Längskraft um 50 %.

Eine Mastverkleidung, durch die der Radius der Eintrittskannte etwas verringert wurde und durch die vor allem ein glatter Übergang zwischen Mast und Segel geschaffen wurde, brachte eine weitere allerdings nicht mehr so große Verbesserung. Zunächst wurde der Mast mit Verkleidung so gedreht, daß bei $\varepsilon = 30^\circ$ die Querkraft am größten war. Mit dieser für alle Kurse festen Maststellung (55° zur Mittschiffslinie, s. Abb. 23) wurde eine weitere Verringerung des Widerstandes und eine Steigerung der Querkraft erzielt. Durch ein weiteres Drehen des Mastes im Bereich des Querkraftmaximums konnte die Ablösung hinausgezögert und die maximale Querkraft auf 1,72 gesteigert werden. Gegenüber dem Normalmast beträgt die Steigerung der Längskraft bei $\varepsilon = 30^\circ$ ca. 67 %.

Wie aus der Gegenüberstellung der Polaren (Abb. 24) zu ersehen ist, übertrifft das auf diese Weise verbesserte Großsegel die übrigen Besegelungen "Großsegel und Fock" bzw. "Großsegel und Genua". Auf dem Kurs $\varepsilon = 30^\circ$ ist der Längskraftbeiwert c_X

um 14 % größer. Das Querkraftmaximum erreicht den gleichen Wert, allerdings bei kleinerem Widerstand. Der geringere Widerstandsbeiwert im Bereich großer Querkraft ist allerdings auf das größere Seitenverhältnis (Großsegel Λ = 4,75, Großsegel und Genua Λ = 2,24) zurückzuführen. Wie ein Vergleich der Widerstandsbeiwerte bei kleiner Querkraft zeigt, ist der "Profilwiderstand" (der von der Querkraft unabhängige Widerstand) für das Großsegel allein sogar größer als für "Großsegel und Fock". Das Erreichen eines relativ hohen Querkraftmaximums ist u.a. auf eine Vergrößerung der effektiven Wölbung durch das Drehen des Mastes bzw. des Mastes mit der Profilverkleidung zurückzuführen.

Der Nachteil eines Einzelsegels gegenüber mehreren Segeln im Verband ist, wie bereits erwähnt, das schmale Querkraftmaximum, was zur Folge hat, daß das Segel leicht "überzogen" werden kann. (An dem Segel des mit einem drehbaren Profilmast ohne Vorsegel ausgerüsteten C-Katamarans "Lady Helmsman" sind Fäden angebracht, so daß durch ein Plexiglasfenster die Strömung auf der Leeseite beobachtet werden kann.)

Es erhebt sich die Frage, ob sich die Verbesserungen, wie Drehen des Mastes und Profilverkleidung, auch noch im Verband mit den Vorsegeln lohnen.

Die Drehung des Mastes brachte bei "Großsegel und Fock" eine 6-prozentige Steigerung des Querkraftmaximums (Abb. 25). Die Profilverkleidung brachte in diesem Fall keine Verbesserung, da vermutlich der Spalt zwischen Fock und Großsegel zu stark versperrt wurde (vielleicht hätte eine Verlegung des Holepunktes der Fockschot nach außen eine Verbesserung gebracht).

Für "Großsegel und Genua" brachte die Profilverkleidung ebenfalls keine Verbesserung (Abb. 26).

Aus diesen Ergebnissen kann man schließen, daß durch die Wirkung der Vorsegel der schädliche Einfluß des Mastes weitgehend aufgehoben wird, und daß in diesen Fällen eine Profilverkleidung keine oder nur geringe Verbesserungen bringt.

Für einen speziellen Fall wurde die Auswirkung einer Verschiebung des Holepunktes der Genua nach außen untersucht. Auf normalen Yachten läßt sich dieser Fall (Holepunkt 2) wegen der begrenzten Decksbreite nicht verwirklichen. Wie Abb. 26 zeigt, brachte diese Änderung allerdings nur eine geringe Verbesserung im Bereich des Querkraftmaximums.

Eine weitere erfolgversprechende Verbesserung des herkömmlichen Großsegels liegt darin, das Unterliek nicht oder nur lose am Baum zu befestigen. Bei dem hier benutzten Modellsegel wirkte sich der Großbaum wie bei den meisten Yachtsegeln derart auf die Form des Segels aus, daß die gewünschte Wölbung bis etwa auf 1/4 der Segelhöhe nicht erreicht wurde. Die Folge ist, daß dieser Teil des Segels wenig effektiv ist. Ein loses Unterliek hat weiterhin den Vorteil, daß die Wölbungstiefe regulierbar ist und somit für den jeweiligen Kurs und die jeweilige Windgeschwindigkeit optimal eingestellt werden kann.

Der Einfluß dieser Verbesserung für das Großsegel allein ist aus Abb. 23 zu ersehen. Der maximale Querkraftbeiwert kann von $c_C = 1{,}2$ auf $c_C = 1{,}37$ erhöht werden, die Erhöhung der Längskraft für $\varepsilon = 30^\circ$ beträgt 26 %. In diesem Versuch wurde die Wölbung insgesamt nicht geändert, sondern nur im unteren Bereich des Segels dem oberen Bereich angepaßt. Durch ein Verstellen des Schothorns kann die Wölbung vergrößert und damit vermutlich die Querkraft weiter gesteigert werden.

8. Zusammenfassung und Folgerungen

An dem vollständigen Modell einer Segelyacht wurden die auf allen Kursen bei verschiedenen Segelstellungen und Segelführungen auftretenden Kräfte gemessen. Es war das Ziel, einerseits möglich vollständige Unterlagen für die Fahrtgeschwindigkeitsberechnungen und andererseits einen Überblick über die aerodynamische Wirksamkeit der Yachtbesegelungen zu gewinnen.

In weiteren Versuchsreihen wurden der Rumpf ohne Besegelung und schließlich die Segel ohne Rumpf einzeln und im Verband untersucht.

Dabei zeigte sich, daß die herkömmliche Yachtbesegelung auf Kursen "Hoch-am-Wind" sehr gute Vortriebswerte erzielt. Auf raumeren Kursen werden ihre Eigenschaften zunehmend schlechter, und erst wenn der Spinnaker gesetzt werden kann, ist wieder eine große Vortriebskraft erreichbar.

Die Untersuchung einiger Änderungen der Yachttakelage zeigte, daß insbesondere auf "Raumwind"-Kursen nennenswerte Verbesserungen möglich sind, die allerdings in der Regel einen größeren technischen Aufwand erfordern.

Im einzelnen können aus den vorliegenden Ergebnissen folgende Schlüsse gezogen werden:

- Auf Kursen "Hoch-am-Wind" besitzt die Yachttakelage bereits sehr gute Vortriebseigenschaften, so daß bei Verwendung von Tuchsegeln kaum Verbesserungen erzielt werden können.
- Bezogen auf die Segelfläche erreicht man mit den Besegelungen "Großsegel und Fock" und "Großsegel und Genua" etwa den gleichen Vortrieb. Die Genua dient also hauptsächlich zur Vergrößerung der Segelfläche bei leichteren Winden.
- Auf Kursen "Am Wind" verschlechtern sich die Vortriebseigenschaften der Besegelung zunehmend, da durch das Auffieren die Segel auswehen und ungünstiger zueinander stehen.

- Auf Kursen mit achterlichem Wind kann durch das Entfalten einer größeren Fläche (Spinnaker) ein günstiger Vortrieb erzielt werden.
- Verbesserungen der herkömmlichen Besegelung sind also vor allem auf "Am-Wind"- und "Raum-Wind"-Kursen möglich.
- Das Großsegel, das als Einzelsegel mit einem nahezu zylindrischen Mast an der Vorderkante schlechte Eigenschaften besitzt, kann durch ein Drehen des Mastes (um einen größeren Winkel als der Großbaum) und durch eine Profilverkleidung derart verbessert werden, daß es der Besegelung "Großsegel und Vorsegel" gleichkommt.
- Das Segeln mit einem Einzelsegel verlangt größere Aufmerksamkeit, da man bei kleinen Änderungen des Anströmwinkels leicht in den Bereich abgelöster Strömung gerät.
- Im Verband mit Vorsegeln bringt ein Drehen des Mastes oder eine Profilverkleidung keine nennenswerten Verbesserungen.
- Durch ein loses Unterliek kann die Wirkung des Großsegels wesentlich verbessert werden.
- Durch Niederholer oder Schotwagen sollte verhindert werden, daß das Großsegel auch bei größeren Baumwinkeln ausweht.
- Durch Vorrichtungen, die es ermöglichen, eine günstige Stellung der Vorsegel zum Großsegel auch bei größeren Baumwinkeln beizubehalten (z.B. durch Verschieben des Fockhalses nach Luv), können auf "Am-Wind"- und raumen Kursen ebenfalls Verbesserungen erzielt werden.

Tab. 1 (vergl. Abb. 7)
Tab. 1.1 - 1.3

Yacht mit Großsegel und Fock

$A_S = 0.1605\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 1.1 $\delta_S = 0^\circ$, Auswehen 25 mm

ε°	$\varepsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	15	0.920	0.221	0.025	0.946	0.0104
20	20	1.152	0.308	0.104	1.188	0.0325
25	25	1.331	0.411	0.190	1.381	0.0755
30	30	1.614	0.509	0.366	1.652	0.1115
30	30	1.691	0.535	0.383	1.732	0.1325
35	35	1.666	0.658	0.416	1.742	0.1207
40	40	1.717	0.835	0.464	1.852	0.1477
45	45	1.483	0.805	0.480	1.618	0.1059
50	50	1.329	0.864	0.463	1.516	0.0552
60	60	1.172	1.098	0.466	1.537	0.0761

Tab. 1.2 $\delta_S = 10^\circ$, Auswehen 25 mm

ε°	$\varepsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.869	0.206	0.104	0.887	0.0308
25	15	1.152	0.278	0.235	1.161	0.0733
30	20	1.460	0.380	0.401	1.455	0.1163
35	25	1.640	0.509	0.524	1.635	0.1390
40	30	1.691	0.691	0.557	1.740	0.1316
45	35	1.666	1.288	0.267	2.088	-0.5752
50	40	1.355	0.787	0.532	1.473	0.0746
60	50	1.223	1.046	0.536	1.518	0.0753

Tab. 1.3 $\delta_S = 20^\circ$, Auswehen 70 mm

ε°	$\varepsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
45	25	1.023	0.378	0.456	0.991	0.0784
50	30	1.252	0.483	0.648	1.175	0.0766
55	35	1.380	0.581	0.797	1.268	0.0713
60	40	1.481	0.712	0.926	1.357	0.0493
65	45	1.275	0.769	0.831	1.235	0.0295
70	50	1.223	0.848	0.860	1.216	0.0205
75	55	1.092	0.930	0.814	1.182	0.0080
80	60	1.015	1.054	0.817	1.214	-0.0038
90	70	0.810	1.164	0.810	1.164	-0.0123
100	80	0.653	1.265	0.863	1.132	-0.0349
11	90	1.422	1.324	0.849	1.100	-0.0167

Tab. 1 (vergl. Abb 7)
Tab. 1.4 - 1.5

Yacht mit Großsegel und Fock

$A_S = 0.1605\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 1.4 $\delta_S = 30^\circ$, Auswehen 65 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
55	25	0.979	0.422	0.560	0.907	0.0756
60	30	1.095	0.522	0.667	0.999	0.0256
65	35	1.146	0.630	0.773	1.055	0.0204
70	40	1.198	0.740	0.872	1.105	0.0119
75	45	1.172	0.823	0.919	1.098	0.0132
80	50	1.118	0.894	0.946	1.075	0.0005
90	60	1.005	0.928	1.005	0.928	-0.0024
100	70	0.756	1.172	0.948	1.023	-0.0226
110	80	0.612	1.247	1.001	0.962	-0.0524
120	90	0.396	1.280	0.983	0.911	-0.0277
130	100	0.180	1.254	0.944	0.845	-0.0350
140	110	-0.015	1.116	0.845	0.729	-0.0166

Tab. 1.5 $\delta_S = 60^\circ$, Auswehen 95 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
110	50	0.576	0.717	0.786	0.477	-0.0126
120	60	0.643	0.848	0.981	0.413	-0.0622
130	70	0.591	0.925	1.046	0.329	-0.0678
140	80	0.473	0.951	1.033	0.249	-0.0743
150	90	0.293	0.766	0.810	0.129	-0.0773

Tab. 2 (vergl. Abb. 12, 13)
Tab. 2.1 - 2.2

Yacht mit Großsegel
und Genua

$A_S = 0.1986\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.54 \cdot 10^5$

Tab. 2.1 $\delta_S = 10^o$, Auswehen 25 mm

ϵ^o	ϵ_S^o	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	5	0.328	0.104	-0.015	0.344	-0.0039
20	10	0.577	0.154	0.053	0.595	0.0080
25	15	0.889	0.208	0.187	0.894	0.0590
30	20	1.159	0.295	0.324	1.151	0.0771
35	25	1.421	0.405	0.483	1.396	0.0983
40	30	1.616	0.517	0.643	1.570	0.1280
42	32	1.471	0.592	0.544	1.489	0.0624
45	35	1.408	0.617	0.560	1.432	0.0739
47	37	1.450	0.721	0.569	1.516	0.0700
50	40	1.406	0.785	0.573	1.505	0.0738
50	40	1.510	0.806	0.639	1.588	0.0574
52	42	1.572	0.843	0.720	1.633	0.0636
55	45	1.656	0.910	0.834	1.695	0.0424
60	50	0.968	0.875	0.401	1.241	0.0446
60	50	1.467	0.974	0.783	1.577	0.0351
65	55	1.404	1.032	0.836	1.529	0.0137
70	60	0.843	1.086	0.421	1.309	0.0536
70	60	1.321	1.057	0.880	1.445	-0.0081

Tab. 2.2 $\delta_S = 20^o$, Auswehen 70 mm

ϵ^o	ϵ_S^o	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
45	25	0.806	0.397	0.289	0.850	0.0425
50	30	1.018	0.519	0.446	1.052	0.0473
55	35	1.282	0.623	0.692	1.246	0.0545
60	40	1.487	0.721	0.928	1.368	0.0589
65	45	1.529	0.845	1.028	1.412	0.0497
70	50	1.570	0.931	1.157	1.412	0.0372
75	55	1.194	0.922	0.915	1.200	0.0036
80	60	1.028	0.943	0.849	1.107	-0.0127
90	70	0.821	1.003	0.820	1.003	-0.0368
100	80	0.673	1.051	0.845	0.918	-0.0444

Tab. 2 (vergl. Abb. 12, 13)
Tab. 2.3 - 2.4

Nachl mit Spaltspoiler
und Gerne

A_S = 0.1936 m^2
L_S = 0.4800 m
R_n = $4.54 \cdot 10^5$

Tab. 2.3 $\delta_S = 20^\circ$, Auswehen 26 mm

ε°	$\varepsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
30	10	0.723	0.187	0.200	0.720	0.1088
35	15	1.055	0.278	0.377	1.024	0.0991
40	20	1.188	0.393	0.463	1.163	0.0814
45	25	1.406	0.499	0.642	1.347	0.0970
50	30	1.386	0.636	0.653	1.378	0.0714
55	35	1.406	0.756	0.718	1.426	0.0566
60	40	1.093	0.704	0.594	1.156	0.0363
60	40	1.570	0.870	0.925	1.539	0.0501
65	45	0.989	0.762	0.574	1.109	0.0261
65	45	1.093	0.779	0.661	1.168	0.0264
70	50	0.968	0.839	0.623	1.120	0.0134
75	55	0.987	0.910	0.718	1.134	0.0090
80	60	0.883	0.976	0.700	1.115	0.0212
90	70	0.737	1.082	0.737	1.082	-0.0300
100	80	0.548	1.155	0.741	1.042	-0.0149

Tab. 2.4 $\delta_S = 30^\circ$, Auswehen 65 mm

ε°	$\varepsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
50	20	0.671	0.399	0.258	0.737	0.0398
55	25	0.991	0.490	0.530	0.970	0.0858
60	30	1.217	0.580	0.764	1.111	0.0900
65	35	1.342	0.679	0.929	1.183	0.0582
70	40	1.134	0.690	0.830	1.036	0.0110
70	40	0.968	0.636	0.692	0.928	0.0046
75	45	0.883	0.677	0.677	0.883	-0.0281
75	45	1.007	0.710	0.789	0.947	-0.0053
80	50	0.800	0.719	0.663	0.847	0.0059
80	50	0.945	0.785	0.794	0.937	-0.0264
90	60	0.737	0.883	0.737	0.883	0.0002
90	60	0.904	0.908	0.904	0.908	-0.0550
100	70	0.594	1.010	0.760	0.891	0.0106
100	70	0.739	0.993	0.901	0.849	-0.0231

Tab. 2 (vergl. Abb. 12, 13)
Tab. 2.5

Yacht mit Großsegel
und Genua

$A_S = 0.1986\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.54 \cdot 10^5$

Tab. 2.5 $\delta_S = 60^o$, Auswohen 92 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
110	50	0.507	0.627	0.691	0.416	-0.0178
120	60	0.528	0.694	0.804	0.337	-0.0501
130	70	0.457	0.764	0.841	0.292	-0.0546
140	80	0.299	0.715	0.740	0.230	-0.0442

Tab. 3 (vergl. Abb. 14)
Tab. 3.1 - 3.3

Versuch mit Turbulenz

$A_D = 0.2566\ m^2$
$l_D = 0.4000\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 3.1 $\delta_S = 60^\circ$, $\delta_{Sp} = 45^\circ$, Auswehen 95 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
110	50	0.826	0.854	1.068	0.520	0.0589
115	55	0.714	0.892	1.024	0.507	0.0509
120	60	0.698	0.965	1.087	0.487	0.0499
125	65	0.650	0.994	1.102	0.441	0.0461
130	70	0.537	1.035	1.077	0.448	0.0597
140	80	0.360	1.068	1.049	0.410	0.0602
150	90	0.215	1.035	1.004	0.331	0.0597
160	100	0.103	0.961	0.939	0.232	0.0456
170	110	-0.010	0.826	0.812	0.153	0.0348

Tab. 3.2 $\delta_S = 60^\circ$, $\delta_{Sp} = 90^\circ$, Auswehen 95 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
135	75	1.116	0.923	1.442	-0.136	-0.0068
140	80	1.019	1.010	1.429	-0.132	0.0076
145	85	0.939	1.032	1.384	-0.177	0.0122
150	90	0.859	1.080	1.365	-0.203	0.0001
155	95	0.730	1.074	1.282	-0.208	0.0066
160	100	0.650	1.087	1.243	-0.239	-0.0084
170	110	0.469	1.109	1.174	-0.270	0.0048
180	120	0.286	1.100	1.100	-0.286	0.0090
190	130	0.122	1.100	1.062	-0.311	0.0176

Tab. 3.3 $\delta_S = 30^\circ$, $\delta_{Sp} = 0^\circ$, Auswehen 95 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
80	50	0.957	0.852	0.794	1.005	0.0524
85	55	0.860	0.913	0.777	0.985	0.0491
90	60	0.796	0.934	0.796	0.934	0.0387
95	65	0.810	0.973	0.892	0.898	0.0134
100	70	0.749	1.006	0.913	0.861	0.0118
110	80	0.617	1.079	0.949	0.803	0.0022
120	90	0.473	1.109	0.964	0.724	0.0048
130	100	0.328	1.132	0.979	0.656	0.0181
140	110	0.193	0.987	0.880	0.487	-0.0057

Tab. 3 (vergl. Abb. 14)
Tab. 3.4

Yacht mit Spinnaker

$A_S = 0.2566\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 3.4 $\delta_S = 30^\circ$, $\delta_{Sp} = 45^\circ$, Auswehen 95 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
100	70	1.084	1.055	1.250	0.851	0.0514
105	75	1.003	1.096	1.253	0.799	0.0477
110	80	0.852	1.127	1.186	0.768	0.0417
115	85	0.778	1.166	1.196	0.728	0.0596
120	90	0.666	1.170	1.162	0.681	0.0532
130	100	0.489	1.196	1.143	0.602	0.0622
140	110	0.296	1.196	1.106	0.542	0.0622
150	120	0.119	1.077	0.992	0.436	0.0388
160	130	-0.010	0.977	0.915	0.343	0.0501

Tab. 4 (vergl. Abb. 17)

Yacht-Rumpf

$A_{LR} = 0.0354\ m^2$
$L_{OA} = 0.5620\ m$
$R_n = 5.31 \cdot 10^5$

Tab. 4 $\delta_S = 0^o$, mit und ohne Rigg

	mit Rigg		ohne Rigg	
ε^o	c_C	c_D	c_C	c_D
0	0.0	0.070	0.0	0.300
10	0.082	0.093	0.079	0.293
20	0.186	0.128	0.184	0.330
30	0.280	0.233	0.271	0.437
40	0.350	0.361	0.330	0.555
50	0.338	0.478	0.321	0.662
60	0.210	0.502	0.212	0.689
70	0.140	0.536	0.145	0.730
80	0.035	0.560	0.039	0.757
90	-0.163	0.571	-0.146	0.767
100	-0.256	0.560	-0.234	0.765
110	-0.326	0.548	-0.293	0.755
120	-0.373	0.513	-0.341	0.717
130	-0.373	0.396	-0.341	0.610
140	-0.303	0.303	-0.282	0.514
150	-0.221	0.163	-0.214	0.378
160	-0.163	0.093	-0.155	0.311
170	-0.093	0.070	-0.088	0.282
180	0.0	0.047	0.0	0.254

Tab. 5 (vergl. Abb. 18, 25)
Tab. 5.1 - 5.2

Großsegel und Fock

$A_S = 0.1605\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 5.1 $\delta_S = 0^o$, Auswohon 25 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	15	0.607	0.144	0.018	0.623	-0.0296
20	20	0.889	0.206	0.111	0.906	0.0200
25	25	1.205	0.296	0.242	1.217	0.0418
30	30	1.411	0.419	0.343	1.432	0.0683
35	35	1.542	0.519	0.459	1.561	0.0904
40	40	1.439	0.645	0.431	1.517	0.0806
45	45	1.362	0.699	0.469	1.458	0.0938
50	50	1.285	0.828	0.452	1.460	0.0881
60	60	1.105	0.961	0.476	1.385	0.0745
70	70	0.846	1.105	0.417	1.328	0.0127
80	80	0.637	1.198	0.420	1.290	0.0305
90	90	0.416	1.257	0.416	1.257	0.0195

Tab. 5.2 $\delta_S = 10^o$, Auswohon 25 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	5	0.355	0.108	-0.012	0.371	-0.0060
20	10	0.612	0.134	0.084	0.621	0.0186
25	15	0.923	0.193	0.215	0.918	0.0399
30	20	1.231	0.265	0.386	1.199	0.0977
35	25	1.491	0.396	0.531	1.448	0.1042
40	30	1.568	0.558	0.581	1.560	0.1193
45	35	1.594	0.648	0.669	1.585	0.0928
50	40	1.517	0.828	0.630	1.609	0.1042
60	50	1.131	0.761	0.599	1.224	0.0304
70	60	1.026	0.915	0.651	1.211	0.0172
80	70	0.792	1.090	0.590	1.211	-0.0118
90	80	0.581	1.195	0.581	1.195	-0.0139
100	90	0.360	1.257	0.573	1.175	-0.0127

Tab. 5 (vergl. Abb. 18, 25)
Tab. 5.3 – 5.4

Großvogel und Beck

$A_S = 0.1505\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 5.3 $\delta_S = 10^\circ$, Mast 58° gedreht, Auswehen 25 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	5	0.278	0.093	-0.018	0.292	-0.0144
20	10	0.509	0.129	0.053	0.522	0.0266
25	15	0.820	0.131	0.228	0.799	-0.0580
30	20	1.154	0.244	0.366	1.122	0.0812
35	25	1.439	0.365	0.527	1.386	0.1036
40	30	1.594	0.478	0.658	1.528	0.0977
45	35	1.696	0.617	0.763	1.636	0.1245
50	40	1.594	0.679	0.785	1.544	0.0611
55	45	1.234	0.720	0.598	1.297	0.0456

Tab. 5.4 $\delta_S = 20^\circ$, Auswehen 70 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
45	25	0.771	0.242	0.374	0.716	0.0610
50	30	1.002	0.355	0.540	0.916	0.0792
55	35	1.182	0.458	0.706	1.053	0.0812
60	40	1.285	0.571	0.828	1.137	0.0510
65	45	1.257	0.668	0.857	1.137	0.0448
70	50	1.231	0.745	0.902	1.122	0.0059
75	55	1.177	0.812	0.927	1.089	-0.0170
80	60	1.126	0.915	0.950	1.097	0.0010
90	70	0.915	1.059	0.915	1.059	0.0037
100	80	0.658	1.128	0.844	0.997	-0.0232
110	90	0.450	1.203	0.834	0.977	0.0226

Tab. 5 (vergl. Abb. 18, 25)
Tab. 5.5

Großsegel und Fock

$A_S = 0.1605\ m^2$
$L_S = 0.4800\ m$
$R_n = 4.5 \cdot 10^5$

Tab. 5.5 $\delta_S = 0^o$, Mast verkleidet, Auswehen 25 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	20	0.509	0.113	0.068	0.517	0.0182
25	25	0.820	0.172	0.190	0.816	0.0718
30	30	1.128	0.254	0.344	1.104	0.0975
35	35	1.388	0.368	0.495	1.348	0.1158
35	35	1.439	0.383	0.512	1.399	0.1080
40	40	1.542	0.481	0.623	1.490	0.1098
40	40	1.517	0.450	0.630	1.451	0.1092
45	45	1.594	0.617	0.691	1.563	0.1245
45	45	1.645	0.591	0.745	1.581	0.1321
47	47	1.568	0.689	0.677	1.573	0.1258
50	50	1.311	0.668	0.575	1.355	0.0770
50	50	1.388	0.648	0.647	1.388	0.0767
55	55	1.234	0.730	0.592	1.306	0.0621
60	60	1.172	0.848	0.591	1.321	0.0562
70	70	1.026	1.033	0.610	1.322	-0.0048
100	100	0.350	1.298	0.570	1.218	0.0042

Tab. 6 (vergl. Abb. 19, 26)
Tab. 6.1 - 6.2

Grofsegel und Genua

$A_S = 0.1986\ m^2$
$L_S = 0.9800\ m$
$R_n = 9.2 \cdot 10^5$

Tab. 6.1 $\delta_S = 0^\circ$, Holepunkt 1, Auswehen 25 mm

ϵ°	$\epsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
5	5	0.066	0.073	-0.067	0.073	-0.0488
10	10	0.353	0.083	-0.021	0.362	-0.0248
15	15	0.640	0.120	0.049	0.649	-0.0021
20	20	0.848	0.179	0.122	0.858	0.0048
20	20	0.868	0.174	0.133	0.876	0.0208
25	25	1.078	0.272	0.209	1.092	0.0232
25	25	1.161	0.264	0.252	1.164	0.0359
30	30	1.120	0.355	0.252	1.147	0.0144
30	30	1.477	0.368	0.420	1.463	0.0497
35	35	1.516	0.501	0.460	1.529	0.0573
35	35	1.599	0.478	0.526	1.584	0.0587
40	40	1.433	0.652	0.422	1.517	0.0539
40	40	1.703	0.573	0.656	1.673	0.0563
42	42	1.350	0.702	0.382	1.473	0.0416
45	45	1.662	0.690	0.687	1.663	0.0446
50	50	1.620	0.756	0.755	1.621	0.0453
55	55	1.537	0.843	0.775	1.573	0.0301
60	60	1.537	0.906	0.878	1.553	0.0402
70	70	0.974	0.893	0.610	1.173	-0.0078
90	90	0.511	1.078	0.511	1.078	-0.0077

Tab. 6.2 $\delta_S = 10^\circ$, Holepunkt 1, Auswehen 25 mm

ϵ°	$\epsilon_S{}^\circ$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
10	0	0.058	0.058	-0.047	0.067	-0.0510
15	5	0.299	0.079	0.001	0.309	-0.0181
20	10	0.557	0.112	0.085	0.561	0.0217
25	15	0.850	0.164	0.210	0.839	0.0715
30	20	1.120	0.235	0.357	1.087	0.0859
35	25	1.329	0.337	0.487	1.282	0.1106
40	30	1.404	0.436	0.568	1.356	0.0668
45	35	1.558	0.544	0.717	1.486	0.0819
50	40	1.371	0.590	0.671	1.333	0.0371
50	40	1.641	0.661	0.832	1.561	0.0580
55	45	1.662	0.781	0.913	1.593	0.0668
60	50	1.599	0.839	0.966	1.527	0.0288
65	55	1.223	0.818	0.763	1.259	0.0088
70	60	1.182	0.918	0.797	1.267	-0.0154
80	70	0.848	1.001	0.661	1.133	-0.0138
100	90	0.407	1.136	0.598	1.048	0.0115

Tab. 6 (vergl. Abb. 19, 26)
Tab. 6.3 - 6.5

Großsegel und Genua

$A_S = 0.1906\ m^2$
$L_S = 0.9800\ m$
$R_n = 9.2 \cdot 10^5$

Tab. 6.3 $\delta_S = 20^\circ$, Holepunkt 1, Auswehen 70 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
50	30	0.976	0.349	0.524	0.895	0.0848
55	35	1.246	0.432	0.773	1.069	0.0733
60	40	1.288	0.499	0.866	1.076	0.0485
65	45	1.369	0.611	0.983	1.132	0.0440
70	50	1.410	0.685	1.091	1.127	0.0324
75	55	1.305	0.764	1.062	1.076	0.0013
80	60	1.034	0.785	0.882	0.953	-0.0309
90	70	0.947	0.866	0.947	0.866	-0.0261
100	80	0.760	0.958	0.915	0.811	-0.0114
110	90	0.571	1.022	0.886	0.765	-0.0069

Tab. 6.4 $\delta_S = 10^\circ$, Holepunkt 2, Auswehen 25 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.407	0.096	0.048	0.415	-0.0179
25	15	0.669	0.136	0.159	0.664	0.0124
30	20	0.975	0.208	0.308	0.948	0.0532
35	25	1.228	0.298	0.461	1.177	0.0845
40	30	1.446	0.390	0.631	1.359	0.1191
45	35	1.593	0.516	0.762	1.491	0.1346
50	40	1.635	0.616	0.856	1.523	0.0971
55	45	1.572	0.679	0.898	1.458	0.0785

Tab. 6.5 $\delta_S = 10^\circ$, Mast verkleidet, Auswehen 25 mm

ϵ°	ϵ_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.536	0.112	0.078	0.542	0.0347
25	15	0.829	0.172	0.194	0.824	0.0717
30	20	1.078	0.251	0.321	1.059	0.1122
35	25	1.334	0.361	0.469	1.300	0.1241
40	30	1.475	0.447	0.606	1.417	0.1159
45	35	1.662	0.557	0.781	1.569	0.1408
50	40	1.641	0.640	0.846	1.545	0.1163
55	45	1.641	0.760	0.908	1.564	0.0859
60	50	1.454	0.764	0.877	1.389	0.0665

Tab. 7 (vergl. Abb. 20, 23)
Tab. 7.1 - 7.2

Großsegel

$A_S = 0.0936\ m^2$
$L_S = 0.2590\ m$
$R_n = 2.4 \cdot 10^5$

Tab. 7.1 a $\delta_S = 10°$, Mast 0°, Auswehen 25 mm

$\varepsilon°$	$\varepsilon_S°$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	5	0.256	0.132	-0.062	0.281	-0.0723
20	10	0.652	0.141	0.091	0.661	-0.0976
25	15	0.926	0.225	0.187	0.934	-0.1331
30	20	1.128	0.339	0.270	1.147	-0.1292
32	22	1.190	0.392	0.298	1.217	-0.2298
35	25	1.014	0.410	0.246	1.066	-0.2036
40	30	0.970	0.502	0.238	1.066	-0.2132
50	40	0.970	0.688	0.301	1.150	-0.1811
70	60	0.793	1.067	0.381	1.274	-0.2448
100	90	0.229	1.362	0.462	1.301	-0.2218

Tab. 7.1 b $\delta_S = 10°$, Mast 58°, Auswehen 25 mm

$\varepsilon°$	$\varepsilon_S°$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.696	0.176	0.073	0.715	-0.0964
25	15	1.053	0.242	0.225	1.057	-0.1838
30	20	1.362	0.339	0.387	1.349	-0.1804
32	22	1.450	0.357	0.466	1.419	-0.1798
35	25	1.499	0.472	0.473	1.498	-0.2015
37	27	1.566	0.533	0.396	1.412	-0.2506
40	30	1.111	0.560	0.285	1.211	-0.2240

Tab. 7.2 $\delta_S = 20°$, Auswehen 25 mm

$\varepsilon°$	$\varepsilon_S°$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
25	5	0.379	0.145	0.028	0.405	-0.1103
30	10	0.705	0.163	0.211	0.692	-0.1353
35	15	1.014	0.256	0.372	0.977	-0.1449
40	20	1.146	0.392	0.436	1.130	-0.2042
42	22	1.058	0.414	0.400	1.063	-0.2163
45	25	1.031	0.458	0.405	1.053	-0.1891
50	30	0.970	0.520	0.408	1.022	-0.2126
60	40	1.058	0.732	0.550	1.163	-0.2052
80	60	0.829	1.084	0.628	1.212	-0.2955
110	90	0.194	1.380	0.654	1.230	-0.2724

Tab. 7 (vergl. Abb. 20, 23)
Tab. 7.3 - 7.5

Großsegel

$A_S = 0.0936\ m^2$
$L_S = 0.2590\ m$
$R_n = 2.4 \cdot 10^5$

Tab. 7.3 $\delta_S = 20^\circ$, Auswehen 50 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
35	15	0.617	0.172	0.213	0.604	-0.1606
40	20	0.970	0.269	0.417	0.916	-0.1572
42	22	1.058	0.335	0.459	1.010	-0.1934
45	25	1.190	0.397	0.561	1.122	-0.2681
50	30	1.014	0.450	0.488	0.996	-0.2150
60	40	1.014	0.626	0.565	1.049	-0.2089
80	60	0.873	1.014	0.683	1.150	-0.2467
110	90	0.286	1.366	0.736	1.186	-0.2344

Tab. 7.4 $\delta_S = 20^\circ$, Auswehen 70 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
42	22	0.529	0.207	0.200	0.532	-0.1338
45	25	0.723	0.273	0.318	0.704	-0.1699
47	27	0.833	0.300	0.405	0.787	-0.2459
50	30	0.970	0.361	0.510	0.900	-0.2181
52	32	1.058	0.405	0.584	0.971	-0.2422
55	35	1.058	0.450	0.609	0.975	-0.2150
60	40	0.934	0.485	0.567	0.887	-0.2651
80	60	0.873	0.802	0.720	0.942	-0.2028
110	90	0.436	1.203	0.822	0.981	-0.2273

Tab. 7.5 $\delta_S = 10^\circ$, Mast verkleidet, 55° gedreht, Auswehen 25 mm

ε°	ε_S°	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.608	0.141	0.175	0.620	-0.0976
25	15	0.921	0.181	0.226	0.911	-0.1603
27	17	1.062	0.216	0.290	1.044	-0.1591
30	20	1.300	0.278	0.410	1.265	-0.1569
32	22	1.413	0.313	0.482	1.362	-0.1557
35	25	1.543	0.361	0.589	1.471	-0.1412
37	27	1.305	0.454	0.423	1.315	-0.1764
40	30	1.208	0.489	0.401	1.240	-0.2265
45	35	1.093	0.573	0.368	1.178	-0.1595
50	40	1.058	0.670	0.380	1.193	-0.1817
60	50	1.005	0.864	0.438	1.251	-0.1750
70	60	0.877	1.049	0.465	1.286	-0.1429
100	90	0.282	1.397	0.520	1.327	-0.1180

Tab. 7 (vergl. Abb. 20, 23)
Tab. 7.6 - 7.7

Großsegel

$A_S = 0.0936\ m^2$
$L_S = 0.2590\ m$
$R_n = 2.4 \cdot 10^5$

Tab. 7.6 $\delta_S = 10^o$, Mast verkleidet, optimal gedreht, Auswehen 25 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.617	0.141	0.079	0.628	-0.0976
25	15	0.921	0.172	0.234	0.908	-0.1350
30	20	1.303	0.278	0.410	1.265	-0.1569
32	22	1.410	0.313	0.482	1.362	-0.1557
35	25	1.587	0.370	0.607	1.512	-0.1665
37	27	1.587	0.419	0.620	1.519	-0.1777
40	30	1.719	0.472	0.744	1.620	-0.1758
45	35	1.128	0.573	0.393	1.203	-0.1595
50	40	1.058	0.661	0.385	1.186	-0.2077

Tab. 7.7 $\delta_S = 10^o$, loses Unterliek, Auswehen 25 mm

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	10	0.652	0.150	0.082	0.664	-0.1229
25	15	0.983	0.216	0.220	0.982	-0.2103
30	20	1.256	0.339	0.334	1.258	-0.1804
32	22	1.362	0.392	0.389	1.363	-0.2298
35	25	1.287	0.467	0.355	1.322	-0.2144
40	30	1.058	0.507	0.292	1.136	-0.1746
45	35	1.005	0.591	0.293	1.128	-0.2101
50	40	1.014	0.679	0.340	1.172	-0.2071
70	60	0.851	1.031	0.447	1.260	-0.2461
100	90	0.220	1.371	0.455	1.312	-0.1958

Tab. 8 (vergl. Abb. 21)

Rock

$A_S = 0.0669\ m^2$
$L_S = 0.2020\ m$
$R_n = 1.9 \cdot 10^5$

ϵ^o	$\epsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
15	15	0.290	0.049	0.027	0.293	0.1861
20	20	0.654	0.037	0.189	0.627	0.3235
25	25	0.839	0.074	0.287	0.791	0.6469
30	30	1.270	0.148	0.507	1.174	0.8341
32	32	1.394	0.173	0.592	1.273	0.8352
35	35	1.455	0.234	0.643	1.327	0.8840
40	40	1.394	0.370	0.612	1.305	0.9360
40	40	1.394	0.234	0.716	1.218	0.7920
45	45	1.147	0.499	0.458	1.164	0.8268
45	45	1.332	0.302	0.728	1.156	0.7261
50	50	1.024	0.573	0.416	1.097	0.6462
50	50	1.147	0.314	0.676	0.978	0.6806
60	60	0.826	0.697	0.367	1.017	0.6517
60	60	1.085	0.462	0.709	0.943	0.5953
70	70	0.721	0.832	0.393	1.029	0.7497
70	70	0.968	0.561	0.718	0.858	0.5537
100	100	0.191	1.116	0.382	1.066	0.9462
100	100	0.684	0.672	0.791	0.543	0.3748

Tab. 9 (vergl. Abb. 21)

Genua

$A_S = 0.1050\ m^2$
$L_S = 0.3170\ m$
$R_n = 3.0 \cdot 10^5$

ε^o	$\varepsilon_S{}^o$	c_C	c_D	c_X	c_Y	c_N
20	20	0.739	0.071	0.186	0.718	0.1327
25	25	1.163	0.141	0.363	1.114	0.2653
30	30	1.399	0.220	0.509	1.321	0.3796
35	35	1.281	0.267	0.516	1.202	0.3436
35	35	1.414	0.244	0.612	1.298	0.3616
40	40	1.202	0.365	0.493	1.156	0.3370
40	40	1.517	0.303	0.743	1.356	0.4099
45	45	1.399	0.334	0.753	1.225	0.3361
50	50	1.438	0.358	0.872	1.198	0.3181
55	55	1.242	0.373	0.803	1.018	0.3186
60	60	1.163	0.428	0.793	0.952	0.2641
70	70	1.084	0.468	0.859	0.810	0.1906
100	100	0.735	0.703	0.846	0.565	0.1786

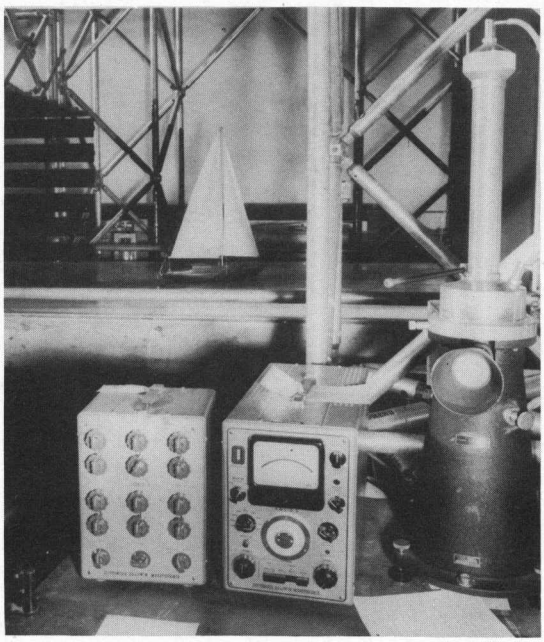


Abb. 2 Modell und Versuchseinrichtung

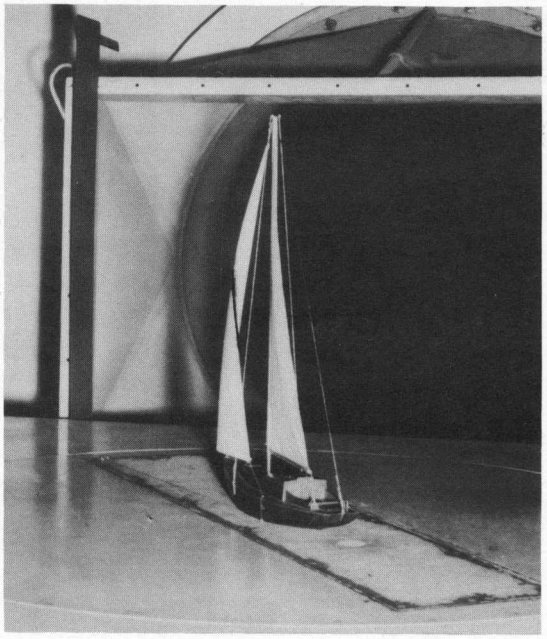


Abb. 3 Modell "Hoch am Wind" vor der Windkanaldüse

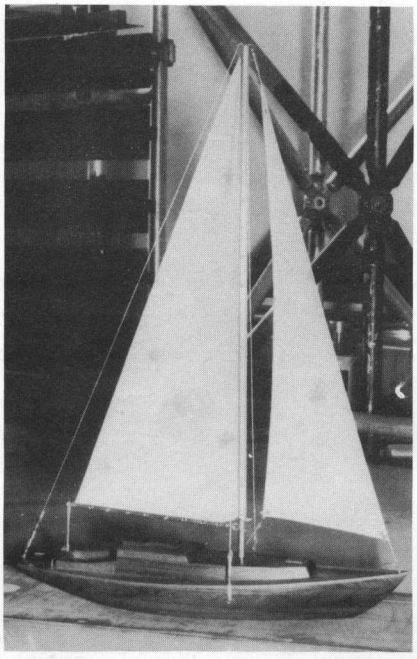


Abb. 4 Großsegel und Fock

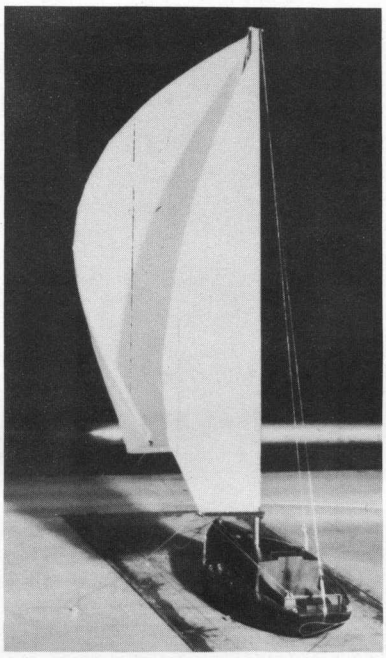


Abb. 5 Großsegel und Spinnaker

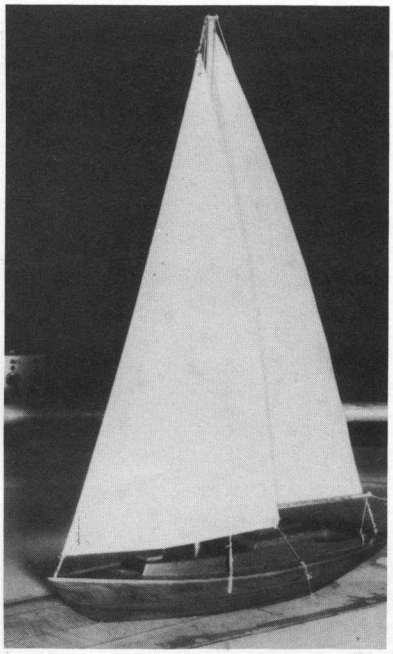


Abb. 6 Großsegel und Genua