

23 | 1955

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dipl.-Ing. H. Thieme

### Mechanik des Segelantriebes

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

## **g) Mechanik des Segelantriebes**

### **Beitrag zu einer Untersuchung der Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes**

Von Dipl.-Ing. H. Thieme, Hamburg

Mit der allmählich verschwindenden wirtschaftlichen Bedeutung des Segelantriebes ist diese Antriebsart mehr und mehr aus dem Gesichtsfeld theoretischer Untersuchungen verschwunden. So steht auch zur Zeit keine dem heutigen Stande der Strömungstechnik angepaßte Segelmechanik zur Verfügung, um die dennoch auch heute anfallenden Aufgaben dieses Antriebes in befriedigender Weise behandeln zu können. Insbesondere fehlt von dieser Seite her eine verläßliche Unterlage zu Beurteilung der Wirtschaftlichkeitsgrenzen des Segelantriebes überhaupt. Entsprechend diesen Bedürfnissen bringt die Arbeit eine Zusammenstellung von Grundlagen zur Berechnung der Geschwindigkeit von Segelschiffen, um sowohl für Einzelfälle Leistungsangaben machen zu können wie auch für systematische Untersuchungen mit dem Ziele einer technischen Verbesserung bzw. optimalen Auswahl der Besegelung dienen zu können. Die technischen Grenzen des Segelantriebes bedürfen dann noch einer endgültigen Bewertung im Hinblick auf die durch das Wetter und die Wirtschaftlichkeit gesetzten Bedingungen.

#### **1. Einführung**

1. a) Anlaß der Untersuchung
1. b) Ziel der Untersuchung und Anwendung der Ergebnisse
1. c) Allgemeine Charakterisierung des Segelantriebes im Vergleich zu anderen Antriebsarten

#### **2. Kinematische Grundlagen**

2. a) Definitionen für Geschwindigkeiten und Winkel
2. b) Grundgleichungen der Geschwindigkeitsdreiecke
2. c) Kinematisch bedingte Geschwindigkeitsgrenzen beim Segeln

#### **3. Allgemeine dynamische Beziehungen**

3. a) Vortrieb, Querkraft und Stabilität
3. b) Segeln ohne Luftwiderstand
3. c) Segeln mit konstantem Luftwiderstandsverhältnis  $W_A/Q_A$
3. d) Dynamische Bedingungen bei allgemein variablem Luftwiderstand und optimaler Segelstellung

#### **4. Besegelung**

4. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften der Besegelung
4. b) Form und Größe der Besegelung
4. c) Beispiele und statistische Grenzen für die Kräfte von Besegelungen
4. d) Formulierung der Kräfte von Segelflächen
4. e) Einfluß von Windverteilung und Interferenzen der Besegelung. Ersatz durch freifahrendes Einzelsegel
4. f) Segel mit Luftauftrieb und Krängungsausgleich

#### **5. Unterwasserschiff**

5. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften des Unterwasserschiffes
5. b) Form und Größe des Unterwasserschiffes
5. c) Beispiele und statistische Grenzen für die Kräfte von Unterwasserschiffen
5. d) Formulierung der Kräfte von Unterwasserschiffen
5. e) Einfluß von Kielflosse, Schwert und Ruder
5. f) Flossen mit dynamischem Auftrieb und Krängungsausgleich

#### **6. Kufen und Räder**

6. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften von Kufen und Rädern
6. b) Angaben für die Kräfte an Kufen und Rädern

#### **7. Geschwindigkeiten von Segelfahrzeugen**

7. a) Statistische Angaben über die Geschwindigkeiten von Segelfahrzeugen
7. b) Geschwindigkeiten unter allgemeinen Bedingungen bei optimaler Segelstellung
7. c) Segeln mit dynamischem Auftrieb und Krängungsausgleich
7. d) Stromsegeln ohne Wind
7. e) Segeln mit Hilfsmotor

8. Folgerungen für Anwendungen und Ergänzungen
  8. a) Zur Anwendung der einzelnen Ergebnisse
  8. b) Vertiefung in der Behandlung der bearbeiteten Probleme
  8. c) Weitere Aufgaben der Segelmechanik
  8. d) Ergänzungen zur Darstellung der Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes
9. Schrifttum

## 1. Einführung

### 1. a) Anlaß der Untersuchung

Für umfangreiche Untersuchungen zum Thema Segelschiff besteht zwar keine besondere Aktualität mehr. Dennoch lassen eine Reihe von Tatsachen diesen Stoff auch im Jahre 1955 noch technisch interessant erscheinen: In aller Welt sind nach dem Kriege erneut Segelschulschiffe in Dienst gestellt worden. Die Leistungen im Segelsport stagnieren keineswegs. Vor wissenschaftlichen Gremien sind solche Themen neuerdings wiederholt behandelt worden [30, [6], [88]. Dabei tendiert der Vortrag von Barkla mehr auf die Zukunft des Jachtsports, und die Vorträge von Erbach und Timmermann gehören zur Technik-Geschichte. Eine Behandlung des Themas mit den derzeitigen Mitteln der Mechanik, wie sie früher von v. Schulmann, Croseck, Baader, Petersohn, Frey und Rösingh mehr oder weniger weitgehend begonnen worden ist, ist seitdem nicht wesentlich fortgeführt worden. Auch die bedeutenden experimentellen Arbeiten von Davidson aus dem vergangenen Jahrzehnt haben noch zu keiner veröffentlichten Gesamtdarstellung der Probleme an Hand der heute zur Verfügung stehenden Hilfsmittel geführt. So ergibt sich der eigentliche Anlaß für diese Arbeit durch diese gewissen Lücken auf dem speziellen Gebiet der Segelmechanik. Weiter zeigte sich im Verlauf der Untersuchungen, daß für ihre Ergebnisse noch aktuellere Anwendungen auf anderen Gebieten der schiffbaulichen Strömungstechnik (z. B. Schiffsruder, Manövrieren usw. vgl. 1. b)  $\delta$ ) erwartet werden dürfen und daß sich möglicherweise auch die Anzahl der technischen Anwendungen des Segelantriebes selbst wird erweitern lassen.

### 1. b) Ziel der Untersuchung und Anwendung der Ergebnisse

**1. b)  $\alpha$ : Historische Gesichtspunkte.** Auf dem Gebiet der Technik-Geschichte spielt das Segelschiff eine besondere Rolle. Durch die — im Unterschied zu sehr vielen „Maschinen“ — recht erfreuliche äußere Erscheinungsform steht es wie viele Landbauwerke der Kunstgeschichte besonders nahe. Ein Hinweis auf den Namen Erbach [30] soll in diesem Zusammenhang weitere Ausführungen erübrigen. Bild 1 als Beweis ist der genannten Arbeit entnommen. Aber auch noch etwas anderes unterscheidet das Segelschiff von anderen Gebieten der Technik-Geschichte. Bei diesen führt das Erscheinen der neuzeitlichen Formen auch auf ein tieferes Eindringen in die physikalischen Grundlagen der entsprechenden Geräte und Maschinen. Beim Segelschiff ist das in dem Maße nicht der Fall, da es durch das Maschinenschiff verdrängt worden ist, noch ehe die technisch-wissenschaftliche Entwicklung diesen Stand erreicht hatte. Es hat sich auch auf anderen Gebieten gezeigt, daß die Beherrschung der physikalischen Grundlagen eine große Erleichterung für historische Arbeiten ist. Umgekehrt hat sich erwiesen, daß mehr historisch beschreibende Arbeiten Anregungen und Bestätigungen für technische Untersuchungen wie diese hier sein können. Vgl. hierzu [84], [85], [88].

**1. b)  $\beta$ : Unmittelbar aktuelle Anwendung.** Zweifellos wird man heute ebenso wie in vergangener Zeit auch ohne die Kenntnis von Ergebnissen der Segelmechanik mit Nutzen oder Freude segeln können und empirisch bedingte Entwürfe für Neubauten anfertigen können. Dennoch dürfte sich auch auf diesem Gebiete wie in jedem anderen technischen Fach zeigen, daß Rechenverfahren in praktisch verwertbarer Form als nützlich gern begrüßt werden und für Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Betriebes der bestehenden Fahrzeuge ebenso wie der Neubauten förderlich sind.

Neben den beiden letzten Frachtseglern auf großer Fahrt fahren noch eine größere Anzahl von Schulschiffen. Hinzu kommen stellenweise noch Frachtsegler in der Küstenfahrt und Segelfischerei. Mit Ausnahme der Schulschiffe ist bei diesen Typen jedoch weiterhin mit einer Abnahme der Anzahl und Bedeutung zu rechnen. Um eine eher gegenläufige Tendenz aber handelt es sich bei der Sportsegelerei, in der zudem recht beachtliche Anlagewerte enthalten sind. Von hier aus sind auch in der jüngsten Vergangenheit Forschungsaufträge meist experimentellen Charakters an Schiffbauinstitute oder Einzelpersonlichkeiten gegeben worden, so daß allein daraus ein Anlaß für Schiffbauinstitute sich ergibt, auch derartigen Themen eine gewisse Aufmerksamkeit zu schenken. Ähnliche Impulse gehen auch von der Modellsegelerei aus. Aus der Technik des Modellsegelns ergibt sich für den Modell-

segler noch mehr als für den Sportsegler die Notwendigkeit, sich über die Segelmechanik Gedanken zu machen.

Jedoch ist als Ziel einer aktuellen Anwendung nicht das Segeln auf dem Wasser allein anzusprechen. Das Segeln auf dem Eis ist zwar klimatisch in seiner Ausdehnung stark eingeschränkt; es ist jedoch das naturgegebene Gebiet für Höchstleistungen im Segeln, und insofern ist es also gleichermaßen von theoretischem wie praktischem Interesse. In Theorie und Technik stark verwandt mit dem Eissegeln ist das Segeln auf Rädern. Während Segelwagen auf Schienen zwar schon seit längerer Zeit, aber immer nur in seltenen Fällen vorkommen, hat sich in neuerer Zeit der Segelwagensport mit luftbereiften Fahrzeugen am Sandstrand einer wachsenden Beliebtheit erfreut. Auch auf diese Sparte soll sich das Ergebnis dieser Arbeit erstrecken.

**1. b)  $\gamma$ : Anwendung bei technischen Weiterentwicklungen.** Selbstverständlich soll sich diese Untersuchung nicht allein auf eine Art Nachrechnung historischer oder heute normaler Ausführungen von Segelfahrzeugen beschränken. Da sie in den Grundlagen breit angelegt ist, muß sie geeignet sein, technischen Entwicklungen auf diesem Gebiet zu dienen. Solche Entwicklungen brauchen sich aber nun keineswegs auf die heutigen Normaltypen von Segelfahrzeugen und deren normale Anwendungsgebiete zu beschränken. Es werden einmal also erhebliche Varianten in der Art der Takelage und unter Umständen in der Art der Flossen bzw. Schwert in Betracht zu ziehen sein. Zum ändern können sich neue Anwendungen z. B. aus der Steigerung der Fahrtgeschwindigkeit von Segelbooten sowie aus fortgeführter Durchentwicklung und wirtschaftlichem Einsatz von Segelwagen ergeben. Zum Beispiel ist der Gedanke, Segelflugzeuge durch Segelfahrzeuge schleppen zu lassen, sicher nicht ganz ohne Aussicht. Bereits im Jahre 1937 wurde in den USA ein Segelflugzeug durch eine Eisjacht gestartet. Beim Schleppen erreichte diese Eisjacht dabei immer noch etwa 185% der Windgeschwindigkeit an Fahrt. Auf die mannigfaltigen Möglichkeiten bei Übergang auf Windradantrieb (mit horizontaler und vertikaler Achse) soll an dieser Stelle jedoch nur hingewiesen werden. Im allgemeinen ist diese Art des Antriebes leistungsmäßig weit unterlegen, was in weniger starkem Maße auch für den Rotorantrieb gilt.

**1. b)  $\delta$ : Mittlere Anwendung auf verwandte technische Gebiete.** Hier handelt es sich weniger um die eigentliche Mechanik des Segelns (Segelmechanik) im engeren Sinne, deren Aufgabe es ist, den aus dem Zusammenwirken von an sich gegebenen Luft- und Wasserkräften resultierenden Antrieb des Fahrzeuges herzuweisen, sondern mehr um die eben genannten Grundlagen hierfür. Der Schiffkörper bei unsymmetrischer Anströmung ist auch ein Problem der Manövriereigenschaften des Schiffes. Entsprechend hat die Aerodynamik des Segels derart viele Parallelen zur Hydromechanik des Ruders, daß der gegenseitige Nutzen beider Aufgabenstellungen nahezu unumgänglich ist. Und wiederum besteht eine enge Beziehung zwischen der Mechanik der Wasser- und Luftkräfte am Segelschiff. In beiden Fällen handelt es sich um Körper sogenannten kleinen Seitenverhältnisses (Verhältnis von Tiefgangsquadrat zu Lateralfäche bzw. Segelhöhenquadrat zu Segelfläche), deren strömungsmechanische Eigenschaften sich in leider recht unbequemer Weise von denen z. B. eines Flugzeugflügels von großem Seitenverhältnis unterscheiden. Im Schiffbau und verwandten Gebieten nun ist die Zahl der Anwendungsfälle für die Strömungsmechanik der Körper von kleinem Seitenverhältnis bei unsymmetrischer Anströmung recht groß. Schlingerflossen und Kiele, auch Schornsteine und Scherbretter gehören z. B. hierzu. Es ergeben sich damit für die Grundlagen der Segelmechanik zahlreiche und unmittelbare Anwendungen von zum Teil ausgesprochener Aktualität. So sind z. B. auch aus den Vorarbeiten zu vorliegendem Bericht eine Reihe von Anregungen für Arbeiten auf dem Gebiete des Ruders und anderer schiffbaulicher Anwendungen der Strömungstechnik der kleinen Seitenverhältnisse hervorgegangen.

### 1. c) Allgemeine Charakterisierung des Segelantriebes im Vergleich zu anderen Antriebsarten

Der Antrieb von Fahrzeugen ist eines der für die allgemeine Entwicklung der Technik besonders anschaulichen Gebiete. Nimmt man die Entwicklung zu höheren Leistungen als Qualitätsmerkmal an, so scheinen sich auf den ersten Blick für den Segelantrieb kaum noch positive Aussichten zu ergeben. Diese Arbeit soll ja einen Beitrag leisten, diese Aussichten weniger nach Gefühl als nach nüchterner Betrachtung der physikalischen Zusammenhänge zu beurteilen. Die Möglichkeiten des Segelantriebes müssen also im Vergleich zu denen anderer Antriebsarten gesehen werden. Auf sehr allgemeiner Grundlage, die alle Details noch außer acht läßt, kann man aus dem Vergleich des Verlaufes vom Schub der Antriebsorgane über der Geschwindigkeit schon manche Schlüsse ziehen, besonders wenn man dazu die Charakteristik des Widerstandsverlaufes der verschiedenen Fahrzeugtypen in Betracht zieht.

In Bild 2 ist die Schubänderung mit der Fahrtgeschwindigkeit für ein Segelschiff bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Einfallswinkeln der resultierenden, relativen Luftgeschwindigkeit angegeben. Zum Vergleich entsprechende Kurven für einen Luftschrauben- und einen Luftstrahltriebwerksantrieb. Über die absolute Größe sagen die Kurven natürlich noch gar nichts aus, da es hierzu detaillierter Annahmen bedarf, die erst aus dem Ergebnis der folgenden Arbeit gewonnen werden können und die andererseits auch die Allgemeinheit der Darstellung wieder einschränken würden. Es zeigt sich aber schon aus diesem Bild, daß der Segelantrieb für einen gewissen Bereich sehr großer Luft-einfallswinkel eine prinzipielle Unterlegenheit und für gewisse kleine Winkel eine prinzipielle Überlegenheit über andere Antriebsarten zu besitzen scheint. Eine Leistungssteigerung mit Segelantrieb muß also bei solchen Fahrzeugen und Aufgaben am ehesten zu erwarten sein, die bei kleineren Einfallswinkeln zu segeln vermögen. Der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel der relativen Luftströmung und der Richtung des natürlichen Windes leitet dann zum anschließenden Kapitel über die kinematischen Grundlagen über. Hier sei zum Abschluß dieser Einführung nur noch in Erinnerung gebracht, daß auch beim Verlauf des Widerstandes über der Fahrtgeschwindigkeit prinzipielle Unterschiede bestehen. So zeigt das Schiff — reines Verdrängungsschiff bzw. mit Gleitflächen und mit Unterwassertragflächen ausgestattet — bei gegebenem Gewicht zunächst einen stärker als quadratischen Widerstandsanstieg, dem unter Ausbildung eines mehr oder weniger markanten Widerstandsmaximums ein gewisser Abfall folgt, der dann schließlich wieder zu einem leichten Anstieg führt. Beim hier an sich nicht weiter interessierenden Flugzeug ist es fast umgekehrt. Einem Abfall der Widerstandsbeizahl folgt erst in Schallnähe wieder ein Anstieg. Interessant aber ist das Verhalten beim Fahrzeug mit Kufe oder Rad. Hier ist der Widerstand bei gegebenem Gewicht nur wenig abhängig von der Geschwindigkeit und interessanterweise bei bester Ausführung sehr tief unter den besten Werten des Schiffes bei hoher Geschwindigkeit. Die Betrachtung von Schubverlauf und Widerstandsverlauf zusammenfassend, darf man also für Segelfahrzeuge auf Kufe oder Rad bei kleinem Luft-einfallswinkel am ehesten eine spezifische Leistungsmöglichkeit dieser Fahrzeuge erwarten. Es mag nicht nur zufällig sein, daß diese Fahrzeuge dem Typ des großen Frachtseglers, der der Konkurrenz des leistungsfähigeren Maschinenschiffes erlegen ist, genau entgegengesetzt ist. Bei einem weiteren Verfolgen der Zusammenhänge wird man so auf einen technischen Nachweis für das Verschwinden der einen und vielleicht für die Zukunftschancen des anderen Typs der Segelfahrzeuge stoßen können.

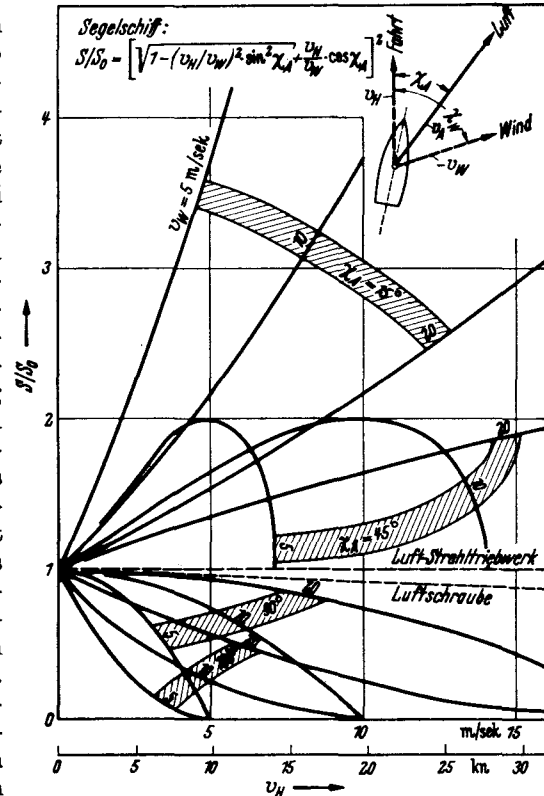


Bild 2. Schubänderung mit der Fahrtgeschwindigkeit.

## 2. Kinematische Grundlagen

### 2. a) Definitionen für Geschwindigkeiten und Winkel

Um der Unübersichtlichkeit vorzubeugen, sollen die notwendigen Definitionen für Richtungen, Geschwindigkeitskomponenten und Winkel in der Horizontalebene angegeben werden; sie bilden die Grundlage für die Aufstellung der kinematischen Beziehungen. Bewußt wird die Beschränkung auf die Horizontalebene vorgenommen. Bei dieser, der Übersichtlichkeit sehr dienlichen Vereinfachung werden also außer acht gelassen die Neigung des Wasserspiegels bei bewegter See und jegliche Neigung der Segeldrehachse (also im allgemeinen des Mastes) gegenüber der Horizontalebene. Die Fälle, bei denen diese Vereinfachungen unzulässige Beeinflussungen der Ergebnisse ergeben würden, gehen über das erste Ziel dieser Untersuchung hinaus. An den entsprechenden Stellen wird darauf eingegangen werden.

In Bild 3 und 4 sind Definitionsskizzen für Geschwindigkeiten und Winkel gegeben. Winkel ergeben sich zwischen den Geschwindigkeiten des Fahrzeuges auf Zielkurs  $v_Z$ , über Grund  $v_G$ , gegen Wasser  $v_H$ , gegen Wind  $-v_W$  und gegen Luft  $v_A$ , sowie der des Tidenstromes  $v_T$  mit der Längsachse des Lateralplans (Rumpf)  $x_L$ ; weitere Bezugsachsen sind für Segel  $x_S$ , für Flosse  $x_F$ , für Ruder  $x_R$ , für Mast  $x_M$ , für Stützwimmer  $x_{SI}$  und für Klappen (am Segel)  $x_K$ . Die Bezeichnungen für diese Winkel sind schematisch nach dem Anwendungszweck festgelegt (Bild 5). Alle vom Zielkurs abgesetzten Winkel sind mit  $\zeta$ , alle vom Kurs über Grund abgesetzten Winkel mit  $\gamma$ , und alle von der Fahrt gegen Wasser aus gezählten Winkel mit  $\chi$  bezeichnet. Der Index zeigt an, um welche der variablen

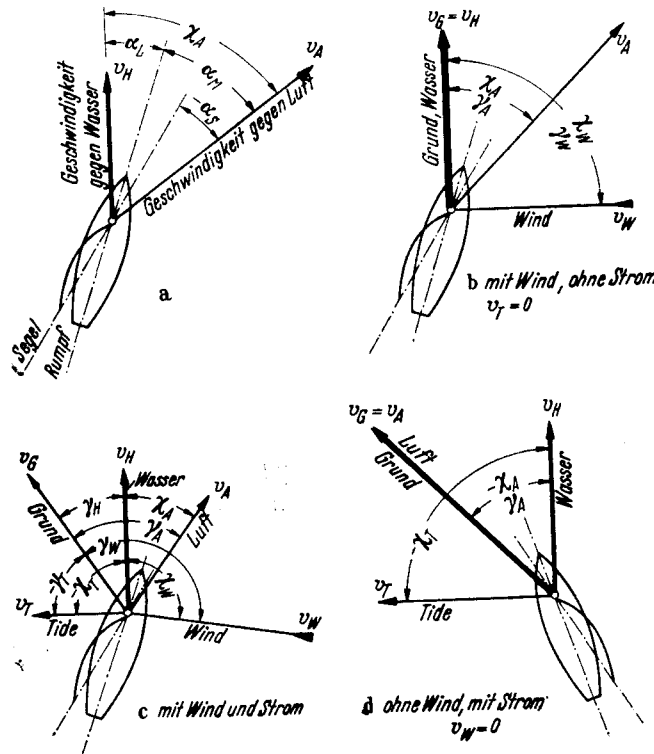


Bild 3. Geschwindigkeiten und Winkel.

festgelegt (Bild 5). Alle vom Zielkurs abgesetzten Winkel sind mit  $\zeta$ , alle vom Kurs über Grund abgesetzten Winkel mit  $\gamma$ , und alle von der Fahrt gegen Wasser aus gezählten Winkel mit  $\chi$  bezeichnet. Der Index zeigt an, um welche der variablen

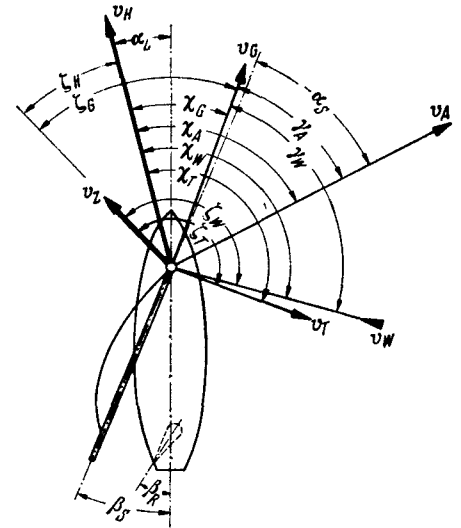


Bild 4. Geschwindigkeiten und Winkel beim Kreuzen vorm Wind mit Stromversetzung (Zielgeschwindigkeit  $v_Z$ ).

Winkel zwischen		Bezugsachsen				
		„Ziel“ $v_Z$	„Grund“ $v_G$	„Wasser“ $v_H$	„Luft“ $v_A$	„Lateral“ $x_L$
Variable Achsen	über „Grund“ $v_G$	$\zeta_G$	0	$\chi_G$	—	—
	gegen „Wasser“ $v_H$	$\zeta_H$	—	0	—	—
	gegen „Luft“ $v_A$	—	$\gamma_A$	$\chi_A$	0	—
	gegen „Wind“ $-v_W$	$\zeta_W$	$\gamma_W$	$\chi_W$	—	—
	„Tide“ $v_T$	$\zeta_T$	$\gamma_T$	$\chi_T$	—	—
	„Lateralplan“ $x_L$	—	—	$\alpha_L$	—	0
	„Flosse“ $x_F$	—	—	$\alpha_F$	—	$\beta_F$
	„Ruder“ $x_R$	—	—	$\alpha_R$	—	$\beta_R$
	„Segel“ $x_S$	—	—	—	$\alpha_S$	$\beta_S$
„Masten und Überwasserschiff“ $x_M$	—	—	—	$\alpha_M$	0	

Von oben gesehen zählen rechtsdrehende Winkel als positiv

Bild 5. Schema für die Bezeichnung der Winke zwischen Geschwindigkeiten und Längsachsen.

Achsen es sich dabei handelt. Weiter ist allgemein  $\alpha$  für die Bezeichnung eines Schräganströmwinkels bzw. Anstellwinkels oder Derivationswinkels und  $\beta$  für die Bezeichnung eines mechanischen Verstellwinkels eingeführt. Der Index zeigt an, auf welchen Teil des Segelschiffes sich die Schräganströmung bezieht bzw. welcher Teil verstellt worden ist. Die Symbolik der Indizes ist aus Bild 5 ersichtlich.

## 2. b) Grundgleichungen der Geschwindigkeitsdreiecke

**2. b)  $\alpha$ : Geschwindigkeitsdreieck für Segeln ohne Strom.** In diesem „Normalfall“ ist die „Grundgeschwindigkeit“  $v_G$  mit der „Wassergeschwindigkeit“  $v_H$  gleichzusetzen. So ist auch  $\zeta_H = \zeta_G$ , und die „Zielgeschwindigkeit“ ist also  $v_Z = v_H \cdot \cos \zeta_H$  (Bild 4). Aus dem unter dem Winkel  $\chi_W$  (in diesem Falle  $= \gamma_W$ ) zur Fahrtrichtung durch das Wasser  $v_H$  einkommenden natürlichen Wind  $v_W$  ergibt sich als resultierende Luftgeschwindigkeit  $v_A$ , die den Winkel  $\chi_A$  (hier  $= \gamma_A$ ) mit der Wassergeschwindigkeit bildet (vgl. Bild 3b).

Die einfachen Grundgleichungen für die geometrischen Beziehungen zwischen den drei Seiten und zwei Winkeln eines allgemeinen Dreiecks geben auch die Grundlage für unseren Normalfall ab. Sie lauten in der Bezeichnungsweise des Bildes 3b:

$$v_H = v_A \cdot \cos \chi_A - v_W \cdot \cos \chi_W. \quad (1)$$

$$v_W^2 = v_A^2 + v_H^2 - 2v_A \cdot v_H \cdot \cos \chi_A. \quad (2)$$

$$v_A^2 = v_W^2 + v_H^2 + 2v_W \cdot v_H \cdot \cos \chi_W. \quad (3)$$

$$\frac{v_W}{\sin \chi_A} = \frac{v_A}{\sin \chi_W} = \frac{v_H}{\sin(\chi_W - \chi_A)} \quad (4)$$

$$\sin(\chi_W - \chi_A) = \sin \chi_W \cdot \cos \chi_A - \cos \chi_W \cdot \sin \chi_A. \quad (5)$$

Nach Umformungen erhält man hieraus explizite Gleichungen für die drei Geschwindigkeitsverhältnisse  $v_H/v_W$ ,  $v_H/v_A$  und  $v_A/v_W$ , sowie für die beiden Winkel  $\chi_A$  und  $\chi_W$ .

Aus (4) und (5):

$$\frac{v_H}{v_W} = \sin \chi_W \cdot \cotg \chi_A - \cos \chi_W \quad (6)$$

aus (3):

$$\frac{v_W}{v_H} = \sqrt{\frac{v_A^2}{v_H^2} - \sin^2 \chi_W} - \cos \chi_W \quad (7)$$

aus (2):

$$\frac{v_W}{v_H} = \sqrt{\left(\frac{v_A}{v_H} - \cos \chi_A\right)^2 + \sin^2 \chi_A} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 - 2 \frac{v_A}{v_H} \cdot \cos \chi_A} \quad (8)$$

Weiterhin aus (4) und (5):

$$\frac{v_H}{v_A} = \cos \chi_A - \cotg \chi_W \cdot \sin \chi_A \quad (9)$$

aus (7):

$$\frac{v_A}{v_H} = \sqrt{\left(\frac{v_W}{v_H} + \cos \chi_W\right)^2 + \sin^2 \chi_W} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_W}{v_H}\right)^2 + 2 \frac{v_W}{v_H} \cdot \cos \chi_W} \quad (10)$$

aus (8):

$$\frac{v_A}{v_H} = \sqrt{\left(\frac{v_W}{v_H}\right)^2 - \sin^2 \chi_A} + \cos \chi_A. \quad (11)$$

Weiterhin aus (9):

$$\tg \chi_W = \frac{\sin \chi_A}{\cos \chi_A - v_H/v_A} \quad (12)$$

aus (7):

$$\cos \chi_W = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{v_A}{v_H}\right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{v_H}{v_W} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_W}{v_H} \quad (13)$$

aus (11) und (12):

$$\cotg \chi_W = \cotg \chi_A - \frac{1}{\sin \chi_A \left[ \cos \chi_A + \sqrt{\frac{v_W^2}{v_H^2} - \sin^2 \chi_A} \right]} \quad (14)$$

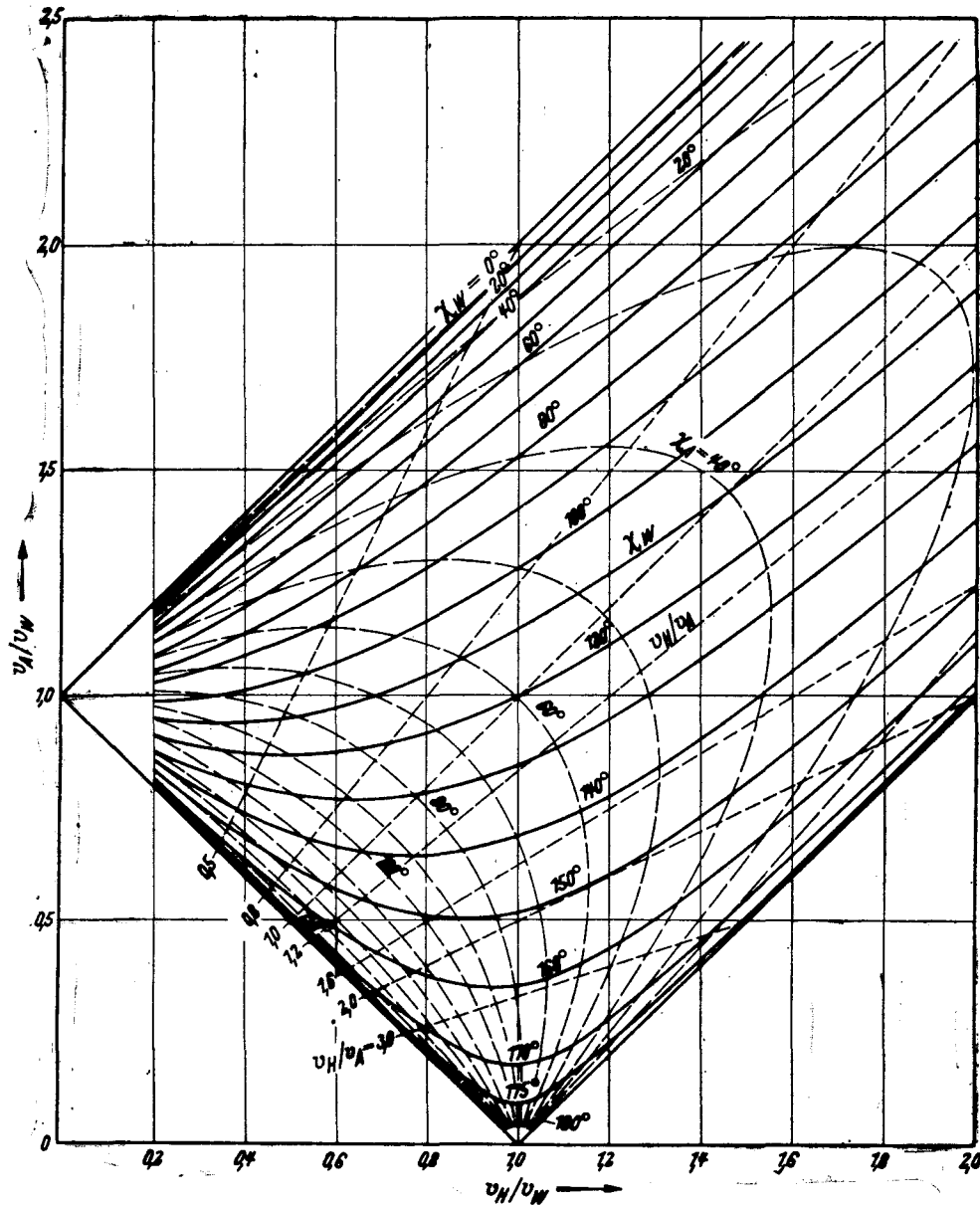


Bild 6. Kinematischer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeiten gegen Luft und Wasser.

Weiterhin aus (6):

$$\operatorname{tg} \chi_A = \frac{\sin \chi_W}{\cos \chi_W + v_H/v_W} \quad (15)$$

aus (3) und (8):

$$\cos \chi_A = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_W}{v_H} \right)^2 \right] \cdot \frac{v_H}{v_A} + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_A}{v_H} \quad (16)$$

aus (1) und (7):

$$\cos \chi_A = \frac{v_H}{v_A} \cdot \left[ \sin^2 \chi_W + \cos \chi_W \cdot \sqrt{\left( \frac{v_A}{v_H} \right)^2 - \sin^2 \chi_W} \right] \quad (17)$$

Weiterhin aus (4):

$$\frac{v_A}{v_W} = \sin \chi_W / \sin \chi_A \quad (18)$$

aus (2):

$$\frac{v_W}{v_A} = \sqrt{\left(\frac{v_H}{v_A} - \cos \chi_A\right)^2 + \sin^2 \chi_A} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_H}{v_A}\right)^2 - 2 \frac{v_H}{v_A} \cdot \cos \chi_A} \quad (19)$$

aus (3):

$$\frac{v_W}{v_A} = \sqrt{\left(\frac{v_H}{v_W} + \cos \chi_W\right)^2 + \sin^2 \chi_W} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_H}{v_W}\right)^2 + 2 \frac{v_H}{v_W} \cdot \cos \chi_W} \quad (20)$$

Eine grafische Darstellung sämtlicher Geschwindigkeitsverhältnisse und Winkel ist in Bild 6 gegeben, wo  $v_A/v_W$  über  $v_H/v_W$  dargestellt ist. Der für nicht zu schnelle Fahrzeuge wesentliche Teil eines solchen Diagramms ist darin erfaßt. Einen Überblick über den gesamten Winkel- und Geschwindigkeitsbereich soll Bild 7 vermitteln, in dem der Kurs gegen Luft  $\chi_A$  über dem Kurs gegen Wind  $\chi_W$  dargestellt ist. Wegen der Übersicht ist die Darstellung auf den Kurvenparameter „auf Wind bezogene Wassergeschwindigkeit“  $v_H/v_W$  beschränkt worden. Für diesen Zusammenhang ist auch das Rechengerät „Avionaut“ als Spezialrechenscheibe zu gebrauchen [2]. Dort ist zu setzen  $v_H$  für „Flugzeuggeschwindigkeit“,  $v_A$  für „Geschwindigkeit über Grund“,  $\chi_A$  für „Vorhaltewinkel“ und  $\chi_W$  für „Windeinfallwinkel“.

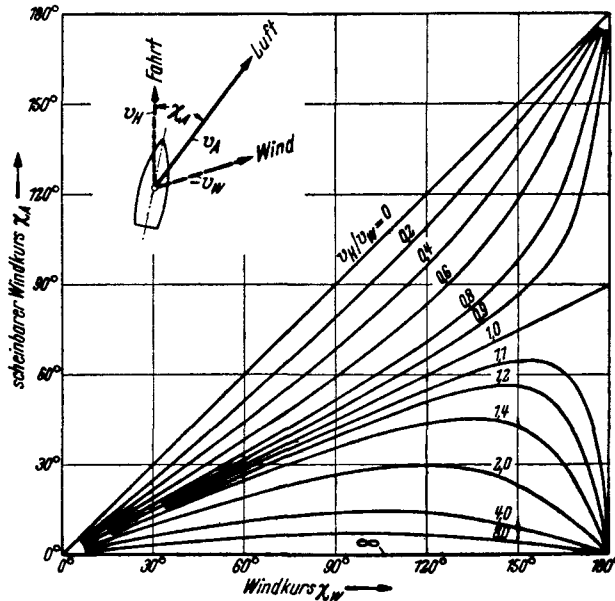


Bild 7. Kinematischer Zusammenhang zwischen Kurswinkeln gegen Luft und Wind.

**2. b)  $\beta$ : Geschwindigkeitsdreieck für Segeln mit Strom.** Diesen mehr allgemeinen Fall stellt Bild 3c dar. In Bild 4 sind alle Richtungen und Winkel zusammen dargestellt, und es ist dort auch die Zielgeschwindigkeit  $v_Z$  mit eingetragen. Die Zielgeschwindigkeit ist nun:

$$v_Z = v_H \cdot \cos \zeta_H = v_G \cdot \cos \zeta_G \quad (21)$$

Beziehungen zwischen  $v_H/v_T$ ,  $v_G/v_H$ ,  $v_T/v_G$ ,  $\chi_G$  und  $\chi_T$  werden mit (6) bis (20) ausgedrückt und in Bild 6 und 7 dargestellt, wenn dabei gesetzt wird:

$$\frac{v_H}{v_T} = \frac{v_H}{v_W} ; \quad \frac{v_G}{v_H} = \frac{v_A}{v_H} ; \quad \frac{v_T}{v_G} = \frac{v_W}{v_A} \quad (22)$$

$$\chi_G = \chi_A \quad \chi_T = \chi_W$$

Mit der so aus Tidengeschwindigkeit und Wassergeschwindigkeit gewonnenen Grundgeschwindigkeit geht man nun in das andere, von Grundgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Luftgeschwindigkeit gebildete Dreieck ein. Hier sind es die Beziehungen zwischen  $v_G/v_W$ ,  $v_A/v_G$ ,  $v_W/v_A$ ,  $\gamma_A$  und  $\gamma_W$ , die ebenfalls wieder auch durch (6) bis (20) ausgedrückt und in Bild 6 und 7 dargestellt werden können, wenn man setzt:

$$\frac{v_G}{v_W} = \frac{v_H}{v_W} ; \quad \frac{v_A}{v_G} = \frac{v_A}{v_H} \quad (23)$$

$$\gamma_A = \chi_A \quad \gamma_W = \chi_W$$

Der für die Zusammenfügung der Luft- und Wasserkräfte wichtige Winkel  $\chi_A$  ist nach Bild 3c:

$$\chi_A = \gamma_A + \chi_G \quad (24)$$

**2. b)  $\gamma$ : Geschwindigkeitsdreieck für Stromsegeln ohne Wind.** Dieser Fall entspricht genau dem Segeln mit Wind ohne Strom unter Vertauschung der Rollen von Luft und Wasser. Auf die praktische Anwendung wird später eingegangen werden. Der Fall ist in Bild 3d skizziert. Die Zielgeschwindigkeit ist wieder

$v_z = v_G \cdot \cos \zeta_G$ . Die Beziehungen zwischen  $v_H/v_T$ ,  $v_G/v_H = v_A/v_H$ ,  $v_T/v_G = v_T/v_H$ ,  $\chi_G = \chi_A$  und  $\chi_T$  können wieder mit (6) bis (20) ausgedrückt und mit Bild 6 und 7 dargestellt werden, wenn die Substitution (22) gebraucht wird.

### 2. c) Kinematisch bedingte Geschwindigkeitsgrenzen beim Segeln

Es ist eine Eigentümlichkeit des Segelantriebes, daß die erzielbaren Geschwindigkeiten — ganz abgesehen von der Güte von Segel und Rumpf — bereits rein kinematisch durch einen wohldefinierbaren Höchstwert begrenzt sind. Diese Grenzwerte sind anschaulich recht nützliche Vergleichswerte für die später zu behandelnden, unter idealen oder realen technischen Bedingungen erreichbaren Geschwindigkeiten.

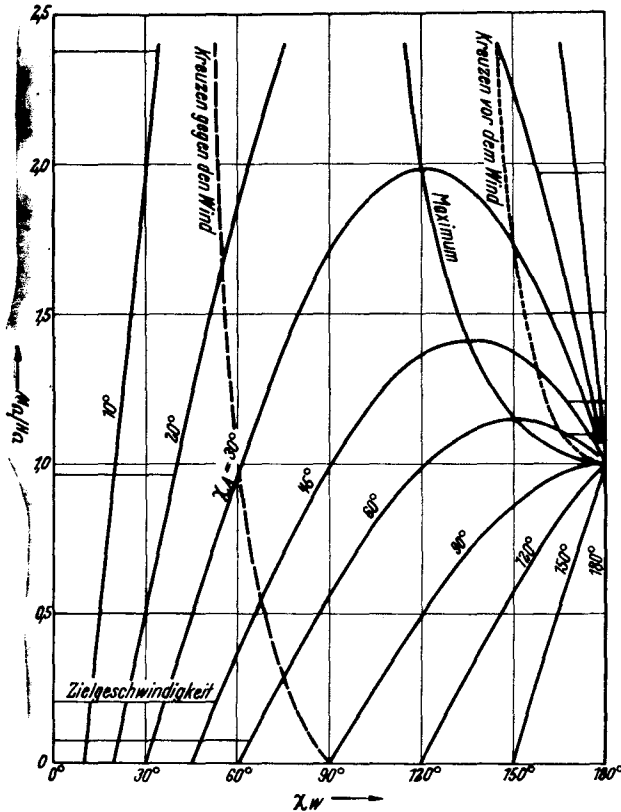


Bild 8. Kinematisch bedingte Geschwindigkeitsgrenzen für das Segeln ohne Strom.;

### 2. c) a: Geschwindigkeitsgrenzen für Segeln ohne Strom.

Eine sehr einfache Überlegung zeigt, daß beim Segeln ohne Strom vor dem Wind, also mit  $\chi_W = 180^\circ$ , die Geschwindigkeit des Segelschiffes durch das Wasser  $v_H$  niemals größer als die Windgeschwindigkeit  $v_W$  selbst werden kann. Dies zeigt formal auch die Gl. (6), wenn man darin  $\chi_W = 180^\circ$  einsetzt. Daß bei anderen Kursen zum Wind  $v_H$  auch größer als  $v_W$  werden kann — im Einklang mit entsprechenden Beobachtungen in der Praxis —, ist z. B. aus Bild 7 sofort zu erkennen. Die Kurven  $\chi_A$  ( $\chi_W$ ) tragen die Parameterbezeichnungen  $v_H/v_W$  von Null bis Unendlich. Es ist also auf jedem Windkurs, der nur kleiner als  $180^\circ$  zu sein braucht, das Erreichen einer unendlich großen Fahrtgeschwindigkeit kinematisch durchaus möglich. Allerdings muß dann stets mit einem Luftwinkel  $\chi_A$  von  $0^\circ$  gefahren werden. Je größer jedoch  $\chi_A$  wird, desto geringer wird die kinematisch erzielbare Geschwindigkeit werden, und zwar in dem Maße, wie dies die Beziehung (6) recht einfach ausdrückt. Bild 8 zeigt anschaulich das Ergebnis. Für  $\chi_A < 90^\circ$  zeigt der Verlauf  $v_H/v_W$  über  $\chi_W$  auch ein klares Maximum. Aus Differenziation von z. B. Gl. (6) erhält man für die Lage dieses Maximums den Windwinkel:

$$\operatorname{tg} \chi_W = -\operatorname{cotg} \chi_A; \quad \chi_W = \chi_A + 90^\circ \quad (25)$$

und für die Höhe des Maximums (dargestellt in Bild 9):

$$v_H/v_W = 1/\sin \chi_A. \quad (26)$$

Beide Beziehungen sind bereits von v. Schulmann [71] angegeben worden. Der in Bild 8 als Kurvenparameter angegebene Luftwinkel  $\chi_A$  hat eine dynamisch recht anschauliche Bedeutung. Nach Abschnitt 3 besteht für ihn die Beziehung:

$$\operatorname{tg} \chi_A \geq W_A/Q_A. \quad (27)$$

Dabei sind  $W_A$  und  $Q_A$  Widerstand und Querkraft von Takelage und gesamtem Überwasserschiff bezogen auf die Luftgeschwindigkeit  $v_A$ . Das Gleichheitszeichen in Gl. (27) gilt dann, wenn außer dem gesamten Luftwiderstand  $W_A$  sonst keinerlei Widerstand, also auch kein Wasserwiderstand, auftritt.

In Bild 8 ist auch deutlich, daß der kleinste Kurs zum Wind  $\chi_W$ , der überhaupt direkt eingehalten — angelegen — werden kann, gerade gleich dem Winkel gegen Luft  $\chi_A$  ist. Das höchste Anliegen am Wind ist also auch durch Gl. (27) bereits bedingt. Will man ein Ziel erreichen, das genau entgegen der Richtung des Windes liegt oder bildet die Zielrichtung  $\chi_Z$  mit der Windrichtung einen Winkel, der

kleiner als der Winkel  $\chi_W$  für höchstes Anliegen ist, so muß man kreuzen (vgl. Bild 10). Auch bei Winkeln  $\chi_W$ , die nur wenig größer als der Winkel für höchstes Anliegen sind, und ebenso vorm Wind lohnt sich das Kreuzen gegenüber dem direkten Anliegen. Bei symmetrischem Kreuzen — dieser Fall soll allein hier betrachtet werden — wird auf jedem Bug der gleiche Winkel zum Wind angelegen (vgl. hierzu die Skizze von Bild 10). Die so erreichbare Zielgeschwindigkeit beträgt dann:

$$\frac{V_Z}{V_W} = \frac{V_H}{V_W} \cdot \cos \chi_W. \quad (28)$$

Führt man hier nach Gl. (6)  $v_H/v_W$  ein, so erhält man die Zielgeschwindigkeit abhängig von  $\chi_A$  und dem Windkurs  $\chi_W$ , mit dem man kreuzt.

$$\frac{V_Z}{V_W} = \cotg \chi_A \cdot \sin \chi_W \cdot \cos \chi_W - \cos^2 \chi_W \quad (29)$$

Um den Maximalwert für die Zielgeschwindigkeit zu erreichen, sucht man die Nullstelle für die erste Ableitung von Gl. (29) nach  $\chi_W$  und erhält dafür:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \chi_{Wk} &= \operatorname{tg} \chi_A \pm \frac{1}{\cos \chi_A}; \\ \chi_{Wk} &= 90^\circ \mp 45^\circ + \chi_A/2. \end{aligned} \quad (30)$$

Auch diese Beziehung ist von v. Schulmann in [71] angegeben worden. Das obere Vorzeichen gilt für Kreuzen gegen den Wind, das untere für Kreuzen vorm Wind. In Bild 8 sind die entsprechenden Winkel als  $\chi_{Wk}$  markiert.

Im Hinblick auf die aus einfachen kinematischen Zusammenhängen abgeleiteten Ergebnisse in den Bildern 8 und 9 und den zugehörigen Formeln darf man wohl gewisse Erwartungen an die Leistungsmöglichkeiten eines Segelantriebes stellen. Bei Vernachlässigung eines Wasser- bzw. Rad- oder Kufenwiderstandes und bei einem technisch durchaus erreichbaren Widerstand der Takelage kann man mit einem Winkel von etwa  $10^\circ$  gegen Luft segeln und dabei eine Fahrt durchs Wasser von etwa fünfmal der Windgeschwindigkeit erzielen. Der Wind selbst fällt dabei etwa  $10^\circ$  achterlicher als dwars ein. Bei gleichen Bedingungen sonst kann man mit fast der halben Geschwindigkeit gegen den Wind aufkreuzen und sogar mit etwa 75% der Geschwindigkeit vom Wind wegkreuzen. Also im ungünstigsten Falle der gewählten Zielrichtung betrüge die Zielgeschwindigkeit eines solchen gedachten Fahrzeuges noch immer etwa das Zweieinhalbfache der Windgeschwindigkeit. Weiter zeigen Bild 6 und Bild 2,

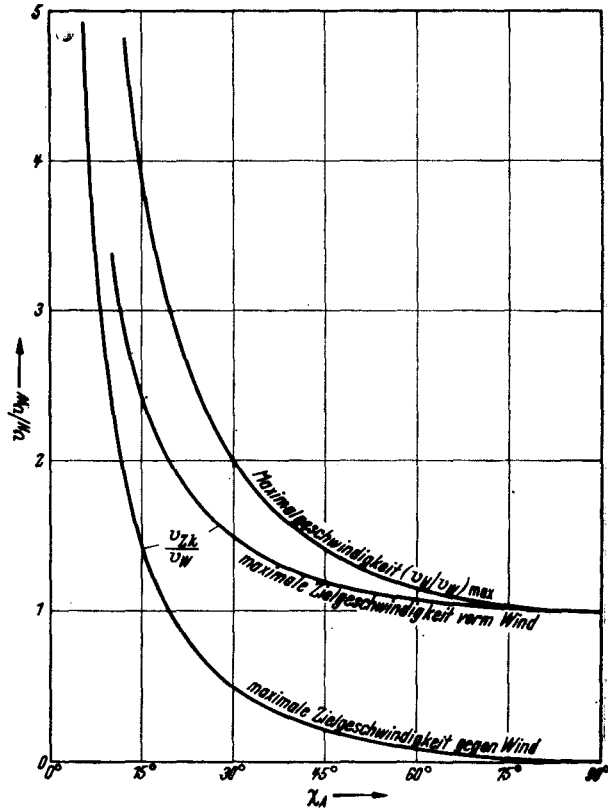


Bild 9. Kinematisch bedingte maximale Geschwindigkeit bei günstigem Anliegen und auf Zielstrecke gegen und vor dem Wind bei optimalem Kreuzen (vgl. Bild 10).

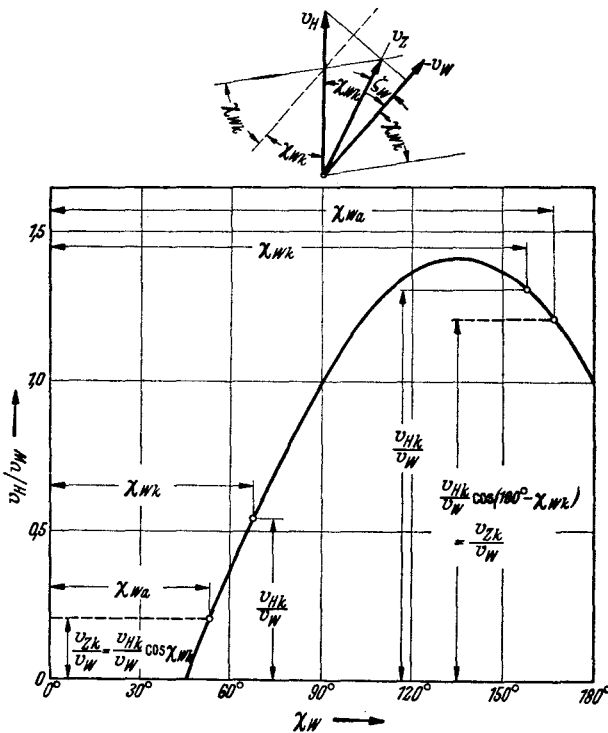


Bild 10. Kreuzen bei symmetrischer Segelstellung.

daß bei derartigen Kursen die Luftgeschwindigkeit linear und damit der Segelschub quadratisch mit der Fahrtgeschwindigkeit zunehmen. Also auch bei dem später zu behandelnden Einfluß eines reellen Wasserwiderstandes darf man noch gute Aussichten für schnelle Segelfahrzeuge erwarten.

**2.c)  $\beta$ : Geschwindigkeitsgrenzen für Segeln mit Strom.** Prinzipiell in der gleichen Weise wie beim vorhergehenden Abschnitt — numerisch jedoch etwas umständlicher —, kann gezeigt werden, welche Geschwindigkeiten über Grund  $v_G$ , bei gegebenen Geschwindigkeiten von Wind  $v_W$  und Strom oder Tide  $v_T$  und den Winkeln zwischen diesen,  $\gamma_W$  und  $\gamma_T$  (vgl. Bild 3c), je nach dem anzuliegenden Winkel zum Luftstrom  $\chi_A$  kinematisch äußerst erreichbar sind.

Nach Bild 5 und 3c ist  $\gamma_A$  der Winkel zwischen Fahrtrichtung über Grund und Luftstromrichtung. Hierfür gilt analog Gl. (15):

$$\operatorname{tg} \gamma_A = \frac{\sin \gamma_W}{\cos \gamma_W + v_G/v_W}. \quad (31)$$

Für den Winkel  $\chi_T$  zwischen Fahrtrichtung durchs Wasser und der Stromrichtung erhält man analog Gl. (12):

$$\operatorname{tg} \chi_T = \frac{\sin \gamma_T}{\cos \gamma_T - \frac{v_T/v_W}{v_G/v_W}}. \quad (32)$$

Führt man beide Winkel in Gl. (24) ein, so erhält man Gl. (33):

$$\gamma_T + \chi_A = \gamma_A + \chi_T. \quad (33)$$

Damit ist in impliziter Form das gesuchte  $v_G/v_W$  als Funktion von  $\gamma_W$ ,  $\chi_A$ ,  $\gamma_T$  und  $v_T/v_W$  festgelegt, wenn man Gl. (31) bis Gl. (33) etwa in Form von Gl. (34) kombiniert.

$$\operatorname{tg} (\gamma_T + \gamma_A) = \frac{\frac{\sin \gamma_T}{\cos \gamma_T - v_T/v_G} + \frac{\sin \gamma_W}{\cos \gamma_W + v_G/v_W}}{1 - \frac{\sin \gamma_T \cdot \sin \gamma_W}{\cos \gamma_W \left( \cos \gamma_T - \frac{v_T}{v_G} \right) + \frac{v_G}{v_W} \cos \gamma_T - \frac{v_T}{v_W}}}. \quad (34)$$

Für beliebige Gegebenheiten kann der Winkel  $\chi_A$ , der nach Gl. (27) ja etwa als Repräsentant der dynamischen Güte des Segelfahrzeuges angesehen werden darf, mit Gl. (34) bestimmt werden. Man kann nach Art der Bilder 6 oder 7 eine ganze Serie von Geschwindigkeits-Winkel-Schaubildern für verschiedene Stromgeschwindigkeiten und Richtungen aufstellen. Es soll hier jedoch genügen, den Einfluß von Strom bei Wind mit einer kurzen Betrachtung über die Art der Veränderungen gegenüber dem Normalzustand „Wind ohne Strom“ abzuschließen.

Bild 3c wie auch Bild 4 zeigen ja schon rein anschaulich, daß durch einen Strom, der sogar unter recht erheblichem Winkel  $\gamma_T$  zur gewünschten Fahrtrichtung über Grund  $v_G$  stehen kann, die Antriebsverhältnisse in doppelter Hinsicht verbessert werden. Bei einem größeren Winkel  $\chi_A$ , also schon geringerer dynamischer Güte, und geringerer Fahrt durchs Wasser  $v_H$ , die also weniger Vortriebsleistung erfordert, wird eine bestimmte Geschwindigkeit über Grund  $v_G$  erzielt werden können. Die in Bild 8 und 9 gezeigten Geschwindigkeitsgrenzen können also für Segeln mit Strom noch heraufgesetzt werden. Für einen beliebigen Fall kann das mit Hilfe der Formeln (35) und (36) angegeben werden.

Hat man also ohne Strom durchs Wasser eine Fahrtgeschwindigkeit  $v_{H0}$  bei einem Winkel gegen Luft  $\chi_{A0}$  erzielen können, so kann man bei Vorhandensein eines unter  $\gamma_T$  zum Kurs über Grund laufenden Stromes  $v_T$  die gleiche Geschwindigkeit über Grund erreichen. Also  $v_G = v_{H0}$ . Man braucht dazu als Winkel gegen Luft:

$$\chi_A = \chi_{A0} - \gamma_T + \operatorname{arc} \operatorname{cotg} \left( \operatorname{cotg} \gamma_T - \frac{v_T/v_G}{\sin \gamma_T} \right) \quad (35)$$

und hat dabei eine Geschwindigkeit durch das Wasser von

$$\frac{v_H}{v_G} = \sin \gamma_T \sqrt{1 + \left( \operatorname{cotg}^2 \gamma_T - \frac{v_T/v_G}{\sin \gamma_T} \right)}. \quad (36)$$

**2.c)  $\gamma$ : Geschwindigkeitsgrenzen für Stromsegeln ohne Wind.** Die Darstellung der Möglichkeiten des Segelantriebes wäre unvollständig ohne Hinweis auf das im ersten Augenblick vielleicht etwas überraschend klingende „Segeln ohne Wind“. Wenn man als Segeln — in Verallgemeinerung des Begriffes — die willkürliche Fortbewegung eines Körpers unter direkter Ausnutzung von Strömungsenergie der Natur

mit Hilfe von Quertriebskörpern definieren will, so schließt der Begriff außer dem „normalen“ Segeln auch das von Segelflugzeugen, Vögeln, Segelfischen ebenso wie das Stromsegeln ohne Wind ein. Die primitivste Form des Stromsegelns ist recht wirkungsvoll in der Seilfahre verwirklicht. Bei gepflegten Seilrollen ist die Seilfahre übrigens dynamisch weit günstiger als ein im Strom ohne Wind segelndes Segelschiff und stellt in dieser Hinsicht eine gewisse Parallele zum Segelwagen bzw. zur Eisjacht dar.

Bild 3d zeigt Geschwindigkeiten und Winkel beim Stromsegeln. Nach dem in 2. b)  $\gamma$ : bereits Ausgeführten vertritt die Stromgeschwindigkeit  $v_T$  die Stelle der Windgeschwindigkeit, und die Geschwindigkeit gegen Luft  $v_A$  ist natürlich gleich der über Grund  $v_G$ . Die für die Fahrtleistung interessierende Geschwindigkeit ist also jetzt nicht mehr  $v_H$ , sondern  $v_A = v_G$ . Aus Gl. (4) kann man für die erzielbare Geschwindigkeit über Grund  $v_G$ , abhängig von dem die kinematische Güte vertretenden Winkel gegen Luft  $\chi_A$  und dem Winkel zwischen Fahrt über Grund und Stromrichtung  $\gamma_T$  folgendes angeben:

$$\frac{v_G}{v_T} = \cos \gamma_T + \cotg \chi_A \cdot \sin \gamma_T. \quad (37)$$

Differenziert man Gl. (37), um die maximale erzielbare Geschwindigkeit über Grund abhängig von  $\chi_A$  zu ermitteln, so erhält man schließlich in Gl. (38) ein der Formel Gl. (26) genau entsprechendes Ergebnis.

$$\left( \frac{v_G}{v_T} \right)_{\max} = \frac{1}{\sin \chi_A}. \quad (38)$$

Damit gilt also auch die in Bild 9 angegebene Kurve für die erzielbaren Maximalgeschwindigkeiten mit  $v_H/v_W = v_G/v_T$  auch für das Stromsegeln ohne Wind. Bei der Beurteilung der Leistungsmöglichkeiten beim Stromsegeln ohne Wind ist natürlich zu beachten, daß häufige Stromgeschwindigkeiten nur kaum  $\frac{1}{4}$  der häufigen Windgeschwindigkeiten betragen, daß also selbst bei mit der Takelage vergleichbarer, hydrodynamischer Güte des Unterwasserschiffes, nur auch etwa  $\frac{1}{4}$  der beim Segeln ohne Strom erzielbaren absoluten Geschwindigkeit erwartet werden darf.

### 3. Allgemeine dynamische Beziehungen

Die allgemeinen dynamischen Beziehungen zur Mechanik des Segelantriebes stellen die Kopplung zwischen Luft- und Wasserkraften dar. Ihre Behandlung gehört also sinngemäß zwischen die Bereitstellung der kinematischen Grundlagen und die Herleitung der Strömungskräfte. Sie stellen aber andererseits bereits auch schon einen gewissen Abschluß bei der Beurteilung der Leistungsmöglichkeiten von Segelschiffen dar, da man mit ihnen unter gewissen Vereinfachungen im Ansatz der Wasser- und Luftkräfte bereits gewisse Leistungsgrenzen erkennen kann. Darum soll dieser Abschnitt unter dem Gesichtspunkt verschiedener solcher Vereinfachungsmöglichkeiten behandelt werden. Für praktische Spezialfälle verlieren solche Vereinfachungen schon fast den suspekten Charakter grober Näherungen und stellen im Gegenteil recht gute Näherungen dar. Natürlich muß man sich da vor Verallgemeinerungen hüten. Folgende Vereinfachungen können aber einen gewissen praktischen Sinn haben und zur schnellen Gewinnung von Ergebnissen nützlich sein: die Vernachlässigung des Luftwiderstandes  $W_A$  insgesamt, die Annahme eines konstanten Verhältnisses von Luftwiderstand zu Luftquerkraft  $W_A/Q_A$ , die Vernachlässigung des Wasserwiderstandes  $W_H$  insgesamt, die des Wassergeradeauswiderstandes  $W_{H0}$  und wahlweise auch des infolge Querkraft zusätzlich entstehenden Wasserwiderstandes  $W_{HQ}$ , die Annahme eines konstanten Verhältnisses von Wasserquerkraftwiderstand zu Wasserquerkraft  $W_{HQ}/Q_H$ . Schließlich lassen sich allein aus allgemein dynamischen Überlegungen schon gewisse Gesichtspunkte für die Wahl der optimalen Segelstellung — und auch der Schwertzuordnung — gewinnen, die dann später in Abschnitt 7 gebraucht werden müssen.

#### 3. a) Vortrieb, Querkraft und Stabilität

Auch ohne genauere Kenntnis der an Takelage und Rumpf des Segelfahrzeuges wirkenden Luft- und Wasser- bzw. Reibungskräfte, allein auf Grund der dynamischen Beziehungen zwischen diesen Kräften, können aufschlußreiche Aussagen zur Mechanik des Segelantriebes gemacht werden. Außerdem sind diese Beziehungen maßgebend für die Form, in der dann weiter in den Abschnitten 4 bis 6 im einzelnen nachzuweisenden Kräfte zu formulieren sind, um in einfacher Weise zur Bestimmung der Fahrtleistung von Segelfahrzeugen angewendet werden zu können. Umgekehrt wird man bei der Formulierung der dynamischen Beziehungen auf die in den genannten Abschnitten wiedergegebenen Darstellungen der Kräfte schräg angeströmter Körper Rücksicht nehmen. Es mag hier genügen, davon folgendes festzuhalten:

Die resultierende Strömungskraft an einem beliebig schräg angeströmten Körper, die durch Größe, Angriffspunkt und Angriffsrichtung bestimmt ist, wird für die rechnerische Behandlung — bei Darstellung in einer Ebene — durch zwei zueinander senkrechte Kraftkomponenten an einem geometrisch definierten Bezugspunkt angreifend und ein um diesen Punkt wirkendes Moment ersetzt. Da diese Arbeit auf die Untersuchung von Leistungsmöglichkeiten spezialisiert ist, bedarf es keiner eingehenden Formulierungen dynamischer Stabilitäten, also auch nicht des Momentes der Strömungskräfte. Es verbleibt die Behandlung der beiden Kraftkomponenten, für die man grundsätzlich das System Körperlängsachse und Körperquerachse (mit „Tangentialkraft“ und „Normalkraft“) oder das System Strömungslängsachse und Strömungsquerachse (mit „Widerstand“ und „Querkraft“) wählen kann. Bei der Dynamik des Segelantriebes handelt es sich um das Zusammenwirken zweier solcher Systeme, nämlich Luftanströmung und Wasseranströmung oder Segel und Rumpf. Da die für beide Körperkräfte bestimmenden Anströmgeschwindigkeiten von Luft und Wasser,  $v_A$  und  $v_H$ , nach Größe und Richtung durch den zwischen ihnen definierten Kopplungswinkel  $\chi_A$  wesentlich bestimmt sind, umgekehrt aber  $\beta_S$ , der Kopplungswinkel zwischen dem Körper Rumpf und dem Körper Segel, die Ver-

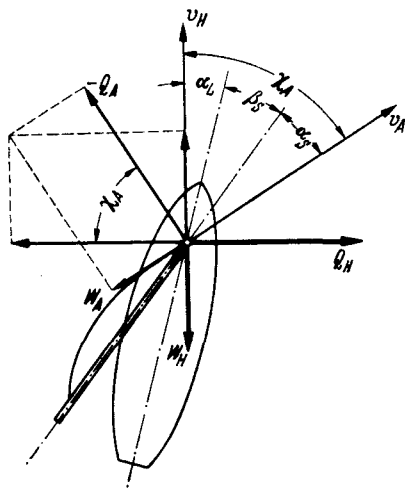


Bild 11.  
Zusammensetzung der Luft- und Wasserkräfte.

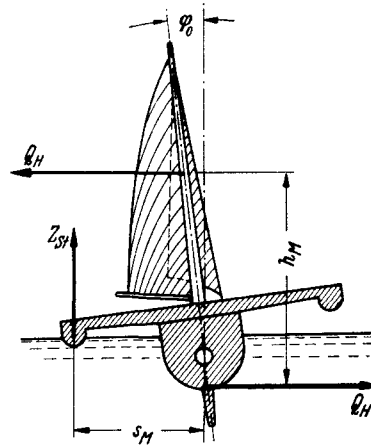


Bild 12. Entstehung und Ausgleich des Krängungsmoments infolge Querkraft.

wendung des Winkels  $\chi_A$  für die Aufstellung der dynamischen Beziehungen keineswegs entbehrlich macht, ist für die Segelmechanik das System mit Querkraft und Widerstand das geeignetere. Glücklicherweise ist es auch das für die Bestimmung der Strömungskräfte im einzelnen gebräuchlichere.

Die nun aufzustellenden dynamischen Beziehungen müssen die Kraftübertragung von Luft auf Wasser zu erfassen gestatten (Bild 11): die Luftquerkraft  $Q_A$  und der Luftwiderstand  $W_A$  liefern Kraftkomponenten senkrecht zur Richtung der Wasserströmung. Bei stationärem Bewegungszustand, der allein hier betrachtet werden soll, müssen diese mit der Wasserquerkraft  $Q_H$  im Gleichgewicht stehen. In Gl. (39) ist dies in dimensionsbehafteter und dimensionsloser Form ausgedrückt, wobei gemäß Bild 5 die Indizes „S“, „L“, „A“ und „H“ auf die Zugehörigkeit der Formelzeichen zu Segelfläche, Lateralfäche, Luftströmung bzw. Wasserströmung hinweisen sollen.

$$-Q_A \cdot \cos \chi_A + W_A \cdot \sin \chi_A = Q_H \quad (39)$$

$$(-c_{QA} \cos \chi_A + c_{WA} \sin \chi_A) = c_{QH} \cdot \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} \cdot \frac{F_L}{F_S}$$

Wegen der unterschiedlichen Höhe des Kraftangriffes von Wasserquerkraft und der mit ihr im Gleichgewicht stehenden Komponenten der Luftkraft (Bild 12) ist mit dem Auftreten einer Wasserquerkraft zugleich ein zusätzliches krängendes Moment verbunden, dem durch ein stützendes Gegenmoment  $M_{Si}$  das Gleichgewicht gehalten werden muß Gl. (40).

$$[(-Q_A \cdot \cos \chi_A + W_A \cdot \sin \chi_A) \cdot h_M = M_{Si} \quad (40)$$

$$Q_H \cdot h_M = M_{Si}.$$

Schließlich liefern Luftquerkraft und Luftwiderstand auch Kraftkomponenten in Richtung der Wasserströmung, die wiederum mit dem Wasserwiderstand im Gleichgewicht stehen müssen Gl. (41). Zweckmäßig wird dabei der Wasserwiderstand gleich in verschiedene Anteile aufgespalten Gl. (42).

$$\begin{aligned}
 -Q_A \cdot \sin \chi_A - W_A \cdot \cos \chi_A &= W_H \\
 (-c_{QA} \cdot \sin \chi_A - c_{WA} \cdot \cos \chi_A) &= c_{WH} \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} \cdot \frac{F_L}{F_S}
 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 W_H &= W_{H0} + W_{HQ} + W_{HSI} \\
 c_{WH} &= c_{WH0} + c_{WHQ} + c_{WHSI} .
 \end{aligned} \tag{42}$$

Der gesamte Wasserwiderstand  $W_H$  setzt sich zusammen aus dem Widerstand  $W_{H0}$ , den ein gleich großes und schnelles Wasserfahrzeug ohne Segelantrieb haben würde (also ohne Krängung und Schräganströmung infolge Segelkraft), aus dem Zusatzwiderstand  $W_{HQ}$ , der sich allein aus der wegen der Querkrafterzeugung notwendigen Schräganströmung  $\alpha_L$  zwangsläufig unmittelbar ergibt, und aus dem Widerstandszuwachs  $W_{HSI}$ , der sich mittelbar aus dem Auftreten der Wasserquerkraft durch das damit verbundene Krängungsmoment ergibt. Da es sich bei dieser Untersuchung darum handelt, zur Bestimmung äußerster Leistungsgrenzen die Bauelemente eines Segelfahrzeuges qualitativ und quantitativ zweckbedingt zu wählen, so wird man einem widerstandsgünstigen Normalrumpf zur Erzeugung der Querkraft entsprechende Bauteile, z. B. in Form einer Flosse (Schwert, Kiel) hinzufügen, und man wird zur Aufbringung der notwendigen zusätzlichen Stabilität spezielle Maßnahmen treffen. Solche Maßnahmen sind z. B. die Verbreiterung des Schiffes, die Anordnung von Ballast am Kiel, die Aufteilung des Rumpfes in einen Doppelkörper (Catamaran, Biscaph) oder Dreifachkörper (Trimaran, Triscaph) oder die Anordnung von einem oder zwei Auslegern mit Stützwimmern. Diese letzte Möglichkeit soll wegen der größten Klarheit in den damit verbundenen Auswirkungen auf den Zusatzwiderstand einerseits und die Stabilität andererseits für die Aufstellung der dynamischen Beziehungen hier zugrunde gelegt werden. Unter Vorwegnahme der zu Abschnitt 5 gehörenden Ausführungen kann gesagt werden, daß auch die anderen Methoden des Krängungsmomentenausgleiches zu ähnlichen Einflüssen auf den Widerstand führen. Die Verbreiterung ergibt bei sonst gleichen Abmessungen eine bei kleineren Geschwindigkeiten manchmal günstige, sonst aber meist ungünstige Widerstandsänderung. Sie ist bei kleinen Geschwindigkeiten sicher das beste und bei großen Geschwindigkeiten sicher das schlechteste Verfahren. Ähnlich liegt der Fall bei der Anordnung von Ballast. Die anderen Arten haben ihren Vorteil bei großen Geschwindigkeiten. Ein besonderer Vorteil der Stützwimmer besteht darin, daß sie — besonders für Rekordzwecke — durch Ballast während der Fahrt auf beiden Seiten zum Austauschen gebracht werden können. Dann wird also  $W_{HSI}$  zu Null, was zweifellos ein Optimum darstellt und in diesem Sinne benutzt werden soll. Für den „ungetrimmten“ Normalfall soll für den Widerstand des belasteten und eingetauchten Stützwimmers gesetzt werden

$$W_{HSI} = \varepsilon_{SI} \cdot |Z_{SI}| .$$

Dann erhält man mit Gl. (40) für seinen Widerstand nach Bild 12 schließlich:

$$\begin{aligned}
 W_{HSI} &= \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} \cdot |Q_{H_i}'| \\
 c_{WHSI} &= \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} \cdot |c_{QH}| .
 \end{aligned} \tag{43}$$

Dabei ist  $\varepsilon_{SI}$  die „Gleitzahl“ des Stützwimmers oder eben einer anderen stabilisierenden Maßnahme, die durch einen Stützwimmer repräsentiert werden kann. Dieses  $\varepsilon_{SI}$  ist in grober Näherung bei einer prinzipiellen Form eine Konstante, in Wirklichkeit ist es etwas von der Geschwindigkeit und der Auftriebsbelastung  $Z_{SI}$  abhängig. Auf jeden Fall ist es sehr bequem zur Aufstellung der dynamischen Beziehungen ohne Kenntnis der Kräfte im einzelnen. Das gleiche kann man auch für den Wasserwiderstand unmittelbar infolge Querkraft tun. Die Beizahl  $c_{WHQ}$  kann man mit einer „Gleitzahl“  $\varepsilon_{QH}$  nach Gl. (44) ansetzen.

$$c_{WHQ} = \varepsilon_{QH} \cdot |c_{QH}| . \tag{44}$$

Und ebenso kann auch der Widerstand (bzw. die Beizahl) der Besegelung mit einem  $\varepsilon_A$  nach Gl. (45) erfaßt werden.

$$c_{WA} = \varepsilon_A \cdot c_{QA} . \tag{45}$$

Die obengenannte Abhängigkeit dieser „groben Konstanten“  $\varepsilon$  von  $c_{QH}$  bzw.  $c_{QA}$  wird sich dann bei der mehr ins Detail gehenden Untersuchung in Abschnitt 5 bzw. 4 erweisen. Nun kann man die Gleichungen (39) und (41) bis (45) kombinieren:

$$\begin{aligned} -c_{QA} \cdot \sin \chi_A - c_{WA} \cdot \cos \chi_A &= \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} \cdot \frac{F_L}{F_S} \left[ c_{WH0} + \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot |c_{QH}| \right] \\ &= \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} \cdot \frac{F_L}{F_S} \cdot c_{WH0} + \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot | -c_{QA} \cdot \cos \chi_A + c_{WA} \cdot \sin \chi_A |. \end{aligned}$$

Damit erhält man unter Einführung der Definition Gl. (46):

$$f = \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{F_L}{F_S} \cdot c_{WH0} = \frac{W_{H0}}{\varrho_A/2 \cdot v_H^2 \cdot F_S} \quad (46)$$

die Beziehung für den effektiven Vortrieb des Segelfahrzeuges Gl. (47).

$$f \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} = -c_{QA} \cdot \sin \chi_A - c_{WA} \cdot \cos \chi_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) | -c_{QA} \cdot \cos \chi_A + c_{WA} \cdot \sin \chi_A |. \quad (47)$$

Unter Einführung von (45) wird daraus die Beziehung (48).

$$f \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} = -c_{QA} \left[ \sin \chi_A - \varepsilon_A \cdot \cos \chi_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) | \cos \chi_A + \varepsilon_A \cdot \sin \chi_A | \right]. \quad (48)$$

In Gl. (47) bzw. (48) ist die allgemeine dynamische Beziehung gegeben, die es gestattet, mit beliebiger Verfeinerung ebenso wie mit größten Vereinfachungen die Wirkung der Segelkraft zum Antrieb des Fahrzeuges zu verfolgen. In  $f$  ist der normale Schiffswiderstand, der „Geradeauswiderstand“, und die Bemessung von Segelfläche und Lateralfäche enthalten. Die Qualität der Takelage ist in  $c_{QA}$  und  $c_{WA}$  bzw.  $\varepsilon_A$ , die der Quertriebsorgane des Rumpfes (Flossen, Kiel, Schwert, Ruder) ist in  $\varepsilon_{QH}$  und die der Stabilitätsorgane in  $\varepsilon_{SI}$  repräsentiert. In  $h_M/s_M$  drückt sich Höhe der Takelage und Breite des „Schwimmswerkes“ aus. Der kinematische Zusammenhang zwischen  $v_H/v_A$  und dem Fahrtwinkel gegen Luft  $\chi_A$  ist mit dem Fahrtwinkel gegen den natürlichen Wind  $\chi_W$  durch Gl. (9) und mit der Windgeschwindigkeit  $v_W$  durch Gl. (11) festgelegt.

### 3. b) Segeln ohne Luftwiderstand

**3. b)  $\alpha$ : Segeln ohne Luft- und Wasser-Querkraft-Widerstand.** Nachdem in Abschnitt 2 allein aus kinematischen Betrachtungen heraus gewisse ideale Geschwindigkeitsgrenzen festgestellt worden sind, die für ein Segelfahrzeug ohne Wasserwiderstand und im Grenzfall für ein Fahrzeug ohne jeglichen Widerstand überhaupt gelten, sollen nun schrittweise reale Bedingungen untersucht werden. Läßt man also hier in Gl. (47), (48)

$$c_{WA} = \varepsilon_{QA} = \varepsilon_{SI} = \varepsilon_{QH} = 0$$

werden, so erhält man

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{v_A^2}{v_H^2} \cdot \sin \chi_A. \quad (49)$$

Mit Gl. (10) und (18) gewinnt man daraus nach einigen Umformungen:

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{v_W}{v_H} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{v_W}{v_H} \cdot \cos \chi_W + \frac{v_W^2}{v_H^2} \cdot \sin \chi_W}. \quad (50)$$

Eine explizite Darstellung der gesuchten Fahrtgeschwindigkeit im Verhältnis  $v_H/v_W$  wäre also hier nicht sinnvoll. Man wird also bereits unter den hier sehr vereinfachten Voraussetzungen des Segelantriebes schon den gleichen Weg wie bei der Behandlung normaler Schiffsantriebe gehen müssen. Für gewisse vorgegebene Geschwindigkeiten und Kurswinkel zum Wind kann der zur Überwindung des Wasserwiderstandes zur Verfügung bleibende Vortrieb der Besegelung in Form von  $f$  bestimmt werden. Umgekehrt kann man getrennt davon den bei vorgegebenen Fahrtgeschwindigkeiten sich ergebenden Wasserwiderstand wieder in Form von  $f$  bestimmen. Aus dem Vergleich der beiden Ergebnisse, im Einzelfall als Schnittpunkt zweier Kurven eines Diagramms, ergibt sich dann die bei gegebenen Werten von Takelage und Rumpf erzielbare Fahrtgeschwindigkeit durch das Wasser. Die Berücksichtigung von Tidenstrom kann in der unter Abschnitt 2 angegebenen Weise erfolgen.

In Bild 13 ist entsprechend Gl. (50) zur Überwindung des Wasserwiderstandes  $W_{H0}$  die notwendige Vortriebskraft über der Fahrtgeschwindigkeit für verschiedene Kurse zum Wind dargestellt. Das in Gl. (46) definierte  $f$  ist dabei noch durch die Luftquerkraftbeizahl  $-c_{QA}$  dividiert. Das Minuszeichen ergibt sich nur aus der Definition der Winkel; bei positivem  $\chi_W$  segelt man mit positivem  $\alpha_L$  und negativem  $\alpha_S$ , woraus dann auch ein negatives  $c_{QA}$  folgt. Bemerkenswert an Bild 13 ist, daß bei  $\chi_W = 180^\circ$ , also platt vorm Wind, sich überhaupt kein Vortrieb ergibt und also auch keine Fahrtgeschwindigkeit erzielt werden kann. Dies liegt natürlich daran, daß bei dem Ansatz Gl. (50) der Luft-

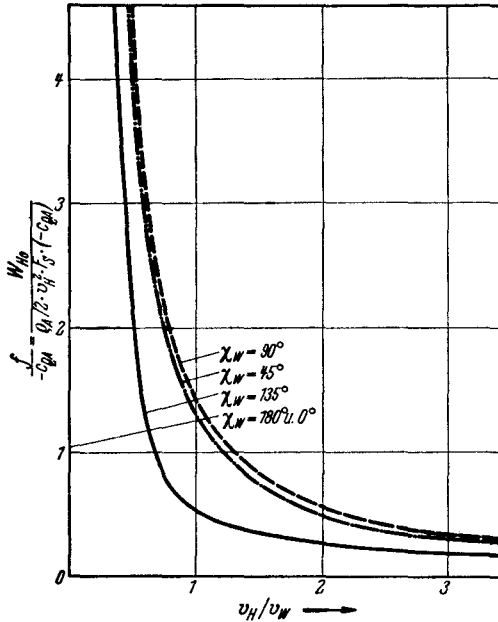


Bild 13. Wirksamer Segelvortrieb ohne Luftwiderstand.

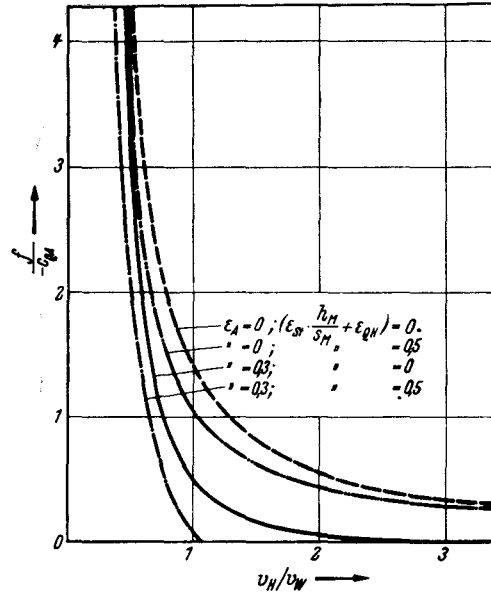


Bild 14. Wirksamer Segelvortrieb bei  $\chi_W = 90^\circ$  unter verschiedenen Bedingungen.

widerstand weggelassen ist. Es ist aber ja schon ohne weiteres anschaulich, daß vorm Wind ohne Luftwiderstand nicht gesegelt werden kann. Zur Anschaulichkeit der Werte  $f$  sei auf die Abschnitte 4b, 5b und 7a verwiesen.

**3. b)  $\beta$ : Segeln ohne Luftwiderstand bei konstantem Wasser-Querkraftwiderstandsverhältnis  $W_{HQ}/Q_H$ .** Läßt man in Gl. (47) bzw. (48) nur  $c_{WA} = \epsilon_{QA} = 0$  werden, so erhält man für den Fall ohne Luftwiderstand, aber mit einfacher Berücksichtigung des Wasser-Querkraftwiderstandes:

$$f \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} = -c_{QA} \left[ \sin \chi_A - \left( \epsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \epsilon_{QH} \right) \cdot |\cos \chi_A| \right]. \quad (51)$$

Entwickelt man den Unterschied zwischen Gl. (49) und (51), der dann also die Vortriebseinbuße infolge Berücksichtigung der Wasserquerkraft darstellt,

$$\Delta \frac{f}{-c_{QA}} = -\frac{v_A^2}{v_H^2} \cdot |\cos \chi_A| \left( \epsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \epsilon_{QH} \right) \quad (52)$$

mit Gl. (10) und (15), so erhält man schließlich nach Umformung die Beziehung (53), womit sich für den speziellen Fall der Einfluß der Wasserquerkraft auf den wirksamen Segelvortrieb verfolgen läßt.

$$\Delta \frac{f}{-c_{QA}} = -\frac{\sin^2 \chi_W (v_W/v_H + \cos \chi_W)^2}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \chi_W}{(\cos \chi_W + v_H/v_W)^2}}} \cdot \left( \epsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \epsilon_{QH} \right). \quad (53)$$

Um den Einfluß der Querkraftberücksichtigung zu charakterisieren, ist in Bild 14 für  $\chi_W = 90^\circ$  noch eine Darstellung auch mit Berücksichtigung eines Wasser-Querkraftwiderstandes von

$$\left( \epsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{h_S} + \epsilon_{QH} \right) = 0,5$$

gegeben.

### 3. c) Segeln mit konstantem Luftwiderstandsverhältnis $W_A/Q_A$ .

Die Annahme eines konstanten Luftwiderstandsverhältnisses  $\varepsilon_A = W_A/Q_A$  ist eine sehr einfache und doch schon recht aufschlußreiche Methode, um die Wirkung realer Luftkraftverhältnisse am Segel etwa abschätzen zu können. Hier sei auch auf die neueren Arbeiten von Petersohn [56] und Barkla [6] verwiesen, so daß die Ausführungen dieses Abschnittes, soweit sie nichts Ergänzendes bringen, knapp gehalten werden können.

**3. c)  $\alpha$ : Segeln mit konstantem  $W_A/Q_A$  ohne Wasserwiderstand.** Vernachlässigung des gesamten Wasserwiderstandes, also  $f = 0 = \varepsilon_{SI} = \varepsilon_{QH}$ , ist wiederum der einfachste Fall des recht einfachen Falles  $W_A/Q_A = \varepsilon_A =$  konstantes Verhältnis von Luftwiderstand zu Luftquerkraft. Es sei darauf aufmerksam gemacht, daß das Verhältnis  $\varepsilon_A$  nicht dem Verhältnis  $\varepsilon_{QH}$  genau entspricht; bei diesem handelt es sich nur um den durch die Schräganströmung bzw. Querkrafterzeugung zusätzlich entstehenden Widerstand, während es bei jenem der gesamte Widerstand, also einschließlich des auch ohne Schräganströmung bereits vorhandenen Teiles ist. Mit den genannten Vernachlässigungen wird aus Gl. (48) folgende einfache Beziehung:

$$\begin{aligned} 0 &= -c_{QA} (\sin \chi_A - \varepsilon_A \cos \chi_A) \\ \operatorname{tg} \chi_A &= \varepsilon_A = W_A/Q_A. \end{aligned} \quad (54)$$

Auf diese Beziehung ist schon bei der Deutung des Winkels  $\chi_A$  als dynamische Güte Gl. (27) verwiesen worden. Mit Gl. (6) ergibt sich dann für die Fahrtgeschwindigkeit bei beliebigem Kurs zum Wind

$$\frac{v_H}{v_W} = \frac{\sin \chi_W}{\varepsilon_A} - \cos \chi_W. \quad (55)$$

Für die maximale Fahrtgeschwindigkeit bei jeweils günstigstem Kurs, der nach Gl. (25)

$$\operatorname{tg} \chi_{W(v_H/v_W)\max} = -\frac{1}{\varepsilon_A} \quad (56)$$

ist, erhält man dann mit Gl. (26):

$$\left(\frac{v_H}{v_W}\right)_{\max} = \sqrt{1 + 1/\varepsilon_A^2}. \quad (57)$$

In Bild 8 und 9 werden diese einfachen Zusammenhänge anschaulich, wenn man das dort angegebene  $\chi_A$  gemäß Gl. (54) durch  $\varepsilon_A$  ersetzt. Das Beispiel für  $\chi_W = 90^\circ$  mit  $\varepsilon_A = 0,3$  ist in Bild 14 mit enthalten.

**3. c)  $\beta$ : Segeln mit konstantem  $W_A/Q_A$  ohne Wasser-Querkraftwiderstand.** Mit diesem weiteren Spezialfall wird eine Möglichkeit genannt, die Kluft zwischen unwirklich idealisiertem Segelantrieb und realer Wirklichkeit schrittweise zu verengen. Der Vorteil solcher „halbwirklicher“ Zwischenschritte liegt darin, daß die Ergebnisse meist sehr viel einfacher zu erhalten und zu übersehen sind und daß dabei bei gewissen auch praktischen Spezialfällen die Wirklichkeit schon recht gut angenähert werden kann. Wenn nun hier der Wasser-Querkraftwiderstand als klein gegenüber dem Wasser-Geradeauswiderstand vernachlässigt werden soll, so trifft dies wohl bei der Notbesegelung kleiner völliger Fahrzeuge mit Schwert oder gutem Kiel noch zu.

In Gl. (48) wird also  $(\varepsilon_{SI} h_M/s_M + \varepsilon_{QH}) = 0$  gesetzt;

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{v_A^2}{v_H^2} (\sin \chi_A - \varepsilon_A \cos \chi_A). \quad (58)$$

Die Umformung mit Gl. (10) und (15) ergibt dann:

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{\sin^2 \chi_W \left(\frac{v_W}{v_H} + \cos \chi_W\right)^2}{\sqrt{1 + \frac{\sin^2 \chi_W}{(\cos \chi_W + v_H/v_W)^2}}} \left(\frac{\sin \chi_W}{\cos \chi_W + v_H/v_W} - \varepsilon_A\right). \quad (59)$$

In Bild 14 ist dies für  $\chi_W = 90^\circ$  zum Vergleich mit anderen „Zwischschritten“ dargestellt;  $\varepsilon_A$  ist dabei zu 0,3 gesetzt, was nach [56] entsprechend [79] im Hinblick auf ein gutes Tuchsegel geschehen mag.

**3. c)  $\gamma$ : Segeln mit konstantem  $W_A/Q_A$  und  $W_{HQ}/Q_H$  ohne Wasser-Geradeauswiderstand.** Auch für diesen Spezialfall läßt sich eine praktische Anwendung angeben, bei der die Vernachlässigung des Geradeauswiderstandes, also von  $f$ , vertretbar erscheint, wenn man lediglich in der Tendenz richtige und sonst

angenäherte Ergebnisse haben will. Segelt man mit einem auf Minimalwiderstand gezüchteten Bootsrumpf, der nicht oder nur recht unwirksam Kiel, Flosse oder Schwert besitzt, so muß die Querkraft vom Rumpf allein aufgebracht werden, was z. B. bei einem reinen Stromlinienrumpf mit recht hohem Querkraftwiderstand erkaufte werden muß, so daß die obengenannten Voraussetzungen erfüllt sein mögen.

In Gl. (48) wird jetzt  $f = 0$  gesetzt;  $v_H/v_A$  und  $c_{QA}$  müssen natürlich endlich bleiben, so daß also die Nullbedingung für die in eckigen Klammern stehenden Größen gelten muß:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \chi_A - \varepsilon_A &= \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) |1 + \varepsilon_A \operatorname{tg} \chi_A| \\ \operatorname{tg} \chi_A &= \frac{\varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} + \varepsilon_A}{1 - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot \pm \varepsilon_A} \end{aligned} \quad (60)$$

Es gilt dabei

$$,, + \varepsilon_A " \text{ für } \varepsilon_A \leq -\frac{1}{\operatorname{tg} \chi_A} \text{ und } ,, - \varepsilon_A " \text{ für } \varepsilon_A \geq -\frac{1}{\operatorname{tg} \chi_A}. \quad (60a)$$

Dies führt man in Gl. (6) ein und erhält schließlich:

$$\frac{v_H}{v_W} = \sin \chi_W \frac{1 - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot \pm \varepsilon_A}{\varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} + \varepsilon_A} - \cos \chi_W. \quad (61)$$

Der in Bild 14, also für  $\chi_W = 90^\circ$ , eingetragene Punkt bei  $f = 0$  zeigt, daß bei gleichzeitiger Berücksichtigung von  $W_A/Q_A$  und  $W_{HQ}/Q_H$  das Ergebnis nur recht bescheiden wird, wenn man die recht „unidealen“ Werte  $\varepsilon_A = 0,3$  und  $(\varepsilon_{SI} \cdot h_M/s_M + \varepsilon_{QH}) = 0,5$  dabei wählt. Für dieses Beispiel erhält man übrigens als Höchstgeschwindigkeit  $v_H/v_W = 1,46$  bei einem Fahrtwinkel zum Wind von  $\chi_W = 133,25^\circ$ , wie sich aus den hierfür mit Hilfe von Gl. (60) und (26) bzw. (25) aufgestellten Beziehungen Gl. (62) und (63) leicht ermitteln läßt.

$$\left( \frac{v_H}{v_W} \right)_{\max} = \sqrt{1 + \left[ \frac{1 - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot \varepsilon_A}{\varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} + \varepsilon_A} \right]^2} \quad (62)$$

bei

$$\operatorname{tg} \chi_{W(v_H/v_W) \max} = -\frac{1 - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot \varepsilon_A}{\varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} + \varepsilon_A}. \quad (63)$$

**3. c)  $\delta$ : Segeln mit konstantem  $W_A/Q_A$  und  $W_{HQ}/Q_H$ .** Hier soll nun also keine Art von Kräften mehr vernachlässigt werden. Es ist der allgemeinste Fall, dessen Behandlung mit allgemein dynamischen Beziehungen noch erreicht werden kann. Es ist dies zugleich auch das ausführlichste Verfahren, das im Schrifttum über rein numerische segeltheoretische Aufgaben zu finden ist. Jede weitere Verfeinerung muß entweder experimentelle Unterlagen nach grafischen Methoden weiterbehandeln, wie dies meines Wissens von Croseck [16] begonnen worden ist, oder eine Analyse der Strömungskräfte im einzelnen vornehmen, wie dies in [86] für diesen Zweck geschieht und hier in den Abschnitten 4–6 verwendet wird.

Es ist hier jetzt also von Gl. (48) ohne weitere Vereinfachungen auszugehen.

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{v_A^3}{v_H^3} \cdot \cos \chi_A \left[ \operatorname{tg} \chi_A - \varepsilon_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot |1 + \varepsilon_A \cdot \operatorname{tg} \chi_A| \right].$$

Mit Gl. (4) kann man damit  $f/(-c_{QA})$  abhängig von  $\chi_A$  und  $\chi_W$  sowie den  $\varepsilon$ -Werten ausdrücken:

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{\operatorname{tg} \chi_A - \varepsilon_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cdot |1 + \varepsilon_A \cdot \operatorname{tg} \chi_A|}{\cos \chi_A (1 - \operatorname{tg} \chi_A / \operatorname{tg} \chi_W)^2}. \quad (64)$$

In Abhängigkeit von  $\chi_W$  und  $v_H/v_W$  kann man Gl. (64) mit Hilfe von Gl. (15) zu (65) umschreiben.

$$\frac{f}{-c_{QA}} = \frac{\frac{\sin \chi_W}{\cos \chi_W + v_H/v_W} - \varepsilon_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \left| 1 + \frac{\varepsilon_A \cdot \sin \chi_W}{\cos \chi_W + v_H/v_W} \right|}{\left( 1 - \frac{1}{1 + v_H/(v_W \cdot \cos \chi_W)} \right)^2 \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \chi_W}{(\cos \chi_W + v_H/v_W)^2}}}. \quad (65)$$

In Bild 14 ist der Verlauf des „wirksamen Segelvortriebs“  $f/(-c_{QA})$  nach Gl. (65) für  $\chi_W = 90^\circ$  mit eingezeichnet, wobei wie beim Fall nach 3. c)  $\gamma: \varepsilon_A = 0,3$  und  $(\varepsilon_{SI} \cdot h_M/s_M + \varepsilon_{QH}) = 0,5$  gesetzt ist.

Es sei noch erwähnt, daß zur Repräsentation eines „idealen Segels“ keineswegs der Wert  $\varepsilon_A = 0 =$  konstant zu verwenden ist. Vielmehr muß für Winkel  $\chi_A$ , die größer als  $90^\circ$  werden, ein möglichst großes  $\varepsilon_A$ , von etwa 1 oder mehr, gesetzt werden.

### 3. d) Dynamische Bedingungen bei allgemein variablem Luftwiderstand und optimaler Segelstellung

Sollen keine der üblichen Vereinfachungen in der Art der Darstellung der Luftkräfte an der Takelage zugelassen werden — nur so kann eine vollkommene Auswahl und Beurteilung bei verschiedenen Takelageformen getroffen werden —, so muß man von der Gleichung (47) ausgehen. Als allgemeine Kenntnis von den Luftkräften kann nur unterstellt werden, daß sich die Beizahl  $c_{WA}$  als eine stetige und differenzierbare Funktion von der Beizahl  $c_{QA}$  darstellen lassen möge. Damit allein lassen sich dann natürlich noch keine Angaben über die mit solchen Bedingungen erzielbaren Segelvortriebe machen; doch man kann untersuchen, welche allgemeinen dynamischen Bedingungen sich für eine optimale Segelstellung — d.h. also optimalen Wert  $c_{QA}$  — bei gegebener Funktion  $c_{WA}(c_{QA})$  und bestimmter Anblasung  $\chi_A$  angeben lassen.

**3. d)  $\alpha$ : Optimale Segelstellung ohne Wasser-Querkraftwiderstand.** Mit der Bedingung verschwindenden Wasser-Querkraftwiderstandes erhält man aus Gl. (47):

$$f = \frac{v_A^2}{v_H^2} (-c_{QA} \cdot \sin \chi_A - c_{WA} \cdot \cos \chi_A). \quad (66)$$

Mit der Vorstellung, daß  $\chi_A$ ,  $v_A$  und  $v_H$  konstant gehalten werden sollen und der Winkel  $\alpha_S$  der Segelanströmung so variiert werden soll, daß sich eine möglichst große Vortriebsmöglichkeit — also möglichst großes  $f$  — ergibt, kann nun  $f$  einfach nach  $c_{WA}$  differenziert und gleich Null gesetzt werden.

$$0 = \frac{v_A^2}{v_H^2} \left( \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \cdot \sin \chi_A - \cos \chi_A \right).$$

Falls  $\partial^2 - c_{QA} / \partial c_{WA}^2$  kleiner als Null ist, was normalerweise bei den Segelpolaren  $c_{QA}(c_{WA})$  immer erfüllt ist, aber als Bedingung für extreme Fälle zu beachten bleibt, kann man also in diesem Falle eine optimale Segelstellung für

$$\left( \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \right)_{\text{opt.}} = \cotg \chi_A \quad (67)$$

erwarten. Ist die Segelpolare grafisch gegeben, so kann man durch Anlegen einer Tangente entsprechend Gl. (66) den für bestimmte Winkel  $\chi_A$  günstigsten Punkt nach  $c_{QA}$  und  $c_{WA}$  entnehmen.

**3. d)  $\beta$ : Optimale Segelstellung bei konstantem  $W_{HQ}/Q_H$ .** Bei zum vorhergehenden Abschnitt entsprechendem Vorgehen ist jetzt also die gesamte Gl. (47) nach  $c_{WA}$  zu differenzieren und gleich Null zu setzen.

$$0 = \frac{v_A^2}{v_H^2} \left[ \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \cdot \sin \chi_A - \cos \chi_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \left| \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \cdot \cos \chi_A + \sin \chi_A \right| \right]$$

Daraus ergibt sich also für optimale Segelstellung die gegenüber Gl. (67) sinngemäß erweiterte Beziehung:

$$\left( \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \right)_{\text{opt.}} = \frac{1 + \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \pm \tg \chi_A}{\tg \chi_A - \left( \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right)}. \quad (68)$$

Dabei gilt dann wieder wegen der für den Querkraftwiderstand nur maßgebenden absoluten Größe der Wasserquerkraft:

$$,,+ \operatorname{tg} \chi_A'' \text{ für } \operatorname{tg} \chi_A \geq -\frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \text{ und } ,, - \operatorname{tg} \chi_A'' \text{ für } \operatorname{tg} \chi_A \leq \frac{\partial - c_{QA}}{\partial c_{WA}} \quad (68a)$$

entsprechend der ähnlichen Bedingung (60a).

**3. d)  $\gamma$ : Optimale Segelstellung bei allgemein variablem Wasser-Querkraftwiderstand.** Allein auf Grund der dynamischen Beziehungen, wie sie diesem Abschnitt zugrunde liegen, kann für diesen Fall keine geschlossene Bedingung für  $(\partial - c_{QA}/\partial c_{WA})_{\text{opt}}$  nach Art der Beziehung (68) angegeben werden, da es hierzu eines numerisch gegebenen funktionellen Zusammenhanges zwischen  $c_{QH}$  und  $c_{WHQ}$  bedarf, wie er sich erst aus einer näheren Untersuchung des Charakters der Kräfte am Rumpf im einzelnen (Abschnitt 5) ergeben kann. Dennoch kann man natürlich — was hier nicht näher ausgeführt werden soll — durch Iteration einen wohl praktisch optimalen Punkt der Segelpolare einem ebenso optimalen Punkt einer Schwert- oder Kielpolare des Rumpfes zuordnen. Man nimmt zunächst eine gesamte Querkraftgleitzahl für die Wasserkräfte an und bestimmt nach Gl. (68) dazu die optimale Stellung der Segelpolare. Daraus ergibt sich für den Punkt ein bestimmtes  $c_{QA}$  und  $c_{QW}$ . Damit ergibt sich nach Gl. (39) ein bestimmtes  $c_{QH}$ , wofür aus der Rumpfpolare ein zugeordnetes  $c_{WHQ}$  und damit  $\epsilon_{QH}$  gewonnen werden kann. Diesen vom ursprünglich angenommenen Wert sicher etwas abweichenden Zahlenwert benutzt man nun zu einer erneuten Bestimmung des optimalen Punktes der Segelpolare nach Gl. (68). Gl. (68) zeigt, daß eine Vergrößerung von  $\epsilon_{QH}$  zu einer Vergrößerung von  $(\partial - c_{QA}/\partial c_{WA})_{\text{opt}}$  und damit üblicherweise zu einer Verkleinerung von  $c_{QH}$  und so auch von  $\epsilon_{QH}$  führen wird. Wenn man diese Tendenz beachtet, wird man rasch eine Annäherung an den optimalen Wert der beiden zugeordneten Polaren erreichen können.

Noch einfacher ist das Verfahren, wenn zwar die Polare des Rumpfes, nicht aber seine Größe bzw. die der Lateralfäche durch  $F_L$  festgelegt ist. Dann kann für  $\epsilon_{QH}$  der Optimalwert eingesetzt werden, für den dann auch der zugehörige Wert  $c_{QH}$  fest ist. Über Gl. (39) wird dann die erforderliche Größe der Lateralfäche bestimmt. Diese Optimallösung gilt dann natürlich immer nur für eine bestimmte Fahrtgeschwindigkeit auf einem bestimmten Kurs zum Wind. Universeller ist die praktische Anwendung dieses Verfahrens, falls das Fahrzeug z. B. ein in Größe und Einstellung veränderliches Schwert besitzt.

#### 4. Besegelung

##### 4. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften der Besegelung

Als Besegelung seien alle die Vorrichtungen des Überwasserschiffes bezeichnet, die ein Fahrzeug zur Umsetzung von Windenergie in Vortrieb benötigt. Der Begriff soll prinzipiell also keineswegs an Tuchsegel mit laufendem und stehendem Gut und noch nicht einmal an feste Quertriebsflächen gebunden sein. Auch Windräder und „Segelräder“ und ähnliche Vorrichtungen zur Ausnutzung der Windenergie gehören systematisch und aus Vergleichsgründen mit hierzu. Wenn diese auch hier im einzelnen weiter nicht behandelt werden sollen, so werden über die Ergebnisse einer Voruntersuchung über die Zweckmäßigkeit von Rotoren, Windrädern, Segelrädern und allgemeinen „Windnutzern“ für den Fahrzeugantrieb in Abschnitt 4. c) noch einige Anmerkungen gemacht werden.

Als Segelfläche  $F_S$  wird die Summe aller einzelnen Segelflächen oder die Fläche des Einzelsegels und bei Starrkörperbesegelungen die Summe der größten Körperprojektionsflächen bezeichnet. Auf diese Fläche und auf den Staudruck der Anblasgeschwindigkeit  $v_A$  sind die Beiwerte der Kräfte in üblicher Weise zu beziehen, wie sie bereits mit  $c_{QA}$  und  $c_{WA}$  in Gl. (39) verwendet worden sind. Stabilitätsuntersuchungen sollen sich auf die einfachsten Zusammenhänge zwischen Segelkraft und Querstabilität beschränken, so daß es der Definition einer Beizahl für das Moment um die Hochachse hier nicht bedarf. Diese Unterlassung braucht den Wert der Aussagen über die Leistungsmöglichkeiten von Segeln nicht zu mindern, da wegen der vielen Variationen in der Zuordnung von Besegelung und Rumpf die Erzielung der statischen Stabilität um die Hochachse wohl immer ohne Leistungseinbuße — dies im Unterschied zum normalen Flugzeug — möglich sein wird.

Die Höhe der gesamten Besegelung von Unterkante Untersegel bis Oberkante oberstes Toppsegel wird  $h_S$  genannt und führt mit  $h_S^2/F_S = A_S$ , dem geometrischen Seitenverhältnis des Segels bzw. der Besegelung, zur wichtigsten der klar definierbaren Formkennzeichnungen. Die Länge der Besegelung  $L_S$  hat hier geringere Bedeutung; sie ist von vorlichstem Vorliek bis achterlichstem Achterliek zu nehmen und dürfte so auch zur Kennzeichnung der größten an den Segeln auftretenden Reynolds-

zahl geeignet sein. Beim Entwurf von Profissegeln bzw. bei Modellversuchen kann auch beim Segeln der Kennzahl einfluß eine Rolle spielen. Selbstverständlich ist die relative Luftgeschwindigkeit  $v_A$  für die Bildung der Reynoldszahl zu benutzen. Bei gleicher Fahrtgeschwindigkeit durchs Wasser hängt die Reynoldszahl also von der Fahrtrichtung zum Wind ab. Um diese Unbequemlichkeit auszugleichen, ist in Bild 15 ein einfaches Diagramm für die Bestimmung der Reynoldszahl angegeben.

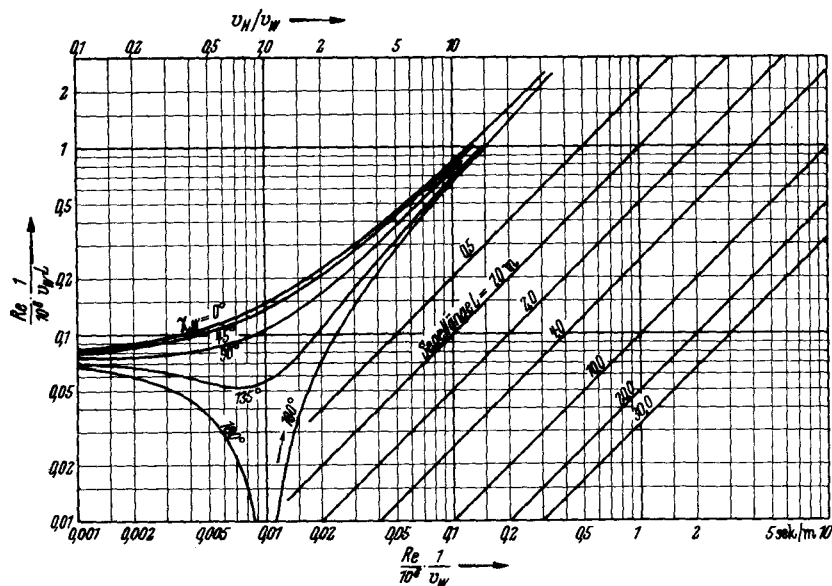


Bild 15. Reynoldszahlen beim Segelschiff (9,3° C).

#### 4. b) Form und Größe der Besegelung

Bei der Form eines Einzelsegels denkt man zunächst an den besonders charakteristischen Umriss seiner Fläche  $F_S$ . Dreieck, Trapez, Rechteck, schiefe Trapeze, Halbellipsen sind die häufigsten Formen hierfür. Bei der Zusammenstellung der Einzelsegel zu einer gesamten Besegelung vervielfachen sich die Möglichkeiten noch durch Anzahl, Art der Anbringung und Anordnung gegeneinander. Eine der heutigen und insbesondere historischen Praxis auch nur einigermaßen gerecht werdende Vollständigkeit der Darstellung ist im Rahmen dieser Arbeit unmöglich. Der Versuch einer derartigen Darstellung ist jedoch in [84] unternommen, worauf hier zurückgegriffen werden kann; zahlreiche Quellenangaben sind ebenfalls in [84] enthalten. Dabei sind auch die vielfältigen Möglichkeiten der Profilbildung am Tuchsegel und der Profilierung an Starr- und Halbstarrsegeln berücksichtigt worden. Als aussichtsreich für die Entwicklung aerodynamisch leistungsfähiger Besegelungen muß jede der drei genannten Arten angesehen werden. Bei kleineren Hochleistungs-Segelfahrzeugen ist — besonders zur Ausnutzung von Laminareffekten — das starre Segel optimal und auch technisch durchführbar. Bei größeren und Nutzfahrzeugen ergeben halbstarre, reine Tuchsegel oder daraus kombinierte Besegelungen den spezifisch größten Vortriebseffekt (vgl. auch die Beispielskizzen des Bildes 18). Um mit einer Leistungserhöhung der Besegelung eines gegebenen Fahrzeuges zugleich auch eine Flächenverkleinerung (Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Betriebes und der Unterhaltung) verbinden zu können, muß jedes aerodynamisch folgerichtige Mittel angewendet werden; hierzu gehören dann auch die in 4c genannten Klappen.

Eine weitere Variationsmöglichkeit in der Form der Besegelung ergibt sich aus den vielen Möglichkeiten der Segelführung bei an sich gegebener Takelage. Zwischen Vollzeug mit Leesegeln und gerefften Untermarssegeln liegen eine Vielzahl von Möglichkeiten, ebenso wie in den Reffzuständen einer modernen Hochseejacht. Die Form und Größe der wirklichen Segelfläche  $F_S$  ist also von Richtung und Größe des Windes abhängig, wenn das Segelschiff richtig geführt wird. Die Berücksichtigung dieser Umstände in der Rechnung kann natürlich nur im Einzelfall erfolgen. Bei mehr umfassenden Betrachtungen wie hier wird man eine konstante Segelfläche in die Rechnung einführen und bei der Bewertung der Ergebnisse lediglich der beschriebenen Variation der Fläche Rechnung tragen. Es wird also auf den Unterschied zwischen der in die Rechnung einzuführenden tatsächlichen Segelfläche  $F_S$  und der — man möchte sagen — nominellen Segelfläche  $F_{Sn}$ , wie sie z. B. in Schiffslisten angegeben

wird, zu achten sein. Unter  $F_{Sn}$  werden üblicherweise nur die Hauptsegel erfaßt. Hauptsegel sind dabei alle Segel außer Ballon, Spinnaker, Leeseegel und zwischen den Toppen gesetzte Stagssegel; diese sind jedoch nur dann ausgeschlossen, wenn an den Toppen auch noch andere als Stagssegel gefahren werden.

Zur Beurteilung statistischer Angaben ist es gut, sich Klarheit zu verschaffen über das Verhältnis von maximaler wirklicher Segelfläche  $F_S$  zur nominellen Segelfläche  $F_{Sn}$ . Als Anhalt mögen folgende Werte dienen:

$$\begin{array}{ll} \text{Große Handelssegler ohne Leeseegel } (F_S/F_{Sn})_{\max} & \approx 1,3 \\ \text{Große Handelssegler mit Leesegehn} & \approx 1,4 \\ \text{Jachten} & \approx 1,6 \end{array} \quad (69)$$

$$(F_S/F_{Sn})_{\min} \approx 0,15. \quad (70)$$

Das Maximum ist durch Stabilität bzw. räumliche Möglichkeiten, das Minimum durch die Forderung nach Steuerbarkeit des Schiffes bedingt. Hier mag eingefügt werden, daß insbesondere große Handelssegler — ohne Segel — ausgesprochen schlecht steuern, da sie relativ sehr geringe Ruderflächen besitzen. Die guten Steuereigenschaften unter Segel sind also allein auf die Segel selbst zurückzuführen.

Über die nominelle Größe der Segelfläche kann als statistischer Anhalt Gl. (71) angegeben werden:

$$\begin{array}{ll} \text{Schiffe mit Hilfsbesegelung} & \dots\dots\dots F_{Sn}/V^{2/3} \geq 3 \\ \text{Handelssegler} & \dots\dots\dots 8 \text{ bis } 16 \\ \text{Jachten} & \dots\dots\dots 13 \text{ bis } 30 \\ \text{Extreme Renn- und Rekordfahrzeuge} & \dots\dots\dots \text{bis } 50 \end{array} \quad (71)$$

Mit Gl. (69) bis (71) erhält man also für den Bereich der in der bisherigen Praxis interessierenden wirklichen Segelflächen:

$$F_S/V^{2/3} \approx 1 \text{ bis } 50. \quad (72)$$

Dabei ist unterstellt, daß eine Hilfsbesegelung nicht mehr in derselben Weise gekürzt wird wie eine normale Besegelung und daß die Angaben in Gl. (71) für die Rekordfahrzeuge bereits das Maximum darstellen.

Auch viele Faustformeln zur Bemessung der Segelfläche geben ein statistisches Bild von den bisherigen Ausführungen in der Praxis. Man findet so die Segelfläche auf Länge und Breite des Schiffes bezogen, Gl. (73).

$$\begin{array}{ll} \text{Kleine Boote} & \dots\dots\dots \frac{F_S}{L \cdot B} \approx 1 \text{ bis } 3 \\ \text{Große Boote und kleine Schiffe} & \dots\dots\dots \approx 4 \text{ bis } 5 \end{array} \quad (73)$$

In von C. Harmsen [36] gemachten Angaben, Gl. (74), nimmt der relative Wert der Segelflächengröße  $F_S/V^{2/3}$  mit der Verdrängung zu, worin praktisch zum Ausdruck kommt, daß große Boote mehr Fläche tragen, da der Wind ja der gleiche ist.

$$\begin{array}{ll} \text{Für Jollen} & \dots\dots\dots F_S/V^{2/3} < 30 \cdot V^{1/3} \\ \text{Für Flossenkieler} & \dots\dots\dots < 25 \cdot V^{1/3} \end{array} \quad (74)$$

Eine Verfeinerung in der Richtung ist in Gl. (75) gegeben.

$$\frac{F_S}{V^{2/3}} \approx (25 \text{ bis } 50) \cdot \left( \frac{B}{T} \cdot \frac{B}{v_W^2 \delta \cdot \sqrt{A_S}} \right)^{2/3}. \quad (75)$$

Hierin tritt bereits das Seitenverhältnis des Segels  $A_S$  auf, das ja den Vortrieb wie auch die Stabilitätsbeanspruchung erhöhen kann. Die bisherige Praxis zeigt statistisch folgendes Bild der für Einzelsegelflächen und gesamte Besegelung in Betracht kommenden Werte, Gl. (76).

$$\begin{array}{ll} \text{Einzelnes Rahsegel} & \dots\dots\dots A_S \geq 0,18 \\ \text{Handelssegler} & \dots\dots\dots 0,7 \text{ bis } 1,2 \\ \text{Hilfsbesegelung} & \dots\dots\dots 1 \text{ bis } 2 \\ \text{Jachten} & \dots\dots\dots 1,2 \text{ bis } 5 \\ \text{Einzelnes Baumsegel} & \dots\dots\dots \text{bis } 6 \end{array} \quad (76)$$

1938 ist von Croseck eine Statistik der deutschen Jachtflotte gemacht worden. Daraus kann man für diese Fahrzeuge auswerten:

$$A_S = \frac{4,55}{F_S^{0,06}}. \quad (77)$$

Das Seitenverhältnis fällt also mit der absoluten Größe der Fläche etwas ab.

Die gemachten Angaben über den Bereich der bisher verwendeten relativen Flächengrößen und Seitenverhältnisse führen zu der Frage, ob bei möglichen Entwicklungen der Besegelung die genannten Grenzen überschritten werden können. Das Bestreben wird aus praktischen Gründen dahin gehen, bei gegebener Höhe der Takelage mit gleichen oder eher kleineren Flächen größere Luftkräfte zu erzielen, z. B. starre oder halbstarre Systeme mit Klappen. Die Aufnahme größerer Luftkräfte muß durch bessere Stabilität, z. B. Auslegerkonstruktionen, gesichert werden. Wegen der schon sehr niedrig angegebenen unteren Grenze in Gl. (72) wird also diese Angabe wohl einigen Wert auch für die Zukunft besitzen. Bei den Seitenverhältnissen ist jedoch zu beachten, daß eine Reduktion der Segellänge wahrscheinlich ist und daß mit Konstruktionen, die einen vollständigen Abschluß des Unterlieks gegen Deck ergeben, gerechnet werden kann. Eine Verdoppelung der oberen Grenze von  $\Lambda_S$  nach Gl. (76) müßte in Betracht gezogen werden, so daß man rein geometrisch bis zu etwa 12 ansetzen muß. Durch den vollständigen Abschluß des Unterlieks ergibt sich eine weitere Verdoppelung des wirksamen Seitenverhältnisses. Eine Veränderung der unteren Grenze hätte entwicklungsmäßig keinen Sinn. Es ist jedoch zu beachten, daß beim Segeln mit voll abgelöster Strömung am Segel, was platt vorm Wind der Fall ist, bei geschickter Verteilung vieler kleiner Segelflächen — sozusagen einem Gitterwerk von Segeln — die Wirkung eines Seitenverhältnisses Null erzielt werden kann. Platt vorm Wind ist bei etwa senkrechter Anblasung aerodynamisch wie auch rein definitionsmäßig ein solches Seitenverhältnis Null vom Seitenverhältnis Unendlich nicht mehr zu unterscheiden und besitzt wie dieses für diesen Zustand gewisse Vorteile, die noch besprochen werden sollen. Man kann also für den Bereich der zu erwartenden Seitenverhältnisse angeben:

$$\begin{array}{ll} \text{Geometrisch} & \dots\dots\dots \Lambda_S = 0,18 \text{ bis } 12 \\ \text{aerodynamisch wirksam} & \dots\dots\dots 0 \text{ bis } 24 \end{array} \quad (78)$$

#### 4. c) Beispiele und statistische Grenzen für die Kräfte von Besegelungen

Seit Beginn der Bemühungen um den Aufbau einer Segeltheorie war die Ermittlung der Kräfte am Segel eine ebenso reizvolle wie schwierige Aufgabe, die im Bestreben ihrer Lösung zu einer Reihe von interessanten Versuchen geführt hat. Versuche am naturgroßen Segel sind schon frühzeitig unternommen worden. Curry hat solche beschrieben [21] und selbst ausgeführt [20]. In jüngster Zeit hat Heinrichs in der Richtung gearbeitet. Wegen der dabei vorhandenen Schwierigkeiten zur Erlangung absoluter Ergebnisse hat man sich bisher immer wieder auf Modellversuchsergebnisse stützen müssen. Von diesen nicht sehr zahlreichen Ergebnissen hat Petersohn in neuerer Zeit [55] wieder Gebrauch gemacht, was auch darum bedeutsam ist, da einige der Ergebnisse in heute nur schwer zu erlangenden Originalarbeiten veröffentlicht sind. Die meisten Modellversuche beziehen sich auf Windkanaluntersuchungen an einzelnen Segelflächen, [15], [16], [31], [91]. Einige spezielle Studien für das Profil des Segels sind in [16] und [21] enthalten. Experimentell besonders schwierig sind naturgemäß Untersuchungen an gesamten Takelagen, wie sie von Croseck [16] und Rösingh [62] veröffentlicht sind. Im Rahmen dieser Untersuchung ist der Wert solcher Versuchsergebnisse beschränkt auf die anschauliche Repräsentation der aerodynamischen Leistungsfähigkeit „klassischer“ Segelformen. In dem Zusammenhang spielt die letzte Genauigkeit solcher Ergebnisse keine Rolle, auch wenn man bedenkt, daß für die Übertragung auf die Großausführungen einige Maßstabskorrekturen erforderlich sein würden und daß in anderen Fällen die Präzisierung der Kanalkorrekturen gewisse Verschiebungen wahrscheinlich machen. Für eine rein empirische Interpolation und Extrapolation auf bisherige und projektierte Segelformen reicht die Anzahl der Versuche bei weitem nicht aus. Eine experimentelle Schließung dieser Lücke wird wohl kein noch so optimistischer und passionierter Segler erhoffen dürfen.

Aus diesem Grunde und wegen der Zielrichtung dieser Arbeit — mehr auf die allgemeinen Möglichkeiten als auf den speziellen Seglertyp gerichtet — soll hier die Bestimmung der Kräfte am Segel mehr durch eine zweckdienliche Analyse allgemeiner aerodynamischer Untersuchungsergebnisse erzielt werden (Abschnitt 4d). Die speziellen Ergebnisse von Modellversuchen mit Besegelungen, von denen Bild 16 charakteristische Beispiele geben soll, werden dabei jedoch nicht nur die nicht zu unterschätzende Bedeutung einer anschaulichen Illustration haben; sie geben zugleich einen Teil der Leistungsgrenzen von Segeln, und zwar der unteren Grenze. Verstärkte experimentelle und theoretische Bemühungen um die Segelaerodynamik werden sich ja nicht auf die Darstellung praktisch erreichbarer Ergebnisse beschränken, sondern eigentlich in erster Linie der Entwicklung dienende Projekte untersuchen müssen.

Gerade im Hinblick auf solche Entwicklungen ist es für die dann hier folgende Formulierung der Kräfte recht nützlich, vorweg eine begründete Abschätzung auch der oberen Grenzen der Leistungsmöglichkeiten von Segeln zu geben. Um diese Leistungsgrenzen insgesamt zu skizzieren, ist Bild 17

entworfen. Die unteren Grenzen sind von Bild 16 bzw. von der Polare ebener Platten, entsprechend etwa dem kleinsten gemäß Gl. (76) in Betracht zu ziehenden Seitenverhältnis  $\Lambda_S$  schematisch übernommen. Es kann als einigermaßen sicher gelten, daß Segelflächen, die so schlecht sind, daß ihre Polare noch innerhalb des von der unteren Grenze in Bild 17 gebildeten Gebietes liegen, leistungsmäßig völlig uninteressant sind.

Eine Unterschreitung kommt nur bei Notzuständen — Segeln vor Topp und Takel — in Betracht, die in diesem Rahmen nicht interessieren sollen. Die obere Grenze zeigt durch ihre breitere Schraffur, daß nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen eine sichere obere Grenze noch nicht angegeben werden kann und daß gewisse weitere Verbesserungen, z. B. durch Absaugung, denkbar sind. Die durchgezogene obere Grenze stützt sich auf die Ergebnisse von [86]. Der Teil der Polare von  $c_{QA} = 0$  bis  $c_{QA} = 3$  ist experimentell bereits durch eine Messung an einer Fläche mit besonderer Spaltklappenanordnung und einer systematischen, umfangreichen Reihe von Spreizklappenuntersuchungen belegt.

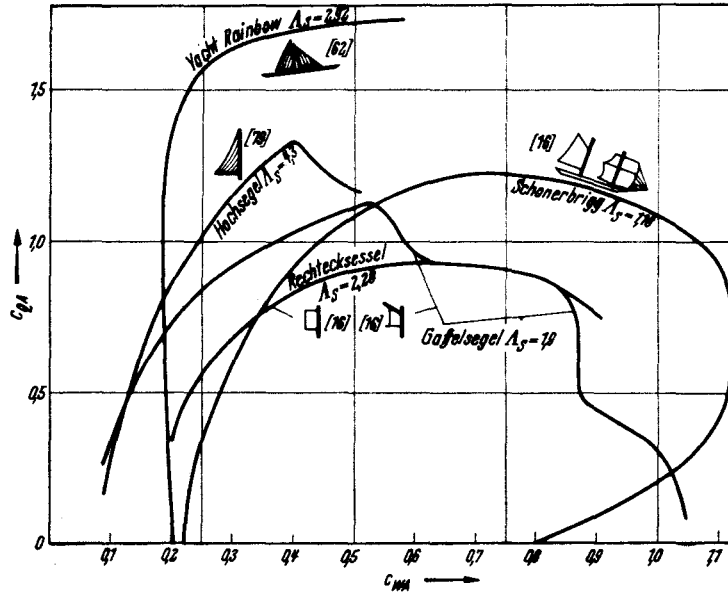


Bild 16. Segelpolaren nach Modellversuchen (in doppelter Größe von Bild 17).

Dabei ist ein Seitenverhältnis von  $\Lambda_S = 5$  zugrunde gelegt. Für den weiteren Verlauf der Polaren ist eine willkürliche Verkleinerung des Seitenverhältnisses unterstellt, die technisch — entsprechend der Rahmentakelung — durch Öffnen von Schlitzen z. B. denkbar wäre. Der weitere Verlauf der oberen Grenze im Bereich abgelöster Strömung bis zu  $c_{QA} = 0$  stellt eine grobe Abschätzung dar. Dabei ist einmal eine weitgehende Unterteilung der „Segelfläche“ bis zur praktischen Erreichung des Wertes  $U_S^2/F_S = \infty$  ( $U_S$  ist der Umfang sämtlicher einzelner Segelflächen der Takelage) und andererseits die gegenseitige Abdeckung der Segel bei Mehrmastern in Betracht gezogen. Bei Mehrmastern entstehen natürlich gerade in dem Teil der Polaren eine ganze Reihe von Polaren-ästen je nach der Stellung der Segel. Die beiden gezeichneten Äste sollen dem Optimum jeweils für einen Einmaster bzw. etwa einen Viermaster entsprechen. Im Abschnitt 3 war bereits bemerkt worden, daß in diesem Bereich die Polare mit dem größeren Widerstand die für den Segelvortrieb günstigere ist.

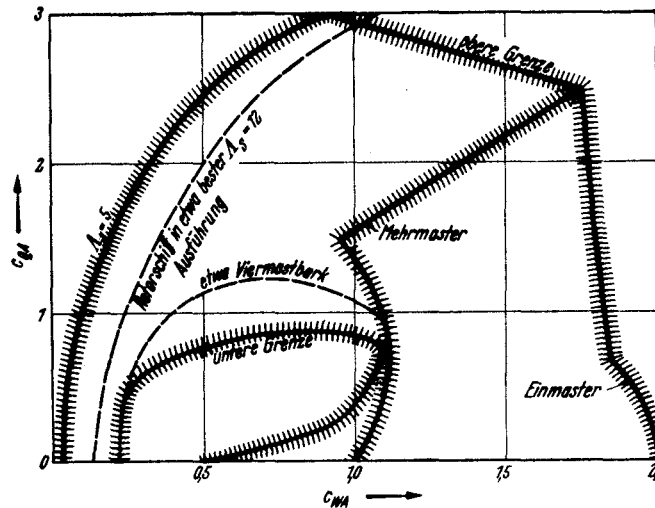


Bild 17. Segelpolaren für Leistungsgrenzen (in halber Größe von Bild 16).

Wenn damit in Bild 17 die Grenzen gezogen sind, innerhalb derer sich die weiteren Untersuchungen abzuspielen haben, so mag die Frage auftauchen, wie andere Mittel der Windkraftausnutzung im Vergleich zum Segel leistungsmäßig abschneiden. An Mitteln sind zu nennen der nach Flettner genannte kreiszylindrische Rotor, der Savoniusrotor, der Planrotor nach v. Schulmann, das Horizontalwindrad, das Frontalwindrad, das Segelrad, das Segelwindrad und dessen Verallgemeinerung zum allgemeinen „Windnutzer“. Schrifttum hierzu [84], [85], woraus auch die folgenden Bemerkungen

entnommen sind. In Bild 17 ist zum Vergleich eine Polare für ein Rotorschiff angedeutet, wie sie sich nach Modellmessungen bei Anordnung großer Endscheiben und einem Seitenverhältnis von 12 ergibt. Die Beizahlen für den Rotor sind aber auf die Segelfläche des als Grenze angegebenen „Bestsegels“ bezogen, die sich zu der des Rotors wie 1:5,5 verhält, damit bei einer um 51% größeren Höhe der Segelfläche sich für beide gedachten Ausführungen ein gleiches Sturmcentermoment ergibt. Dabei sind die Widerstandbeizahlen (bezogen auf die jeweilige wirkliche Fläche) mit 0,036 für die starre Segelfläche und 0,30 für den Rotor für diesen noch recht vorteilhaft angesetzt. Nach dem Vergleich in Bild 17 darf also von der Entwicklung der Segelflächen mehr als vom Rotor erwartet werden. Auf den aerodynamisch bedingten Nachteil geringerer Schlingerdämpfung beim Rotor soll hier nur hingewiesen werden.

Savonius- und Planrotor erreichen nicht die Leistung des Flettner-Rotors. Reine Windräder sind — außer im engen Winkelbereich genau gegen und eventuell mit dem Wind — dem Segel unterlegen [94]. Das Segelwindrad, das als eine Kombination eines Windrades und eines Segels von Kreisumriß angesehen werden kann, steht auch leistungsmäßig zwischen diesen. Von idealer Überlegenheit allen anderen Arten gegenüber ist der allgemeine Windnutzer, der als eine auf Durchströmung umstellbare Segelfläche guten Seitenverhältnisses aufzufassen ist, der in der Art eines Windrades der durchströmenden Luft Energie entziehen kann und sie über Wasserpropeller zum Vortrieb benutzt. Es wäre dies die Umkehrung eines Hubschraubers, aber mit größerem Seitenverhältnis. Damit würde die in Bild 17 angegebene obere Grenze noch verbessert, und außerdem ergibt sich die Möglichkeit, direkt gegen den Wind zu fahren. Es ist leichter, hierfür eine gute Abschätzung der Fahrtleistungen durchzuführen, als einen heute technisch durchführbaren Hinweis für die praktische Gestaltung zu geben, so daß dieses Mittel aus dieser Untersuchung leider ausgeschlossen werden muß.

In Bild 17 ist ferner noch zum Vergleich die Polare für eine Viermastbark angegeben, wie sie auf Grund der Polare der Schonerbrigg abgeschätzt werden kann. Dabei sind Maßstabskorrekturen für die Anwendung auf die Großausführung bereits vorgenommen, für die auch die obere Grenze gedacht ist. Die Viermastbark hat die technische Ausstattung, mit der der Handelssegler dem Maschinenschiff wirtschaftlich unterlegen ist (eine Untersuchung hierzu in [85]). Bemühungen, ihn von der Takelage her wirtschaftlich zu reorganisieren, müßten also von einer etwa derartigen Polare als Vergleichsbasis ausgehen.

#### 4. d) Formulierung der Kräfte von Segelflächen

Die im vorhergehenden Abschnitt erwähnte systematische Analyse der Kräfte an der Takelage muß physikalisch weitgehend gleiche Phänomene behandeln, wie die Erfassung der Kräfte am Unterwasserschiff und schließlich wie überhaupt die Kräfte an allen Arten von Körpern, die von einer Strömung schräg angeströmt werden sollen oder können. Die schiffbauliche Strömungstechnik hat so viele Anwendungsbeispiele hierfür, daß es müßig sein wird, zwischen dieser und der Strömungstechnik der Quertriebskörper nach systematischen Abgrenzungen zu suchen. Da die vollständige und ausreichende Behandlung dieses Gebietes den formellen Rahmen dieser Untersuchung sehr weit überschreiten würde, ist ein Versuch hierzu gesondert in [86] unternommen. Aus [86] — ein möglichst großer Teil der sehr umfangreichen Spezialliteratur zur Strömungstechnik der Quertriebskörper ist dort angegeben — werden nur die hier zweckdienlichen Ergebnisse mit den zum leichten Überblick notwendigen Angaben übernommen.

**4. d)  $\alpha$ : Querkraft und Widerstand bei gesunder Strömung.** Die Darstellung von Querkraft (Auftrieb beim Flugzeug) und Widerstand in einer Polaren wie Bild 16 und 17 ist durch den beispielgebenden Gebrauch bei Lilienthal, Eiffel und Prandtl auch frühzeitig in die Betrachtungen über die Theorie des Segelns eingedrungen. Der Anstellwinkel des Segels  $\alpha_S$  ist bei ihrer weiteren Verwendung zur Leistungsbestimmung auch tatsächlich entbehrlich, sofern es sich nicht um die Bestimmung der Interferenz zwischen den Toppen bei Mehrmastern handelt, bei denen die Mehrdecker- oder Gitterwirkung davon beeinflusst ist, oder um die extremen Zustände bei achterlichem Wind. Es war daher naheliegend, auch bei der analytischen Darstellung der Luftkräfte das Verhältnis zwischen Querkraft und Widerstand allein zu behandeln, wie dies durch die nur für größere Seitenverhältnisse bestimmte Traglinientheorie so leicht gemacht ist. Es zeigte sich aber leider, daß für die bei den meisten Segeln gegebenen kleinen Seitenverhältnisse mit der — man möchte sagen — eingliedrigen linearen Traglinientheorie keine richtigen Ergebnisse mehr erzielt werden können (vgl. als Beispiel Bild 19). Die vor schon fast 20 Jahren begonnene Entwicklung zu praktischen Ergebnissen der auch auf kleinere Seitenverhältnisse abgestimmten Tragflächentheorie bedarf bei den bei Segeln vorkommenden großen Anstellwinkeln

gegen Luftstrom noch der Ergänzung durch ein nichtlineares zweites Glied zur Bestimmung von Querkraft und Widerstand als Funktion des Anstellwinkels  $\alpha_S$ . Da dies in noch stärkerem Maße für die Kräfte an Schiffsrümpfen der Fall ist, wird daher hier die Kennzeichnung: Wasserlinienumströmung für das lineare Glied und Spantumströmung für das nichtlineare Glied übernommen. Die mit diesen Begriffen zu verbindende anschauliche Vorstellung wird den physikalischen Grundlagen der Strömungsvorgänge einigermaßen gerecht. Für den Wasserlinienanteil gilt das Bild der Strömung mit Zirkulation (Potentialströmung und Korrektur für die Flüssigkeitsreibung) um das Profil des Segels bzw. um die Wasserlinien. Für den Spantanteil macht man sich das Bild einer von der Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit quer angeströmten Segelfläche bzw. des Rumpfes in Spantebene; der Kraftanteil ergibt sich aus dem dabei auftretenden relativ hohen Widerstand. Dieser Anteil ist an die Reibung und daraus eventuell resultierende Strömungsablösung gebunden und entfällt also bei reiner Potentialströmung.

Beim Ansatz der Kräfte ist an eine ebene und profilierte Segelfläche von beliebigem Umriß zu denken. Eine allgemeine Wölbung von etwa Kreisbogenform spielt eigentlich nur bei den Tuchsegeln eine Rolle [90]. Für die Entwicklung wichtig ist die Berücksichtigung von Spreizklappen. Damit soll die Anwendung von Spreizklappen am Segel aber nicht als Neuheit bezeichnet sein. In [84] ist das im Anfang des vergangenen Jahrhunderts mehrfach gefahrene „Querbaumleeseegel“ (athwartship-studding sail) zitiert und dargestellt. Es wurde wie eine Spreizklappe am Besan gefahren.

Wie bereits erwähnt, müssen die Beizahlen für Querkraft  $c_{QA}$  und Widerstand  $c_{WA}$  als Funktion des Anstellwinkels  $\alpha_S$  — bzw. dann auch der Wölbung  $\varphi_S$  und des Klappenwinkels  $\beta_k$  — dargestellt werden, um möglichst einfache Zusammenhänge zu erhalten. Aus [86] wird entnommen:

Die Querkraftbeizahl ist die Summe von „Wasserlinienanteil“ und „Spantanteil“.

$$c_{QA} = c_{QA_w} + c_{QA_s} \tag{79}$$

Der Wasserlinienanteil enthält die „linearen“ Anteile infolge Anstellwinkel  $\alpha_S$ , Wölbung  $\varphi_S$  und Klappenwinkel  $\beta_k$ ; vgl. hierzu Bild 18.

$$c_{QA_w} = a_{w\alpha} \cdot \sin \alpha_S + a_{w\varphi} \cdot \varphi_S \cdot \cos \alpha_S + a_{w\beta} \cdot \beta_k \cdot \cos \alpha_S \tag{80}$$

Der Koeffizient des „Wasserlinien-Anstellwinkelanteils“  $a_{w\alpha}$  ist durch die recht treffsichere Näherungsformel

$$a_{w\alpha} = \frac{2\pi}{(1 + \tau) \frac{2}{A_S} + \frac{\eta_\kappa}{\eta_\alpha} \sqrt{1 + \frac{4}{A_S^2} + \frac{1 - \eta_\kappa}{\eta_\alpha}}} \tag{81}$$

darstellbar. Die Quertriebsfaktoren  $\eta_\alpha$  und  $\eta$  berücksichtigen die Abweichungen, die sich bei einem Segelprofil in realer Strömung gegenüber einer dünnen Platte in reibungsfreier Strömung ergeben. Die Indizes „ $\alpha$ “ und „ $\kappa$ “ weisen auf die Wirkung infolge reiner Schräganströmung mit  $\alpha_S$  bzw. reiner Stromlinienkrümmung mit  $\kappa = L_S/R$  hin. Der Faktor  $(1 + \tau)$  soll in gewohnter Weise den Einfluß der Abweichungen vom elliptischen Flächenumriß auf den induzierten Anstellwinkel  $\alpha_i$  berücksichtigen. Bei der „elliptischen, idealen, dünnen Platte“, dem idealen Normalfall, werden alle diese Fak-

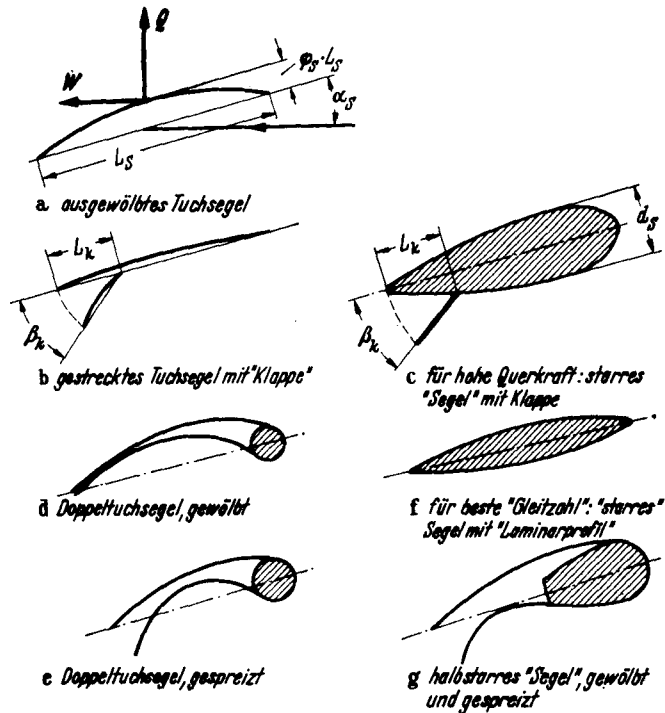


Bild 18. Formen und Bezeichnungen bei Segelprofilen.

toren zu 1, und man erhält Gl. (81) in der Form, wie sie den unabhängigen Entwicklungen von Helmbold, Multhopp oder Schlichting entspricht.

$$a_{w\alpha} = \frac{2\pi}{\frac{2}{A_S} + \sqrt{1 + 4/A_S^2}} \quad (81a)$$

Der Koeffizient des „Wasserlinien-Wölbungsanteils“  $a_{w\varphi}$  kann in Verbindung mit Gl. (81) ausgedrückt werden durch:

$$a_{w\varphi} = \frac{\eta_\varphi}{\eta_\alpha} \cdot 2 \cdot a_{w\alpha}. \quad (82)$$

Dabei ist  $\eta_\varphi^2$  der Quertriebsfaktor für die Wölbungswirkung. Setzt man alle Faktoren wieder mit 1 an und benutzt Gl. (81a), so ergibt sich:

$$a_{w\varphi} = \frac{4\pi}{\frac{2}{A_S} + \sqrt{1 + 4/A_S^2}} \quad (82a)$$

Der Koeffizient des „Wasserlinien-Klappenanteils“  $a_{w\beta}$  enthält nun noch einen Quertriebsfaktor für die Klappenwirkung  $\eta_\beta$  und kann damit — wieder unter Verwendung von Gl. (81) — formuliert werden.

$$a_{w\beta} = \frac{\eta_\beta}{\eta_\alpha} \cdot a_{w\alpha} \cdot \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \beta} \right). \quad (83)$$

Dabei ist der auch von der Behandlung von „Klappenflügeln“ bei größerem Seitenverhältnis her bekannte Gradient  $\partial \alpha / \partial \beta$  dann nur noch eine Funktion vom Klappenwinkel  $\beta_k$ , dem Klappenlängenverhältnis  $L_k/L_S$  und der Form des Segelprofils, die besonders durch das Dickenverhältnis  $d_S/L_S$  gekennzeichnet ist; vgl. Bild 18.

Bei der Formulierung des Wasserlinienanteils der Kräfte ist das unendlich große Seitenverhältnis Grenzwert, Wirkungsmaximum und zugleich Grundlage. Für die Formulierung des Spantanteiles der Kräfte ist es dagegen das Seitenverhältnis Null, das die Grundlage darstellt. Für Seitenverhältnis Null sind zum ersten Male von Flügel — und unabhängig davon wenig später von Betz — die Kräfte berechnet worden. Bollay hat beide Anteile in einen verarbeitet, allerdings ohne Erfolg für die praktische Anwendbarkeit. Später hat man die Kräfte — mit und ohne „Erfahrungsfaktor“ — für Seitenverhältnis Null zu denen des Wasserlinienanteils hinzugeschlagen. Der genannte Erfahrungsfaktor ist nichts weiter als die einfachste Darstellung der zwischen Wasserlinien- und Spantumströmung bestehenden Interferenz. Die in Gl. (84) gegebene Gesamtformulierung für den „Spantanteil“ einschließlich Interferenz geht von folgendem Bild aus. Der Wasserlinienanteil der Querkraft ergibt „auf der Fläche“ eine induzierte Querstromgeschwindigkeit von der Größe  $v \cdot \operatorname{tg} \alpha_i$ , die entgegen der Querkraft gerichtet ist. Unmittelbar neben — bzw. oberhalb und unterhalb — der Fläche wird dadurch eine gleich große entgegengerichtete Querstromgeschwindigkeit induziert. Die Vorstellung ist nun die, daß der Spantanteil der Kräfte zu behandeln ist bei einer Fläche, die mit einer Geschwindigkeit  $v$  unter einem Anstellwinkel  $\alpha_S$  angeströmt wird und die zugleich von einem dazu senkrechten Strahl in Richtung der Querkraft angeblasen wird. Der Strahlquerschnitt ist dabei gleich dem Querschnitt der mit Geschwindigkeit  $v$  strömenden Luftmenge, die vom Wasserlinienanteil sekundlich erfaßt wird. In dem Bild der Tragflächentheorie für elliptische Auftriebsverteilung ist diese Menge ja  $v \cdot h_S^2 \cdot \pi/4$  ( $h_S$  gleich Segelhöhe, entsprechend dem aerodynamischen Begriff „Spannweite“). Je nach dem Verhältnis dieser Querschnittsfläche zur Segelfläche ist zur Bestimmung der effektiven „Zusatzgeschwindigkeit“ die Querstromgeschwindigkeit in Querkraftrichtung noch zu reduzieren. Wenn man die von Lock für die Anwendung bei Windkanalkorrekturen gemachten Angaben in ihrer Gültigkeit bis zum Falle des Auftreffens eines Strahles auf eine große Platte erweitert, erhält man die in Gl. (84) einzufügende Formulierung für das Produkt aus „Reduktionsfaktor der Interferenz“  $\eta_i$  und induziertem Anstellwinkel  $\operatorname{tg} \alpha_i$ .

$$c_{QAs} = c_{wQ\infty} \left\{ \left( 1 - \frac{L_k}{L} \right) (\sin \alpha_S + \eta_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \cos \alpha_S)^2 \cos \alpha_S \right. \\ \left. + \frac{L_k}{L} [\sin (\alpha_S + \beta_k) + \eta_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \cos (\alpha_S + \beta_k)]^2 \cdot \cos (\alpha_S + \beta_k) \right\} \quad (84)$$

$$\eta_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{[a_{w\alpha} \cdot \sin \alpha_S + a_{w\varphi} \cdot \varphi_S + a_{w\beta} \cdot \beta_k]}{\sqrt{\pi^2 A_S^2 + 4\pi A_S}}. \quad (85)$$

Der die Größe von  $c_{QA_s}$  entscheidend bestimmende Beiwert  $c_{WQ_\infty}$  ist die Widerstandsbeizahl der quer angeströmten Segelfläche bei zweidimensionaler Strömung. Dieser Beiwert ist um etwa 70% größer als bei der dreidimensionalen Queranströmung der Segelfläche. Durch das Vorhandensein der Wasserlinienumströmung entstehen aber Umströmungsverhältnisse für die Spantumströmung, die der zweidimensionalen Umströmung (Seitenverhältnis Null) entsprechen.  $c_{WQ_\infty}$  ist von der Querschnittsform des Segels abhängig — Profilschnitt in Richtung der Höhe — und erreicht normalerweise den Wert 2,0. In vielen Fällen werden gröbere und einfachere Näherungen für den Spantanteil genügen. Dann kann man Gl. (84) aufspalten in Einzeleinflüsse in der Art, wie sie in Gl. (80) für den Wasserlinienanteil formuliert sind. Man würde dann schreiben:

$$c_{QA_s} = a_{s\alpha} \cdot \sin^2 \alpha_S \cdot \cos \alpha_S + a_{s\varphi} \cdot \varphi_S^2 + a_{s\beta} \cdot \sin^2 \beta_k. \quad (86)$$

Die Koeffizienten ergeben sich je nach der Art der Vernachlässigungen, die dabei natürlich gemacht werden müssen aus Gl. (84).

Auch die Widerstandsbeizahl wird zur Berechnung in einzelne Teile aufgegliedert:

$$c_{WA} = c_{WA0} + c_{WAQ} = c_{WA0} + c_{WA_w} + c_{WA_s}. \quad (87)$$

Der Widerstand ohne Querkraft kann aus dem Oberflächenreibungsbeiwert  $c_r$ , dem Verhältnis von gesamter Oberfläche der Besegelung  $O_S$  zur Segelfläche  $F_S$  und den Erhöhungsverhältnissen für endliche Dicke, Wölbung und Klappenausschlag bestimmt werden. Dabei ist  $c_r$  selbst und mindestens die Erhöhung für die endliche Dicke noch vom Seitenverhältnis  $\Lambda_S$  abhängig. So kann Gl. (88) angesetzt werden:

$$c_{WA0} = \frac{O_S}{F_S} \cdot c_r \left[ 1 + \frac{\partial c_{WA0}}{\partial (d_S/L_S)} \cdot \frac{d_S}{L_S} + \frac{\partial c_{WA0}}{\partial \varphi} \cdot \varphi_S + \frac{\partial c_{WA0}}{\partial \beta} \cdot \beta_k \right]. \quad (88)$$

Der Wasserlinienanteil des Widerstandes infolge Querkraft besteht aus dem induzierten Widerstand und dem Profilwiderstand. Beide Teile sind von der Querkraft insgesamt bestimmt, so daß sich die einzelnen Anteile nicht trennen lassen. Der Profilwiderstand ist vom Seitenverhältnis unabhängig. Bei Berücksichtigung von Wölbung und Klappenausschlag ergibt sich Gl. (89):

$$c_{WA_w} = c_{QA_w}^2 \left[ \frac{1 + \sigma}{\pi \cdot \Lambda_S} + \left( \frac{\partial c_{WAP}}{\partial c_{QA}^2} \right)_0 + \frac{\partial \left( \frac{\partial c_{WAP}}{\partial c_{QA}^2} \right)}{\partial \varphi} \cdot \varphi_S + \frac{\partial \left( \frac{\partial c_{WAP}}{\partial c_{QA}^2} \right)}{\partial \beta_k} \cdot \beta_k \right]. \quad (89)$$

Der Spantanteil des Widerstandes muß analog zum Spantanteil der Querkraft formuliert werden, um die Interferenz mit dem Wasserlinienanteil auch hier berücksichtigen zu können.

$$c_{WA_s} = c_{WQ_\infty} \cdot \left\{ \left( 1 - \frac{L_k}{L} \right) [\sin \alpha_S + \eta_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \cos \alpha_S]^2 \sin \alpha_S + \frac{L_k}{L} [\sin (\alpha_S + \beta_k) + \eta_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \cos (\alpha_S + \beta_k)]^2 \cdot \sin (\alpha_S + \beta_k) + 16 \cdot \varphi^3 \right\}. \quad (90)$$

In nicht ganz allgemeinen Fällen, bei denen man gewisse Vernachlässigungen machen kann, kann man die Spantanteile summieren nach Art von Gl. (91), was von Fall zu Fall als Näherung aus Gl. (90) abgeleitet werden muß.

$$c_{WA_s} = a_{s\alpha} \cdot \sin^3 \alpha_S + w_{s\varphi} \cdot \varphi_S^3 + a_{s\beta} \cdot \beta_k^3. \quad (91)$$

**4. d)  $\beta$ : Der Einfluß von Strömungsablösung.** Der Einfluß einer Strömungsablösung wirkt sich unmittelbar auf die Wasserlinienanteile der Kräfte aus. Die Spantanteile der Kräfte werden sowohl unmittelbar — dadurch, daß jetzt an allen Kanten der Segelfläche und nicht mehr nur an den Seitenkanten Ablösung auftritt — wie auch mittelbar über die durch verminderten Wasserlinienanteil verringerte Interferenz betroffen. Dennoch „leidet“ der Spantanteil naturgemäß weniger unter der Ablösung — völlig ohne Ablösung würde er ja überhaupt nicht auftreten — als der Wasserlinienanteil. So ist also auch als Strömungsablösung im Sinne dieser Abschnittsüberschrift nur die Ablösung — und zwar die nachhaltige — an Vorderkante und Hinterkante der Segelfläche zu verstehen. Eine örtlich begrenzte Ablösung, wie sie an der Vorderkante spitznasiger dünner Profile und Platten auftritt, hat ja

nicht die Wirkung einer Ablösung in diesem Sinne hier, sondern gleicht mehr nur die „Mängel“ solcher Profilierung in freundlicher — d.h. quertrieberhaltender — Weise aus.

Die im vorhergehenden Abschnitt verwendeten Formulierungen für die Kräfte sind geeignet, auch den Einfluß der Strömungsablösung schematisch zu verfolgen. Es soll dabei von einem bestimmten

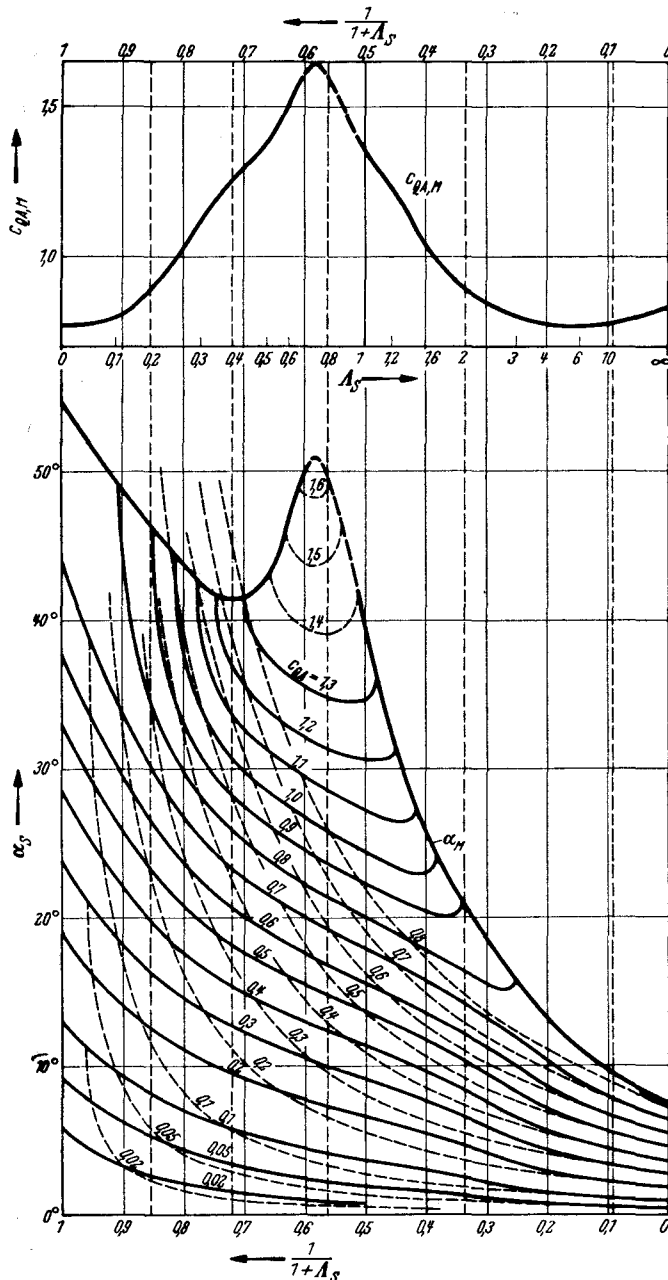


Bild 19. Querkraftbeizahlen  $c_{QA}$  und Anstellwinkel  $\alpha_s$  abhängig vom Seitenverhältnis  $A_s = h_{gs}/F_g$ . — nach Messungen an Rechteckplatten von Flachsbar, Flügel, Scholz und Winter. — nach Traglinientheorie.

Segelprofil mit vorgegebener Wölbung  $\varphi_s$  und festem Klappenwinkel  $\beta_k$  ausgegangen werden. Durch Steigerung des Anstellwinkels  $\alpha_s$  ergibt sich im Bereich gesunder Strömung eine entsprechende Erhöhung der Querkraft, nämlich proportional dem Sinus des Winkels bei unendlich großem Seitenverhältnis und etwa proportional dem Winkel selbst bei kleineren Seitenverhältnissen  $\alpha_s$ . Dabei wächst das Druckminimum auf der Unterdruckseite der Fläche ebenfalls — und zwar stärker als linear — so weit an, daß der dem Minimum zwangsläufig nach der Hinterkante der Fläche zu folgende Druckanstieg eine Ablösung der Grenzschicht zur Folge hat. Diese Ablösung kann das effektive Profil der Fläche so deformieren, daß der mit Zirkulation verbundene Quertrieb — das ist sein Wasserlinienanteil — teilweise oder völlig verschwindet. Diese teilweise Ablösung kann sich sowohl auf Teilgebiete in Richtung der Segelhöhe wie in Richtung der Segellänge beziehen. Nach ihrer charakteristischen Auswirkung können drei Ablösungszustände beschrieben werden:

Schwache Teilablösung mit erhaltener aber merklich verminderter Quertriebszunahme mit dem Anstellwinkel. Der hier mit dem Kenn-Index ( $B$ ) (vgl. Bild 20) zu kennzeichnende Beginn der Ablösung prägt sich sehr oft im Bild der Polare bzw. der Darstellung  $c_{QA}(\alpha_s)$  recht deutlich durch einen Buckel aus; er ist bei einer Analyse mit Hilfe der im vorhergehenden Abschnitt angegebenen Formel immer zu erkennen (Bild 20).

Starke Teilablösung folgt der schwachen und vermindert den Quertrieb mit der Anstellwinkelzunahme. Mit dem Maximum ( $M$ ) der Querkraft beginnt dieser Zustand. Er ist durch große Unstabilität der Erscheinungen und Wirkungen gekennzeichnet. Während ja das Maximum durch seine Definition immer klar ersichtlich ist, ist es das Ende dieses Zustandes nicht. Es ist jedoch ebenfalls durch eine formale Analyse, und zwar eine sehr viel einfachere zu bestimmen (Bild 20).

Volle Ablösung ( $V$ ) beginnt mit dem Aufhören jeglichen Wasserlinienanteiles der Kräfte und umfaßt das Gebiet der sehr hohen Anstellwinkel einschließlich der Queranströmung.

Im allgemeinen folgen die drei beschriebenen Zustände einander. Die schwache Teilablösung ist prinzipiell mit den in Gl. (79) bis (91) angegebenen Formeln zu verfolgen. Die Wirkungsfaktoren  $\eta$



Seitenverhältnis erreicht. Bei  $54,7^\circ$  liegt das Maximum vom Spantanteil des Quertriebes bei konstantem Interferenzfaktor  $\eta_i$ . Bei sehr kleinen Seitenverhältnissen wird dann für das Gesamtmaximum das Maximum des Spantanteils maßgebend und der Wasserlinienanteil unbedeutend, so daß das Maximum schließlich auf den Wert für den Körper mit Seitenverhältnis Null abfällt. Der in dem Teil oft nicht ganz stetige Verlauf des Abfalls — vgl. den Verlauf von  $\alpha_M$  — dürfte auf dann maßgebend werdende Teilablösungen der Wasserlinienströmung zurückzuführen sein.

Die Übereinstimmung von Rechnung und Versuchsergebnis wird besser, wenn man berücksichtigt, daß sich — z. B. bei der Platte — der Winkel  $\alpha_{M\infty}$  mit einer negativen Wölbung verringert. Dadurch verstärkt sich die oben beschriebene Wirkung. In Gl. (92a) ist dem durch Einführen einer experimentell zu bestimmenden Zahl  $m$  Rechnung getragen. Eine bessere Näherung erhält man mit Gl. (93).  $\partial \alpha_{M\infty} / \partial \varphi$ , den Gradienten dieser Anstellwinkelveränderung bei unendlichem Seitenverhältnis, kann man systematischen Unterlagen der Aerodynamik entnehmen.

$$\frac{c_{Qw, M}}{c_{Qw, M\infty}} = \frac{1 + \Lambda/2}{1 + \sqrt{1 + m \cdot \Lambda^2/4}} \quad (92a)$$

$$\frac{c_{Qw, M}}{c_{Qw, M\infty}} = \frac{1 + \Lambda/2}{1 + \sqrt{1 + \Lambda^2/4}} \left[ 1 + \left( 0,5 + \frac{\eta_\alpha}{\Lambda} \right) \left( \frac{\partial \alpha_{M\infty}}{\partial \varphi} \right) \right] - \left( 0,5 + \frac{\eta_\alpha}{\Lambda} \right) \left( \frac{\partial \alpha_{M\infty}}{\partial \varphi} \right). \quad (93)$$

Die Berechnung der Kräfte bei voller Ablösung geschieht ebenfalls mit dem in Gl. (79) bis (91) angegebenen Formelsystem. Der Wegfall aller Glieder für die Wasserlinienumströmung ergibt die bereits erwähnte Vereinfachung der Berechnung. Es entfällt ja auch die Interferenz zwischen Wasserlinien und Spantumströmung; es ist jedoch in den Gleichungen (84) und (90) an Stelle der Beizahl  $c_{wQ\infty}$  für den Queranströmungswiderstand bei zweidimensionaler Strömung jetzt die Beizahl  $c_{wQ}$  für den bei dreidimensionaler Strömung mit dem Seitenverhältnis der Segelfläche  $\Lambda_S$  einzusetzen. Wegen des Aufhörens der Wasserlinienumströmung kann die Segelfläche nicht mehr — unter dem Gesichtspunkt der Spantumströmung — als ein aus einer unendlich langen Segelfläche herausgeschnittener Streifen aufgefaßt werden, dessen Widerstandsbeizahl die gleiche wie die des unendlich langen Segels (vom Seitenverhältnis Null), nämlich  $c_{wQ\infty}$  ist. Die Abhängigkeit der Beizahl  $c_{wQ}$  vom Seitenverhältnis unmittelbar ist außer vom Querschnitt, der für Segel praktisch immer als der einer relativ dünnen Platte angesehen werden darf, auch vom Umriß des Segels beeinflußt. Um diese Zusammenhänge formal etwas durchsichtiger darstellen zu können, sind einige dimensionsanalytische Überlegungen angestellt worden, deren Ergebnisse mit denen von Versuchen etwa ebensogut wie diese untereinander übereinstimmen.

Eine querangeströmte Fläche von beliebigem Umriß erlaubt ohne sonstige Angaben keine eindeutige Definition für den Begriff des Seitenverhältnisses, da die für die Bildung dieses Verhältnisses (Längequadrat/Fläche) richtige Länge nicht ohne weiteres ersichtlich ist. Außer der Fläche bleibt als Abmessung nur der Umfang klar definierbar. Am Umfang der Fläche entsteht eine zur Ablösung führende hohe Übergeschwindigkeit, die auf der Rückseite der Fläche einen Unterdruck aufbaut, der den gesamten Widerstand weitgehend bestimmt. Je mehr Umfang auf die Flächeneinheit bezogen vorhanden ist, desto stärker ist der Einfluß der Übergeschwindigkeiten am Rand auf den Unterdruck und damit den Widerstand zu erwarten. Da es sich sozusagen um die Stirnfläche des Unterdruckgebietes handelt, die den Widerstand und bezogen auf die Segelfläche selbst dessen Beizahl  $c_{wQ}$  bestimmen mag, so kann eine Proportionalität des Widerstandes mit dem Quadrat des Umfangs dann erwartet werden, wenn die Größe der Übergeschwindigkeit selbst unabhängig vom Umriß der Fläche ist. Da dies bei einigermaßen scharfkantigen Flächen mäßiger Dicke bei allen Seitenverhältnissen immer erfüllt ist, trifft das in dem Falle — und z. B. auch bei unterkritisch angeströmten Kreiszyklindern — auch wirklich zu. Formel (94) ist mit der angegebenen Begrenzung auf den Maximalwert  $c_{wQ\infty}$  in guter Übereinstimmung mit Experimenten an Rechteck-, Kreis-, Kreisring- und anderen Platten sowie an sehr weitmaschigen flachen Gittern. Entsprechendes gilt für Gl. (95).

$$\begin{array}{l} \text{Rechteckige Querschnitte, auch bei sehr großen} \\ \text{ds/h_s, bei allen Reynoldszahlen} \end{array} \quad c_{wQ} = 1 + 0,0064 \cdot \frac{U_S^2}{F_S} \leq 2,0 \quad (94)$$

$$\begin{array}{l} \text{Halbkreisförmige Querschnitte (Spanten), bei} \\ \text{unterkritischen Reynoldszahlen} \end{array} \quad c_{wQ} = 0,67 + 0,0028 \cdot \frac{U_S^2}{F_L} \leq 1,2 \quad (95)$$

Damit sind Grundlagen aufgezeigt, um die Kräfte am Segel auch bei „voller Ablösung“ berechnen zu können. Bei der Besprechung der „idealen Polare“ für Entwicklungsgrenzen ist auf den Effekt einer starken Unterteilung der Segelfläche in dem Bereich der Polare bereits hingewiesen worden, was aus dem hier ausgeführten auch formal ersichtlich werden mag. Es sei abschließend lediglich bemerkt,

daß eine gewisse weitere Steigerung des hier so wichtigen Wertes  $c_{WQ}$  noch über den Endwert für ebene Flächen  $c_{WQ\infty} = 2$  hinaus durch Wölbung der Fläche durchaus möglich ist. Eine Erhöhung auf 2,3 ist bereits experimentell bestätigt.

**4. d)  $\gamma$ : Erfassung der Kräfte für die praktischen Bedürfnisse der Segelmechanik.** In den beiden vorhergehenden Abschnitten ist gezeigt worden, wie man die Polare für eine Besegelung mit verhältnismäßig wenig experimenteller Stützung — und diese nur aus grundlegendem aerodynamischem Material — auch ohne spezielle Versuche mit Besegelungen ermitteln kann. Auch können damit Variationen in der Form schnell verfolgt werden. Gegenüber dem bisher meist verwendeten Verfahren der Benutzung von speziellen Modellversuchen ergibt sich der Vorzug, gerade für die Entwicklung geschaffene Takelageprojekte noch vor Durchführung von Versuchen glaubwürdig durchrechnen zu können und in verschiedener Weise auf aussichtsreiche Veränderungen hin zu prüfen. Es bleibt dabei für den Einzelfall noch völlig offen, ob man in die Leistungsrechnung zur schließlichen Bestimmung der Fahrtgeschwindigkeit mit den dargestellten Formeln unmittelbar eingehen will, oder ob man sich lediglich mit diesen Formeln die Polare berechnet, diese graphisch darstellt und von dieser dann die Beiwerte abgreift und in die weitere Rechnung einführt. Über die Zweckmäßigkeit beider Verfahren muß von Fall zu Fall nach der Aufgabenstellung entschieden werden. Die erste unmittelbare Methode dürfte aber oft numerisch derartige Schwierigkeiten bereiten, daß sie praktisch wohl auf Fälle, bei denen mehr oder weniger starke Vereinfachungen im Formelansatz zulässig sind, beschränkt bleiben wird.

Nur in Sonderfällen wird man von dem hier befolgten Gebrauch, Luftkraft insgesamt mit der Luftkraft der Besegelung gleichzusetzen, abweichen müssen. Wenn das Überwasserschiff auch ohne die Takelage bereits derartige Flächen bietet, daß eine deutliche Beeinflussung der Kräfte der Besegelung zu erwarten ist, können die Kräfte für das Überwasserschiff unter weitgehend vereinfachenden Ansätzen für die Berücksichtigung der einzelnen Bauteile nach prinzipiell der gleichen Weise wie die Besegelung auch behandelt werden. Der Wasserlinienanteil der Kräfte tritt in diesem Falle weitgehend oder völlig hinter dem Spantanteil in seiner Bedeutung zurück. Nimmt das feste Überwasserschiff aus besonderen Gründen erhebliche Dimensionen besonders auch in der Höhe an, was seinen Extremwert etwa in der Anordnung fester schlanker Stromlinienmasten mit großer „Lateralfäche“ oder beim Maschinenschiff unter Umständen durch einen extremen Schornstein erreichen kann, so wird auch der Wasserlinienanteil der Kräfte bedeutend. Der Fall des festen Stromlinienmastes berührt dann schon den des Segelschiffes mit mittschiffs dicht geholten Segeln. Dieser seltene Spezialfall der Segelmechanik, den man als „Segeln mit großem Wind-Lateralplan“ bezeichnet, soll hier nicht weiter erörtert werden, da er nur einen etwas vereinfachten Spezialfall der allgemeineren Segelmechanik darstellt.

Bei der weiteren Anwendung der in Form der Segelpolare gewonnenen Kräfte der Besegelung ist die Wahl des optimalen Polarenpunktes für die gegebene Vortriebsaufgabe der leitende Gesichtspunkt. Gewiß kann man natürlich mit einem beliebigen Punkt der Polare, wie er z. B. in Bild 20 mit  $c_{QA}$  und  $c_{WA}$  vermaßt ist, bei einem ganzen Bereich verschiedener Luftblasewinkeln  $\chi_A$ , die die Vortriebsaufgabe am besten kennzeichnen, einen Vortrieb erzielen und also segeln. Jedoch geht bereits aus den dynamischen Untersuchungen in Abschnitt 3 hervor, daß bei gegebenen Eigenschaften des Unterwasserschiffes und gegebenem  $\chi_A$  der größtmögliche Vortrieb nur bei einem ganz bestimmten Punkt der Polare zu erzielen ist. Zur eindeutigen Festlegung — fast möchte man sagen Definition — dieses Punktes ist die Ableitung  $\partial c_{QA}/\partial c_{WA}$  sehr geeignet. Für die Fahrtberechnung eines bestimmten Segelfahrzeuges wird man am besten die Vortriebskraft — repräsentiert durch den in Gl. (46) definierten Verhältniswert  $f$  — für eine Reihe von Werten  $\partial c_{QA}/\partial c_{WA}$  berechnen, für die sich dann bei gegebenem Unterwasserschiff umgekehrt der optimal zugehörige Winkel  $\chi_A$  und damit auch der Kurswinkel zum wahren Wind  $\chi_W$  ergeben. Besonders wertvoll ist die Methode auch beim Vergleich verschiedener Besegelungsformen bei gleichem Unterwasserschiff. Diese verschiedenen Formen werden natürlich verschiedene Segelpolaren ergeben, und man braucht jetzt einfach nur diese beiden Polaren folgerichtig zu vergleichen, wenn man nur stets bei gleichen Gradienten  $\partial c_{QA}/\partial c_{WA}$  die Größe der zugehörigen Beizahlen betrachtet.

Um den Rechenaufwand nicht uferlos werden zu lassen, muß man allerdings bei der Optimalauswahl aus der Segelpolare von einem konstanten Verhältnis, Wasserquerkraftwiderstand zu Wasserquerkraft, ausgehen wie es 3. d)  $\beta$ : bereits zugrunde gelegt ist. In 3. d)  $\gamma$ : ist skizziert, wie man durch Iteration mit einer Veränderlichkeit dieses Verhältnisses fertig werden kann, ohne die vollständigen Beziehungen für Luftkräfte und Wasserkräfte in die dynamischen allgemeinen Grundgleichungen (39) und (41) einzusetzen und dann durch Differentiation eine einwandfreie Optimalbedingung für  $\partial c_{QA}/\partial c_{WA}$  ableiten zu müssen. Diese streng genommen also nur angenäherte Optimalauswahl gestattet aber, aus den Beiwerten  $c_{QA}$  und  $c_{WA}$  der Segelpolare einen einzigen Beiwert „ $\alpha$ “ abzuleiten, der für gegebene

Vortriebsaufgaben und Qualifikation des Unterwasserschiffes der Vortriebskraft in Form des Beiwertes  $f$  direkt proportional ist. Dabei ist  $a$  nach Bild 20 durch Gl. (96) bestimmt.

$$a = c_{QA} - \frac{\partial c_{QA}}{\partial c_{WA}} \cdot c_{WA}. \quad (96)$$

Wegen der Bedeutung dieses Wertes für die Beurteilung der Segelpolare wird die Ableitung der damit aufgestellten Vortriebsbeziehung unter Vorwegnahme aus dem Hauptabschnitt 7 bereits hier eingefügt. Formt man nämlich Gl. (47) ein wenig auf der rechten Seite um in ein Glied  $c_{WA}$  und eins mit  $-c_{QA}$  und schreibt Gl. (68) mit  $\sin \chi_A$  und  $\cos \chi_A$ , so gewinnt man aus der Verbindung beider Beziehungen

$$f \cdot \frac{v_H^2}{v_A^2} = \left[ -c_{QA} - c_{WA} \left( \frac{\partial -c_{QA}}{\partial c_{WA}} \right) \right] \left[ \sin \chi_A \mp \left( \varepsilon_{SI} \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cos \chi_A \right],$$

woraus mit Gl. (96) dann Gl. (97) folgt. Der Vorzeichenwechsel von minus auf plus muß dann erfolgen, wenn die Wasserquerkraft ihr Vorzeichen von plus auf minus wechselt.

$$f = (-a) \cdot \frac{v_A^2}{v_H^2} \left[ \sin \chi_A \mp \left( \varepsilon_{SI} \frac{h_M}{s_M} + \varepsilon_{QH} \right) \cos \chi_A \right]. \quad (97)$$

Der mit (0) gekennzeichnete Punkt der Polare in Bild 20, für den  $a$  gerade zu Null geworden ist, gibt also den theoretischen Anfang des für den Vortrieb nutzbaren Bereiches der Polare. Für den Punkt (Q) der Polare ist die Verwendung von  $a$  natürlich unzweckmäßig, da dann in Gl. (97) das Produkt Null mal Unendlich entsteht. Die bisherigen Beziehungen sind dann klarer.

#### 4. e) Einfluß von Windverteilung und Interferenz der Besegelung

Die aerodynamische Behandlung der Besegelung wird aus Gründen der Einfachheit wohl immer wie auch hier davon ausgehen, daß das Segel sich im unbegrenzten Medium Luft befindet. In Wirklichkeit sind auch die größten Segel noch immer so klein im Verhältnis zur Grenzschichthöhe des natürlichen Windes über See und ganz besonders über Land, daß der Einfluß einer Ungleichmäßigkeit des Windes mit der Höhe zumindest im allgemeinen Fall bedacht werden muß. Über die Natur der Windverteilung mit der Höhe wird in [85] ein für die Zwecke der Segelmechanik wohl hinreichende Zusammenstellung gegeben. Je nach dem örtlich und zeitlich bedingten Charakter der Luftströmungen können sich recht verschiedenartige Windprofile ergeben. Eine möglichst genaue Aufmessung von solchen Windprofilen ist daher ebenso schwierig wie müßig für die Zwecke der Seglerleistung. Interessanter sind schon die äußersten Grenzwerte der beobachteten Gradienten der Windzunahme mit der Höhe. Und da kann man etwa unterstellen, daß das Windverhältnis (Höhenwind zu Bodenwind) mindestens mit der 8. Wurzel und höchstens mit der 5. Wurzel aus dem Höhenverhältnis anwächst.

Es ergeben sich hieraus unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten für verschieden hohe Takelagen. Weiter ergibt sich eine Verschiebung der Luftkraftverteilung nach oben durch die oben dann größeren Geschwindigkeiten  $v_A$ , was sich bei kleinen Verhältnissen von Fahrtgeschwindigkeit zu Windgeschwindigkeit am stärksten auswirkt. Im gleichen Sinne beim nichtverwundenen Segel wirkt die durch Vergrößerung von  $\chi_A$  sich oben ergebende Vergrößerung des Anstellwinkels  $\alpha_s$ . Das geometrisch unverwundene Segel erfährt also gewissermaßen eine aerodynamische Verwindung. Dies bedeutet praktisch z. B., daß ein unverwundenes Segel den nach der grundlegenden Polare sich ergebenden maximalen Quertriebswert nicht erreichen kann, da wegen der aerodynamischen Verwindung die Ablösung an einem Teil des Segels, und zwar oben schon früher beginnt. Das spricht also z. B. gegen die Verwendung von starren Segeln bei relativ zum Wind langsamen Fahrzeugen. Die schon frühzeitige Erkenntnis und auch Verwendung dieser Einflüsse ist durch die Arbeiten von v. Schulmann belegt und — wohl aus dem Unbewußten allmählich erkannt und gepflegt — in der Praxis der Segelführung auf großen Seglern verwirklicht. Diese Einflüsse müssen also auch bei der Untersuchung von Weiterentwicklungen der Takelage berücksichtigt werden.

Es ist hier schon darauf hingewiesen worden, daß im Grunde als Normalfall der Besegelung nicht das Einzelsegel, sondern eine Reihe von „zusammengefügt“ Segeln gelten muß. Dennoch ist die formale Behandlung zweckmäßigerweise auf das Einzelsegel abgestellt gewesen. Das Einzelsegel ist, falls unbeschränkte Stabilität des Fahrzeuges zur Verfügung steht, am Winde sicherlich die optimale Grundform der Besegelung. Wegen des Fehlens dieser Voraussetzung in den meisten Fällen und natürlich auch aus praktischen Gründen der technischen Verwirklichung und des Betriebes setzt sich eine Besegelung aus einer mehr oder weniger großen Anzahl einzelner Segel zusammen. Dabei ist — be-

sonders deutlich durch die voll getakelten Schiffe repräsentiert — sowohl eine horizontale wie auch vertikale Unterteilung der gesamten Segelfläche in Rechnung zu stellen. Die vertikale Unterteilung ergibt sich durch die Anzahl der Masten und der zwischen und vor diesen gefahrenen Stagesegelgruppen. Die horizontale Unterteilung ist im extremen Falle durch die ganze Skala der Rahsegel vom Untersegel über geteilte Mars- und Bramsegel, Royals und Skysegel bis zum Moonsegel gegeben. Hinzu kommt ein mehr oder weniger großer „Bodeneinfluß“ durch die Nähe des Schiffsdecks bzw. bei relativ niedrigen Jachten durch die Vergrößerung dieses „Bodens“ durch die Wasserfläche selbst. Wegen der unübersichtlichen Vielzahl der sich aus diesen Bedingungen möglicherweise ergebenden Segelkonstellationen erscheint es für mehr systematische Betrachtungen nicht sinnvoll, in mühevoller Kleinarbeit eine aerodynamische Berechnung jedes einzelnen Segels durchführen zu wollen, wobei vor der Addition des Ganzen noch sämtliche Interferenzen zu berücksichtigen wären. Man wird einfacher und übersichtlicher davon ausgehen, daß es sich nur um eine einzige Segelfläche handelt, wie sich dies auch in der hier verwendeten Definition des geometrischen Seitenverhältnisses  $A_S$  der Besegelung ausdrückt. Dieses mit größter Segelhöhe und gesamter wirklicher Fläche der Besegelung gebildete rein geometrische Verhältnis wird zur Berücksichtigung der verschiedenen Unterteilungen in ein aerodynamisch wirksames Seitenverhältnis  $A_{Sw}$  abgeändert. Der Index „w“ besagt, daß es sich um ein wirksames Verhältnis handelt, und auch gleichzeitig, daß es nur den Wasserlinienanteil der Kräfte — allerdings einschließlich deren Interferenzen auf den Spantanteil — betrifft. Zunächst verdoppelt sich das Seitenverhältnis in seiner Wirkung durch den genannten Bodeneinfluß. Durch den in Wirklichkeit aber stets vorhandenen mehr oder weniger großen Spalt zwischen den Segeln nicht nur untereinander, sondern auch gegen Deck bzw. Wasserspiegel wird das Seitenverhältnis wieder stark reduziert, und zwar meist stärker als um 50%. Durch die vertikalen „Schlitze“ beim Mehrmaster ergibt sich eine gewisse Vergrößerung des wirksamen Seitenverhältnisses, so daß man zum Schluß der Betrachtung mit dem wirksamen Seitenverhältnis wieder in der Größenordnung des geometrischen gelandet ist. Wenn eine daraus zu schließende Identität beider Verhältnisse auch eine zu grobe Vereinfachung darstellen würde, so kann man daraus immerhin den beruhigenden Schluß ziehen, daß bei der Berechnung oder Beurteilung der einzelnen Einflüsse auftretende Fehler im Endeffekt nicht zu stark sich bemerkbar machen werden. In aerodynamischem — weniger praktischem — Zusammenhang hiermit steht die Frage nach der Verwendung von Endscheiben am Segel. Sie vermehren praktisch die Schwierigkeiten, die durch die hier bereits beschriebene aerodynamische Verwindung des Segels durch den Höheneffekt auftreten. Bei normalen Segelflächen mit Seitenverhältnissen von höchstens etwa 1 kann man durch Endscheiben an Widerstand sparen. Die optimale Endscheibengröße nimmt mit kleiner werdendem Seitenverhältnis zu, wie sich aus einer für die Anwendung auf Ruder bestimmten Untersuchung gezeigt hat. Hat man ein Fahrzeug mit starker Beeinflussung des Widerstandes durch das Krängungsmoment des Segeldruckes, so wird die Verwendung von Endscheiben bei der damit verbundenen geringeren Segelhöhe die Grenzen der Seitenverhältnisse für rationelle Verwendung von Endscheiben etwas heraufsetzen können. Eine weitere unter Umständen recht starke Heraufsetzung dieser Grenze ergibt sich dann, wenn durch besondere Maßnahmen am Segelprofil (Klappen oder auch beim Rotor) die Quertriebsbeizahl besonders hoch gesteigert werden kann.

Bei der Anwendung der von Gl. (79) bis (91) angegebenen Formeln wird also an Stelle von  $A_S$  das im oben beschriebenen Sinne veränderte  $A_{Sw}$  einzusetzen sein. Allerdings ist die Abschätzung von  $A_{Sw}$  streng genommen für verschiedene Anblaswinkel  $\chi_A$  verschieden vorzunehmen, da der Abstand der Masten senkrecht zur Anblasrichtung bei der Bestimmung des wirksamen Seitenverhältnisses eingeht. Eine Beeinflussung von  $c_{wQ\infty}$  durch die Interferenz der einzelnen Segelflächen und mit dem Wasserspiegel wirkt sich nur dann — und zwar immer im erhöhenden Sinne — aus, wenn der Maximalwert von  $c_{wQ\infty}$  mit 2 bzw. extrem gewölbt mit 2,3 noch nicht erreicht war. Lediglich bei vollständiger Ablösung der Wasserlinienumströmung ist zur Bestimmung von  $c_{wQ}$  das durch die Segelunterteilung sich ergebende wirkliche Verhältnis  $U_S^2/F_S$  zu bestimmen und damit  $c_{wQ}$  nach Gl. (94) z. B. zu bestimmen. Doch wird bei einer starken Unterteilung wie bei Barken, Vollschiifen und in der Weise vergleichbaren moderneren Takelagen sich nach Gl. (94) schon immer etwa der Maximalwert  $c_{wQ\infty}$  ergeben.

Auf diese Art ist es also möglich, eine auch sehr kompliziert aufgebaute Takelage durch ein Einzelsegel zu ersetzen, das streng allerdings variables Seitenverhältnis aufweist. Es war aber bereits darauf hingewiesen worden, daß auch bei Verwendung von wirklich nur einem einzigen Segel es vorteilhaft ist, durch geeignete Anordnung eine Veränderlichkeit des wirksamen Seitenverhältnisses geradezu künstlich zu erzwingen. Dies ist wohl einmal mehr eine Bestätigung dafür, daß die alten Takelagen das Ergebnis folgerichtiger Entwicklungen mit den jeweils zur Verfügung stehenden theoretischen und praktischen Mitteln gewesen sind.

#### 4. f) Segel mit Luftauftrieb und Krümmungsausgleich

Bei der Suche nach Möglichkeiten zur Steigerung der Leistung von Segelfahrzeugen sollen neben kräftig wirksamen Mitteln, wie sie vornehmlich in der Erhöhung der Querkraftbeizahlen von Segelprofilen gesehen werden kann, auch andere Maßnahmen mit positiven, wenn auch quantitativ geringeren Auswirkungen nicht übersehen werden. Hierzu gehört die Anordnung von einer oder mehreren Segelflächen in der Weise, daß die Summe der Krümmungsmomente der einzelnen Flächen verschwinden oder jedenfalls so gering wird, daß besondere Vorkehrungen zur Aufbringung von Zusatzstabilität für die Takelage entfallen können. Einen Vorschlag in der Richtung, der den Effekt durch nebeneinander nach oben einander zugeneigte Segelflächen erzielt, hat Barkla [6] gemacht. Der gleiche Effekt entsteht beim Gegeneinanderbrassen von Rahsegeln in verschiedener Höhe. Jedoch ist dies Verfahren leistungsmäßig von geringer Aussicht und dient mehr dem Stoppen als dem Vortrieb. Aus einer sinn-gemäßen Kombination beider Verfahren kann man gleichzeitig noch einen dynamischen Auftrieb des Segels erzielen. Je nach dem Seitenverhältnis und der Schrägstellung des Segels ergibt sich eine Art Gleitzahl für den so am Schiff gesparten Auftrieb. Ein Vergleich mit der Gleitzahl des Wasserwiderstandes selbst gibt dann die Beurteilung der Leistungsgüte solcher Anordnungen. Nur bei Fahrzeugen sehr hoher Geschwindigkeit, bei denen mit relativ schlechten Gleitzahlen des Wasserwiderstandes zu rechnen ist, können sich mit solchen Maßnahmen kleine Gewinne ergeben.

Schließlich sind auch Anordnungen möglich — und auch sogar schon versucht worden —, bei denen man nur dynamischen Luftauftrieb erzielt, und den mit einer Gleitzahl, die kleiner als die des Wasserwiderstandes ist. Dies kann mit einer festen „Tragfläche“ geschehen — ein mit Besegelung versehenes Flugboot wäre ein solches Fahrzeug — oder auch durch Schleppen eines Drachens. Für Fahrzeuge bei hohen Geschwindigkeiten kann unter Umständen ein gewisser Erfolg für den Antrieb dabei herauskommen. Wegen der praktischen Schwierigkeiten dürften diese Anordnungen zumindest in fester Form für Nutzfahrzeuge wohl aber ausscheiden müssen. Für Rekordfahrten von Wasserfahrzeugen ist der Drachenschlepp jedoch nicht aussichtslos, da der Drachen (Segelflugzeug) bessere Gleitzahlen als Gleit- und Tragflügelboote bei hohen Geschwindigkeiten erzielt und außerdem leichter zusätzlich zum Krümmungsausgleich benutzt werden kann. Die Schlepptrasse muß dann, je nach dem Kurs zum Wind, verschieden belegt werden.

### 5. Unterwasserschiff

Das Unterwasserschiff eines Segelfahrzeuges dient zur Bereitstellung des Auftriebes, um das Gewicht des gesamten Fahrzeuges tragen zu können, und zur Bereitstellung einer Querkraft und eines Stabilitätsmomentes, um der aus den Kräften der Besegelung sich ergebenden Querkraft und dem krügendem Moment das Gleichgewicht halten zu können. Eine verhältnismäßig knappe Behandlung des Unterwasserschiffes scheint hier gerechtfertigt, da die eine Aufgabe sich von der an ein Schiff ganz allgemein gestellten Aufgabe nicht prinzipiell unterscheidet, und da die Quertriebserzeugung prinzipiell die gleiche Aufgabenstellung wie bei der Besegelung ergibt und auch zu ihrer Behandlung sich der gleichen Methoden bedienen kann. Das, was ein Unterwasserschiff eines Segelschiffes von seiner Besegelung unterscheidet, ist also mehr durch die Zweckmäßigkeit der praktischen Ausführung als durch Unterschiede der physikalischen Voraussetzungen bedingt.

#### 5. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften des Unterwasserschiffes

Die Definition des Begriffes Unterwasserschiff ist durch seine Bezeichnung selbst gegeben. Das Gegenstück zur Segelfläche  $F_S$  der Besegelung ist hier die Lateralfläche  $F_L$  des Unterwasserschiffes, die bereits in Gl. (39) eingeführt worden ist. Als Lateralfläche wird die Summe aus eigentlicher Lateralfläche des Rumpfes im engeren Sinne, Ruderfläche und andere Flächen, wie Kiel, Flosse oder Schwert gerechnet. Die letztgenannten werden als solche von der Lateralfläche des Rumpfes im engeren Sinne nur dann unterschieden, wenn eine solche Unterscheidung sich auch rein anschaulich geometrisch aufdrängt. Bei einem großen Frachtsegler stimmt also die gesamte Lateralfläche  $F_L$  mit der des Rumpfes allein praktisch überein, da der dort vorhandene Kiel kein Kiel im Sinne dieser Unterscheidung ist und das Ruder flächenmäßig keine Rolle spielt. Umgekehrt beim Segelboot mit Unterwassertragflächen ist für den Entwurfszustand mit ausgetauchtem Rumpf das  $F_L$  nur noch von der Seitenprojektion der Tragflächen gebildet.

Der größte Tiefgang des gesamten Unterwasserschiffes  $T$  dient zur Bildung des Seitenverhältnisses des Lateralplanes  $A_L = 2 \cdot T^2/F_L$  in Analogie zu dem der Besegelung. Der Faktor 2 tritt hinzu, um

die „hydrodynamische Spiegelung“ der ganzen Anordnung an der Wasseroberfläche von vornherein zu berücksichtigen, wie dies bei ähnlichen Aufgaben mit an der Wasseroberfläche schwimmenden Körpern z. B. bei der Untersuchung von Steuereigenschaften ebenfalls geschieht. Die Länge des Unterwasserschiffes in der Schwimmlinie  $L_{WL}$  dient der Bestimmung der Reynoldszahl, die mit der Fahrtgeschwindigkeit  $v_H$  und der kinematischen Zähigkeit des Wassers  $\nu_H$  zu bilden ist. Da zur Bewertung experimenteller Bedingungen oder Entwurfsaufgaben eine orientierende Beziehung für die Reynoldszahl meist genügt, sei bemerkt, daß bei gleichen Längen und Geschwindigkeiten sich im Wasser gerade die zehnfachen Reynoldszahlen wie in Luft ergeben. Genau gilt das mit

$$\text{Re}_{\text{Wasser}} = \frac{v_H \cdot L_{WL}}{\nu_H} = 0,75 \cdot 10^6 \quad (98)$$

bei einer Temperatur von  $3,3^\circ \text{C}$  in Wasser und  $9,3^\circ \text{C}$  in Luft (vgl. Bild 15).

### 5. b) Form und Größe des Unterwasserschiffes

Die Form des Unterwasserschiffes ergibt sich sinngemäß aus seinen genannten Aufgaben, der Auftriebserzeugung, der Querkrafterzeugung und der Stabilitätssicherung. Auftrieb und Stabilität können durch statische wie auch durch dynamische Kräfte sichergestellt werden, der Quertrieb nur durch dynamische. Welche Art der „Krafterzeugung“ sinnvollerweise zu wählen ist, bestimmt der „Wirkungsgrad“ der Methode, also das Verhältnis des mit der gewünschten Krafterzeugung verbundenen unerwünschten Widerstandes. So sind also alle Arten von Schiffskörpern, die überhaupt für Wasserfahrzeuge in Betracht kommen, auch für Segelschiffe zu gebrauchen bzw. denkbar. Man wird mit steigender relativer Geschwindigkeit vom möglichst glatt gerundeten Verdrängungsschiff über Spiegelheckformen zu V-Spantformen und Gleitbootformen kommen. Tragflügelboote mit festen Tragflächen werden sehr bald die Gleitboote mäßig hoher Geschwindigkeiten ablösen. Die Kavitationsgefahr bzw. die Folgen für den Widerstand lassen zu Tragflügelbooten mit verstellbaren Flächen oder besser staudruck-gesteuerten Flächen übergehen, bis schließlich wieder der — man möchte sagen — „Kreuzungstyp“ des Aerationsflächenbootes die höchsten Geschwindigkeiten beherrscht. Als Aerationsflächenboot ist dabei ein Gleitboot mit tief getauchter Gleitfläche bezeichnet, das man auch ansehen kann als ein Tragflächenboot mit vollem Luftenbruch auf der Saugseite, deren Ausbildung dann mit Ausnahme der Kanten allein durch statische und konstruktive Gesichtspunkte bestimmt ist. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten ist es auch lohnend, wie in Abschnitt 4f geschildert, dynamische Luftkräfte zur Auftriebserzeugung heranzuziehen.

Ganz entsprechend ist es mit den Formen der zur Erzielung der Stabilität bestimmten Bauteile. Bei relativ kleineren Geschwindigkeiten ist mit Kielballast, der also zu einer Vergrößerung der Verdrängung führt, oder mit Verbreiterung der Form die beste Lösung gegeben. Bei steigenden Geschwindigkeiten kommt das Doppelrumpfschiff (Catamaran) — hierzu ausführliche Angaben in [77] — oder wegen der günstigeren Widerstandseigenschaften das Dreirumpfschiff (Trimaran) zum Zuge, das dann schließlich zum Auslegerboot führt. Dreikörperanordnungen sind von Sottorf und Barkla [6] vorgeschlagen worden. Auf die wohl erste theoretische und experimentelle Untersuchung von Eggers [25] zu dieser Frage sei besonders hingewiesen. Bei hohen Geschwindigkeiten ist die günstigste Stabilisierung die durch Unterwassertragflächen in entsprechender Anordnung, wie in den USA bereits mehrfach zum Segeln verwendet. Bei den höchsten Geschwindigkeiten jedoch macht die Kavitation diese Art zu einem unter Umständen recht gefährlichen Mittel, und der gleitende Stützwimmer ist die beste und sicherste Lösung. Für Rekordzwecke kann der Widerstand des Stützwimmers dadurch eingespart werden, daß Ballast — meist lebender — entsprechend der Fahrtbedingung so verlagert wird, daß beide Stützwimmer frei vom Wasser gefahren werden. Schließlich ist noch wie bei der Auftriebserzeugung die Stabilisierung durch dynamische Luftkräfte zu nennen (Abschnitt 4f).

Die speziellen Aufgaben für die Gestaltung des Segelschiff-Unterwasserkörpers beginnen also eigentlich erst mit der Querkrafterzeugung. Da der normale glatte Schiffsrumpf dies nur mit einem schlechten Wirkungsgrad tut, werden Kiel, Flossen und Schwert und Tragflächen in Schrägstellung angeordnet, und das Ruder wird für diesen Zweck mehr oder weniger bewußt mit verwendet. Die Lateralfäche des gesamten Fahrzeuges  $F_L$  ist die entscheidende Formgröße. Es erscheint naheliegend, die in Betracht kommenden Größen der Lateralfächen ebenso wie bei den Segelflächen auf die Verdrängung  $V$  zu beziehen durch einen Wert  $F_L/V^{2/3}$  und für diesen „Normalwerte“ anzugeben. Dies ist jedoch nur schwer möglich, und wo dies geschieht, sind die angegebenen Werte sehr eng bedingt und für andersgeartete Fahrzeuge nicht kennzeichnend. Dieser Umstand liegt in der vorstehend beschriebenen Natur des Unterwasserschiffes und seiner dreierlei Aufgaben begründet. Aus den Abmessungen eines normalen

Schiffsrumpfes, der die Aufgabe der Auftriebserzeugung bei mehr oder weniger günstigem Widerstand zu erfüllen hat, ergibt sich die in Gl. (99) leicht zu ermittelnde Größe der Lateralfläche.

$$\frac{F_L}{\sqrt[3]{2/3}} = \tau \cdot \sqrt[3]{\frac{LWL/B}{\delta^3 \cdot B/T}} \quad (99)$$

Die kleinste relative Lateralfläche ergibt sich mit rund 0,8 für einen Halbkubus, bei der Halbkugel erreicht der Wert etwa 1,4, ein recht großer Wert für Schiffe ist schon 3. Durch die Anordnung von Bauteilen wie Kiel, Flossen usw. ohne wesentliche eigene Verdrängung kann dann leicht der doppelte Wert erreicht werden. Dabei gilt als Verdrängung  $\nabla$  natürlich immer die Verdrängung in Ruhe, die sich aus dem Gewicht dividiert durch das spezifische Gewicht ergibt. Auf der anderen Seite steht das Bedürfnis, die Lateralfläche so klein wie möglich zu halten und wieder so groß, daß entsprechend den dynamischen Bedingungen des Segelvortriebes die sich ergebende Quertriebsbeizahl  $c_{QH}$  mit einem tragbaren Widerstandszuwachs  $c_{WHQ}$  nach der Polare des Unterwasserschiffes zu vereinbaren ist. Aus Gl. (39) ist die entsprechende Bedingung zu gewinnen. Dort ist für  $\chi_A$  der Wert einzusetzen, der sich optimal für einen Punkt der Segelpolare  $\partial c_{QA}/\partial c_{WA}$  bei der in Betracht gezogenen Unterwasserform ergibt.

Die zweite wichtige Größe für die Kräfte des Unterwasserschiffes ist das Seitenverhältnis. Ebenso wie die Lateralfläche selbst ergibt sich aus den normalen Schiffsabmessungen schon ein zwangsloser Wert nach Gl. (100)

$$\text{mit } \tau = \frac{F_L}{LWL \cdot T} ; \quad A_L = \frac{2/\tau}{\frac{LWL}{B} \cdot \frac{B}{T}} \quad (100)$$

der bei normalen Schiffen zu Seitenverhältnissen von etwa 0,05 bis 0,20 führt. Durch Flossen, Schwert usw. könnte dies Verhältnis noch bis zu etwa dem zehnfachen Wert gesteigert werden. Im Extremfall ist der Rumpf glatt und rund so ausgebildet, daß bei geringer Schräganströmung  $\alpha_L$  dieser in seiner Quertriebswirkung nicht ins Gewicht fällt und die Querkraft allein von dem extrem tief und kurz ausgebildeten Schwert übernommen wird, was dann ja auch bei sehr kleinen Winkeln schon wirkungsvoll erfolgen kann. In solchen Fällen ist dann die Lateralfläche des Schwertes bzw. der Flosse  $F_F$  und das zugehörige Seitenverhältnis  $A_F = 2 \cdot T_F^2/F_F$  maßgebend. Dieses Seitenverhältnis kann bei geschickter Anordnung (Tandem und Doppelschwert) auch ohne Übertreibung des gesamten Tiefgangs Werte bis zu etwa 5 durchaus erreichen.

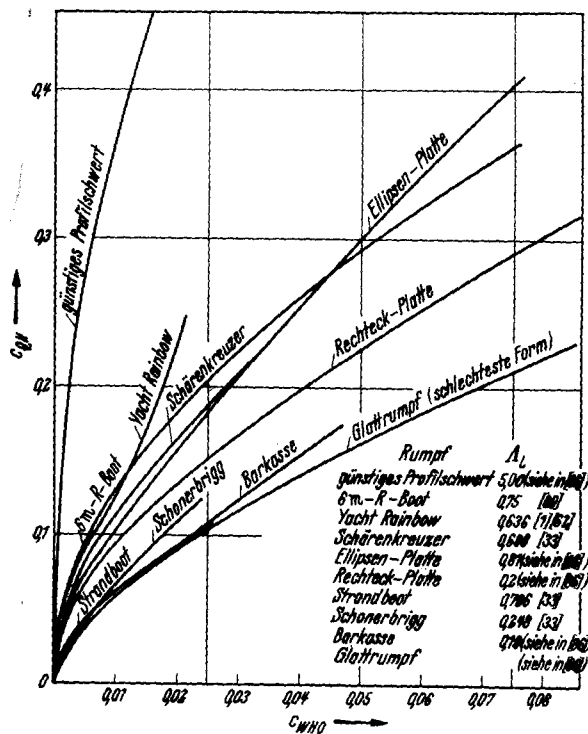


Bild 21. Rumpfpolaren.

aller Bemühungen aus dem Gesichtswinkel der Aerodynamik und damit vorwiegend des Flugzeugbaus heraus erfolgte und dadurch die spezifisch schiffbaulichen Probleme weniger verlockend erschienen.

In Bild 21 sind einige der Polaren aus den genannten Quellen wiedergegeben, um einen Überblick über die für Unterwasserschiffe in Frage kommenden Werte bilden zu können. Die Windkanal- oder

### 5. c) Beispiele und statistische Grenzen für die Kräfte von Unterwasserschiffen

Im Vergleich zu den theoretischen wie experimentellen Bemühungen um die Ermittlung der Kräfte am Segel haben sich nur wenige Bestrebungen auf die gleichen Fragen beim Unterwasserschiff erstreckt; [1], [22], [33], [86] und [89] enthalten solche Arbeiten bzw. Hinweise darauf. Der Grund dürfte darin zu suchen sein, daß einerseits größere theoretische Schwierigkeiten und auch experimentelle Erschwernisse beim Unterwasserschiff vorliegen und daß andererseits die Diskrepanz zwischen physikalisch Möglichem und technisch Erreichtem sich bei der Besegelung augenfälliger — in jeglichem Sinne — als beim Unterwasserschiff darbietet. Es mag hinzukommen, daß ein guter Teil

Schleppversuchen entnommenen Werte finden ihre Fortsetzung bis zu Anstellwinkeln von 90° unter Ausbildung eines Punktes maximaler Querkraft genau in der Art, wie es in Bild 16 für Segelpolaren gezeigt ist. Bei normalen Fahrtzuständen der Segelschiffe werden jedoch immer nur sehr viel geringere Querkraftbeizahlen erreicht, da bei größeren und insbesondere beim Maximum der Widerstand — hier nur als Zuwachs im Beiwert  $c_{WHQ}$ , vgl. Gl. (42), dargestellt — zu sehr ungünstigen Bedingungen führen würde. In die Schar der für verschiedene Typen angegebenen Polaren ordnen sich die Kurven für zwei ebene Platten passenden Umrisses recht gut ein, was schon anschaulich macht, daß die Berechnung von Rumpfpolaren wohl nach der gleichen Methode wie der dieser Platten erfolgen kann. (Hierzu Abschnitt 5e.) Die die untere Grenze für Rumpfpolare bildende Kurve ist für einen glatten Rumpf in der zur Quertriebserzeugung schlechtesten Form gerechnet, wobei reine Spantumströmung unterstellt ist. Man sieht, daß ausgeführte einfache Fahrzeuge dieser Grenze recht nahe kommen.

Als obere Grenze ist der Fall eines ebenfalls glatten Rumpfes, aber mit etwa optimaler Schwertanordnung angegeben, wie er am Schluß von Abschnitt 5b besprochen worden ist. Mit derartigen Anordnungen (Tandem- und Doppelschwerter) können beim Rumpf ähnlich wirksame Seitenverhältnisse wie bei der Takelage erzielt werden. Die Ersparnis an Wasserquerkraftwiderstand ist beträchtlich, so daß also auch von der Entwicklung des Unterwasserschiffes her eine Leistungssteigerung des Segelschiffes aussichtsreich erscheint.

### 5. d) Formulierung der Kräfte von Unterwasserschiffen

Auf die Gleichartigkeit der Entstehung der Quertriebskräfte am Unterwasserschiff und an der Besegelung ist schon einleitend zu Abschnitt 4d hingewiesen worden. Die Ausführungen in 4. d)  $\alpha$ : und 4. d)  $\beta$ : können also sinngemäß unter Auswechslung der entsprechenden Bezeichnungen bzw. Indizes völlig auf das Unterwasserschiff übertragen werden. Es entspricht dabei also das  $c_{QA}$  dem  $c_{QH}$  und das  $c_{WA}$  dem  $c_{WHQ}$ . Es verbleibt hier die Behandlung der beiden Wasserwiderstandsbeizahlen  $c_{WH0}$  und  $c_{WHS}$  für den Geradeauswiderstand und den Widerstand durch die Stabilisierung.

Der Geradeauswiderstand ist nichts anderes als der Schiffswiderstand schlechthin, dessen Bestimmung — jedenfalls beim Verdrängungsschiff — weitgehend auf experimentellen Grundlagen beruht. Theoretische Beiträge sind noch auf qualitative Aussagen beschränkt, können aber dabei besonders bei grundsätzlichen Vorklärungen den experimentellen Aufwand sehr stark reduzieren helfen. Das gilt ganz besonders bei den Abweichungen von normalen Formen, wie sie sich für Segelfahrzeuge mit Rücksicht auf die Stabilisierung aufdrängen. So kann beispielsweise [25] das Dreikörperschwimmwerk dem symmetrischen Doppelschwimmwerk gegenüber hierdurch als aussichtsreicher ausgewählt werden. Der Schiffswiderstand wird — wegen des Maßstabefflusses unter Bezug auf eine absolute Größe — in dimensionsloser Form üblicherweise entweder auf die benetzte Oberfläche oder die Verdrängung und das Quadrat der Fahrtgeschwindigkeit bezogen. Für die Zwecke der Segelmechanik ist der Bezug auf die Verdrängung ein geeigneterer Ausgangswert, um auf den in den dynamischen Beziehungen verwendeten Wert  $f$  zu kommen. Wenn der auf die Verdrängung bezogene Geradeauswiderstand mit  $c_0$  bezeichnet wird, so erhält man:

$$\text{mit } c_0 = \frac{W_{H0}}{\frac{\rho_H}{2} \cdot v_H^2 \cdot \nabla^{2/3}} \quad \text{und (46)} \quad c_{WH0} = c_0 \cdot \frac{\nabla^{2/3}}{F_L}$$

$$f = \frac{\gamma_H}{\gamma_A} \cdot \frac{\nabla^{2/3}}{F_S} \cdot c_0 \tag{101}$$

$$\text{Süßwasser: } f = \frac{816 \cdot c_0}{F_S \nabla^{2/3}} \quad \text{Seewasser: } \frac{836 \cdot c_0}{F_S \nabla^{2/3}}$$

Für ein bestimmtes Schiff ist  $c_0$  abhängig von der Geschwindigkeit und der absoluten Größe anzugeben. Um allgemeine Möglichkeiten des Segelantriebes abschätzen zu können, sind folgende informativen Werte zusammengestellt:

Beispiel: Fischkutter .....	$c_0 = 0,14$	
Kleines Motorschiff .....	0,09	
Rennruderboot .....	0,035	
Kleine Rennjacht .....	0,03	
Große Rennjacht .....	0,025	(102)
Frachtschiffe .....	0,016 bis 0,021	
Ideales Stromlinienschiff .....	0,012	
Ideales Stromlinienschiff mit Absaugung	0,001	

Diese Werte — an sich natürlich noch von der Geschwindigkeit abhängig — stellen Richtwerte für den normalen Geschwindigkeitsbereich dieser Verdrängungsfahrzeuge dar. Bei Gleit- und Tragflügelbooten lassen sich solche Richtwerte besser in Form von Gleitzahlen  $\varepsilon_0$  angeben. Und mit Gl. (46),

$$\varepsilon_0 = \frac{W_0}{\gamma_H \cdot \bar{V}_H} \quad \text{und} \quad F\bar{V} = \frac{v_H}{\sqrt{g \cdot \bar{V}^{1/3}}}$$

ergibt sich der Zusammenhang

$$c_0 = \frac{2 \cdot \varepsilon_0}{F\bar{V}^2} \quad (103)$$

Die Gleitzahlen  $\varepsilon_0$  haben bei Gleitbooten oft Werte von etwa 0,3, die dann bis zu 0,15 nach Ausföhrung und Geschwindigkeit noch gesenkt werden können. Mit Tragflügelbooten kann im äußersten Falle noch 0,05 vielleicht erreicht werden, wobei allerdings eine Geschwindigkeitsbegrenzung je nach Größe auf  $F\bar{V} = 4$  bis 8 gegeben ist, da diese optimalen Gleitzahlen sich dann nur bei Kavitationsfreiheit erzielen lassen. Zusammengefaßt läßt sich als Grenze der Möglichkeit von Wasserfahrzeugen mit dynamischem Auftrieb etwa angeben:

$$c_0 > 0,001. \quad (104)$$

Die Verwendung von Wassertragschrauben bringt gegenüber festen Tragflächen keinen Leistungsgewinn und kann unberücksichtigt bleiben.

In Abschnitt 3a ist bereits erläutert, in welcher Weise der Widerstandszuwachs durch Maßnahmen zur Sicherstellung der Stabilität behandelt werden soll. Nach Gl. (43) ist  $\varepsilon_{SI} \cdot h_M/s_M$  gleich dem Verhältnis dieses Zuwachses zur Wasserquerkraft, also gleich  $c_{WHSI}/c_{QH}$ . Für diesen schon vorher hier verwendeten Wert lassen sich außer für den speziellen Einzelfall natürlich keine universellen Richtwerte angeben. Wichtiger aber ist es, sich einen Begriff vom Schwankungsbereich bzw. den Grenzen des Wertes zu machen. Unter Berücksichtigung der vorstehend für Gleitboote genannten „Gleitzahlen“ und plausiblen Verhältnissen von Masthöhe zu Auslegerbreite (vgl. Bild 12), kommt man zu:

$$0 \leq \varepsilon_{SI} \cdot \frac{h_M}{s_M} \leq 0,5. \quad (105)$$

Die untere Grenze ergibt sich durch das erwähnte Wegtrimmen des Stützwchwimmers durch Ballast und hat natürlich nur für Rennzwecke Bedeutung. In diesen Werten liegen praktisch alle anderen Arten von Stabilitätssicherung außer durch Stützwchwimmer mit eingeschlossen.

### 5. e) Einfluß von Kieflosse, Schwert und Ruder

Die Formulierung der Wasserkräfte von Unterwasserschiffen nach dem gleichen Verfahren wie für die Besegelung bedarf dann einer Ergänzung, wenn das Unterwasserschiff nicht mehr ein geometrisch einheitlicher Körper ist, wie dies im allgemeinen noch bei Frachtschiffen der Fall ist, sondern wenn es sich deutlich als die — mehr oder weniger gute — Zusammenfügung einzelner Körper von selbständigem Formbild erweist. Dies ist vor allen Dingen bei Jachten mit Flossenkiel und großem Ruder der Fall. Das Ruder hat in solchen Fällen einen hohen Anteil an der Querkrafterzeugung, und bei manchen wannenartigen Segeljollen wird die Querkraft praktisch überhaupt allein vom Ruder aufgebracht. Das Ruder in wirkungsvoll engem Kontakt zum Rumpf wird gemäß 4. d)  $\alpha$ : wie eine Klappe behandelt. „Selbständig“ wirkende Kiele, Flossen und Ruder sitzen unter dem Rumpf. Der Berechnung wird ihre wirkliche Projektionsfläche  $F_F$  zugrunde gelegt; als Seitenverhältnis ist  $A_F = 2 \cdot T_F^2/F_F$  einzusetzen, wobei  $T_F$  von der Wasseroberfläche bis zur Unterkante der Flosse zu rechnen ist. Bei Flosse und Ruder hintereinander ist dann noch zu prüfen, wie weit sich die Wirksamkeit beider Seitenverhältnisse durch diese Tandemanordnung vermindert. Sinngemäß ist bei Doppelanordnung von Flossen nebeneinander zu verfahren. Ganz besonders deutlich wird die besondere Bedeutung, die der Berechnung „markanter“ Flossen zukommt dann, wenn diese mit veränderlicher Fläche — durch Ausschieben oder Ausklappen — verwendet werden. Der zum Teil sehr starke Effekt dieser besonderen Behandlung der Flossen ist der, daß die Wirksamkeit sich durch die Rechnung — in Übereinstimmung mit dem Experiment — sehr viel größer und widerstandsärmer ergibt, als man bei der Behandlung des Unterwasserschiffes als eine einheitliche Fläche von entsprechend kleinerem Seitenverhältnis erhalten hätte. Hierin liegt also ein wesentlicher Unterschied zur Besegelung, wo man ja abschließend recht beruhigend feststellen konnte, daß das wirksame Seitenverhältnis praktisch dem des geometrischen Gesamtwertes entspricht.

### 5. f) Flossen mit dynamischem Auftrieb und Krängungsausgleich

Wie bei der Besegelung (vgl. 4f), kann auch beim Unterwasserschiff durch dynamische Wasserkräfte Auftrieb und Krängungsausgleich erzielt werden. Es liegt in der Natur der Sache, daß dies nur bei relativ hoher Geschwindigkeit leistungsmäßig vorteilhaft ist. Es bedeutet immer die Verwendung von schräggestellten Unterwassertragflächen bzw. unter Umständen auch Aerationsflächen. Wo die Geschwindigkeit nicht zu hoch wird, sind derartige Anordnungen — Tragflügelgitter in V-Stellung — die beste Anordnung, um gleichzeitig Auftrieb, Querkraft und Stabilität zu sichern. Bei höheren Geschwindigkeiten müssen zumindest die äußeren austauchenden Enden der Flächen von vornherein als Aera-tionsflächen mit starkem Lufteinbruch ausgelegt werden, um plötzliche Stabilitätsverluste mit Kentergefahr zu vermeiden.

Durch Gl. (104) und (105) sind die extremen Möglichkeiten solcher Anordnungen, die für diese hohen Geschwindigkeiten eigentlich als Normalform gelten sollten, bereits mit erfaßt.

## 6. Kufe und Rad

### 6. a) Begriffe und Definitionen zur Erfassung von Größen, Formen und Kräften an Kufen und Rädern

Vom Standpunkt der bewußt schiffbaulichen Segelmechanik sind Kufen und Räder — man möchte sagen — trockene Unterwasserschiffe. Sie haben genau die gleichen Aufgaben wie diese, nämlich Gewicht zu tragen und eine der Luftquerkraft entgegengerichtete Querkraft aufzubringen. Auch sonst kann man durch Gedankenspiel die Brücke zum Unterwasserschiff schlagen; das Schiff schwimmt im Wasser; Schnee- und Eiskufen gleiten auf gefrorenem Wasser und können auch auf normal fester Materie, wie Schienen, gleiten. Bewegliche Gewichte werden aber auf Schienen z.B. besser durch rollendes Gleiten, also durch Räder, fortbewegt. Es sei in diesem Zusammenhang offen gelassen, ob die Verwendung von Rädern auf dem Eis bei bester Radlagerung Vorteile gegenüber der geschliffenen Stahlkufe ergeben kann. Bei ungleichmäßiger Oberfläche des Eises erscheint die Verwendung guter luftbereifter Räder nicht abwegig.

Die Unterscheidung zwischen Kufen und Rädern bedarf keiner Erörterung, sie entfällt beim blockierten Rad, das damit zur Kufe wird. Eine wirkliche eingehende Darstellung der Widerstände von Kufen und Rädern, die sich dann auch auf die an sich vorhandenen Einflüsse von Form und Größe dieser Bauteile relativ zur Last bzw. zur zu erzielenden Querkraft erstrecken müßte, ist hier nicht unbedingt notwendig. Eine Angabe von Werten, die der Abschätzung der Möglichkeiten des Segelantriebes mit solchen Fahrzeugen dienen können, wird hier genügen. Es sei also unterstellt, daß die Bemessung der Räder und Kufen nach Auflagefläche und Länge nach hier nicht näher zu erörternden Bedingungen richtig erfolgt.

### 6. b) Angaben für die Kräfte an Kufen und Rädern

**6. b)  $\alpha$ : Kräfte an Kufen.** Praktisch interessiert nur die Reibung von Kufen auf Eis verschiedener Güte. Die Behandlung ist die gleiche wie bei Gleitbooten und Tragflügelbooten, für die in Gl. (103) eine Beziehung zwischen der auch hier zu verwendenden Gleitzahl  $\varepsilon_0$  und der Beizahl des Geradeauswiderstandes  $c_0$  angegeben ist. Die Anschaulichkeit des Begriffes Verdrängung geht bei diesen Fahrzeugen natürlich verloren;  $\mathcal{F}$  ist wieder gleich  $G/\gamma_H$  einzuführen, mit  $G$  als Fahrzeuggewicht. Haftreibung, wie sie ja auch bei der Kufe auftritt, ist praktisch unabhängig von der Geschwindigkeit, sofern diese nur überhaupt vorhanden ist; die Haftreibung der Ruhe ergibt höhere Werte  $\varepsilon_0$ . Für Gleitzahlen in Fahrt kann man etwa die folgenden Grenzwerte nennen, die dann vom besten Zustand der geschliffenen Stahlkufe auf spiegelblankem Eis über Holzkufe auf Schnee und Eis bis zu Kufen durchbrechendem, verharschtem Schnee als ungünstigster Bedingung führt.

$$\varepsilon_0 = 0,014 \text{ bis } 0,035 \text{ bis } 0,2. \quad (106)$$

Es soll weiterhin als die plausible Annahme gemacht werden, daß  $\varepsilon_{QH}$  ebenfalls konstant und auch im Zahlenwert gleich  $\varepsilon_0$  angesetzt werden darf.  $\varepsilon_{SI}$  ergibt sich aus dieser Betrachtung ohnehin zu Null, da wegen der Konstanz von  $\varepsilon_0$  es gleichgültig für den Widerstand ist, auf welcher Kufe der Eisjacht das Gewicht ruht, so daß die Eisjacht neben anderen günstigen Voraussetzungen zu hohen Leistungen auch noch eine widerstandsfreie Stabilität sozusagen naturgegeben mitbringt.

**6. b)  $\beta$ : Kräfte an Rädern.** Gegenüber den Verhältnissen bei Kufen besteht nur der Unterschied, daß es sich um rollende Reibung handelt, bei der die Gleitzahl  $\varepsilon_0$  mit der Geschwindigkeit etwas variiert. Die Gleichsetzung von  $\varepsilon_0$  und  $\varepsilon_{RH}$  kann hier dadurch demonstriert werden, daß man sich ein Schienen-

fahrzeug mit seitlichen Stützrädern vorstellt, die dann natürlich die gleichen Widerstandseigenschaften wie die Tragräder haben. In den nachstehenden Grenzwerten ist der Einfluß der Geschwindigkeit wieder mit enthalten in der Weise, wie es auch bei den Pauschalangaben für Gleit- und Tragflügelboote geschehen war. In Gl. (107) gelten die kleinsten Werte für beste Schienenausführung, die über schlechte Ausführung bis zu guter Gummibereifung auf glatter Straße beim größten Werte führen.

$$\varepsilon_0 = 0,003 \text{ bis } 0,01. \quad (107)$$

Aus Vergleich von Gl. (106) mit (107) folgt die noch bessere Leistungsmöglichkeit des Segelwagens im Hinblick auf seine günstigen Geradeauswiderstände und seine geringen Querkraftwiderstände.

## 7. Geschwindigkeit von Segelfahrzeugen

Die wesentlichen Elemente bei einer Untersuchung der Verbesserungen der Leistung von Segelfahrzeugen sind Besegelung und Unterwasserschiff und die Bestimmung ihrer Kräfte für vorhandene Ausführungen und für die einer Entwicklung dienlichen Projekte. Die dieser Aufgabe dienenden Abschnitte sollen durch die Darstellung der Wege zur Bestimmung der Geschwindigkeit von Segelfahrzeugen abgerundet und gewissermaßen im gemeinsamen Ziel vereinigt werden.

### 7. a) Statistische Angaben über die Geschwindigkeit von Segelfahrzeugen

Statistische Geschwindigkeitsangaben dienen der Anschaulichkeit bei der Vorbereitung von Rechnungen und geben dann den Maßstab zur Bewertung von Rechnungsergebnissen. Das gilt für absolute Höchstgeschwindigkeiten, für mittlere Geschwindigkeiten bei einer optimalen Reise und schließlich auch für Langzeit-Mittel. Systematische Sammlungen dieser Art, wie sie seinerzeit von Prager [59] angestellt worden sind, liegen sonst nicht vor, so daß die folgenden Angaben nicht in jedem Falle Vollständigkeit beanspruchen können.

Beispiele für Höchstgeschwindigkeiten (in Knoten):

Alte hölzerne Barken (Ende des 19. Jh.)	9 kn	
Linienfahrzeuge (Ende des 18. Jh.)	10 kn	
Moderne Rennjachten		
desgl. gute letzte Großsegler .....	bis 17 kn	
Rekordjachten .....	22 kn	(108)
Versuchsjachten mit UW-Tragflächen...	26 kn	
Regatta-Eisjacht .....	70 kn	
Rekord-Eisjacht .....	120 kn	

Beispiele für Durchschnittsgeschwindigkeiten optimaler Reisen:

Alte Klipper .....	6 bis 11 kn	
Gute letzte Großsegler .....	10 bis 15,5 kn	(109)
Eisjacht auf Regattastrecke	43	

Beispiele für die Durchschnitte vieler Reisen:

Im Mittelalter .....	3 bis 4 kn	
„Preußen“ .....	etwa 7 kn	(110)

### 7. b) Geschwindigkeit unter allgemeinen Bedingungen bei optimaler Segelstellung

Mit den in den Abschnitten 3—6 gegebenen Beziehungen bzw. Zahlenwerten können für gegebene Fahrtgeschwindigkeiten die zu einem Fahrtgleichgewicht gehörenden Geradeauswiderstände ermittelt werden. Die Geradeauswiderstände in der Form  $f$  nach der Definition (46) können dabei je nach Art und Größe von Takelage und Unterwasserschiff bzw. Fahrwerk oder Schlitten recht unterschiedliche Werte erreichen. Unter Zusammenfassung der hierzu bisher gegebenen Richtwerte ergeben sich folgende Werte für  $f$ :

Wasserfahrzeuge mit Hilfsbesegelung $f =$	25 bis 80	
Küstensegler .....	5	
Kleines, sehr gutes Segelboot .....	1,6	
Großer Handelssegler .....	1	
Normale große Rennjacht .....	0,8	
Übertakelte große Rennjacht .....	0,4	(111)
Übertakeltes, schnellstes Idealschiff	0,2	
Übertakelte UWT- oder Gleitjacht .	0,07	
Normale Eisjacht .....	0,008	
Übertakelte Renn-Eisjacht .....	0,004	

Die kolossalen Unterschiede dieser auf die Segelfläche bezogenen Widerstände für einzelne Typen machen es bereits verständlich, daß die gleiche Antriebsart, die wegen unwirtschaftlicher Langsamkeit ein weites Feld ihrer Anwendung verloren hat, auf der anderen Seite zur Erreichung unglaublich hoher Geschwindigkeiten ganz besonders geeignet ist.

**7. b)  $\alpha$ : Platt vorm Wind.** Diese von Natur aus langsamste Art des Segelns bietet geringe Probleme. Die explizite Darstellung der Geschwindigkeit abhängig vom Widerstand ist möglich. Im äußersten Falle ist die Windgeschwindigkeit erreichbar, wenn der Geradeauswiderstand vernachlässigbar ist. Wenn die Segelpolare ihren maximalen Widerstand bei endlicher Querkraft erreicht, kann das Segeln mit Querkraft vorteilhaft sein. Ein Kreuzen vorm Wind (vgl. 7. b)  $\delta$ ): lohnt fast immer.

**7. b)  $\beta$ : Höchstes Anliegen am Wind.** Dies ist das andere Extrem und bringt ebenfalls nur geringe Geschwindigkeiten. Es lohnt nur aus Manövriergründen. Ein Anliegen bei kleinerem Kurs zum Wind bringt bereits Gewinn an Reiseleistung, so daß aus Fahrtleistungsgründen immer vor Erreichen des höchsten Anliegens gekreuzt wird. Der zugehörige Winkel  $\chi_A$  kann nach den gegebenen Grundlagen explizit angegeben werden, womit dann der Widerstand abhängig von der Geschwindigkeit gerechnet werden kann.

**7. b)  $\gamma$ : Höchstgeschwindigkeit.** Auch für die Höchstgeschwindigkeit kann nach einer Optimalauswahl für verschiedene Polarenpunkte schließlich der Widerstand abhängig von der Geschwindigkeit dargestellt werden. Hierzu gehören — kinematisch bedingt — kleine Winkel zum Luftstrom  $\chi_A$  und große zum wahren Wind  $\chi_W$ .

**7. b)  $\delta$ : Kreuzen.** Kreuzen vorm und gegen den Wind dient der schnelleren Zielerreichung, wenn man die Kurse hierfür optimal auswählt. Diese Optimalauswahl geschieht am besten aus dem vorliegenden Schaubild der Geschwindigkeiten über dem Windkurs. Je besser qualitativ und quantitativ — kleiner Wert  $f$  — das Fahrzeug ist, desto mehr gewinnt das Kreuzen vorm Wind an Bedeutung und umgekehrt für die schlechteren Fahrzeuge das Kreuzen gegen den Wind.

**7. b)  $\epsilon$ : Geschwindigkeit bei allgemeinem Anliegen.** Man wählt eine Reihe von Punkten aus der Polare, für die man nach angegebener Verfahren die optimale Zuordnung des Luftstromwinkels  $\chi_A$  durchgeführt und damit weiter für eine ebenso große Zahl von Kurswinkeln  $\chi_W$  die Abhängigkeit des Widerstandes von der Geschwindigkeit rechnet. Für gegebenen Widerstand, der dann auch noch zur Berücksichtigung von Beiwertänderungen infolge gesteigerter Froudescher Zahl oder der Wetterbedingungen variiert werden kann, entnimmt man daraus die Fahrtgeschwindigkeit, die dann abhängig vom Kurswinkel  $\chi_W$  darstellbar wird.

**7. b)  $\zeta$ : Mittlere Geschwindigkeit.** Aus den Ergebnissen von 7. b)  $\alpha$ : bis 7. b)  $\epsilon$ : kann  $v_H/v_W$  als Funktion von  $\chi_W$  dargestellt werden. Wenn hierin die Einflüsse von Widerstandszunahme durch höhere Froudesche Zahl, Änderungen der Segelführung (Reffen) und Seegang eingeschlossen sind, kann das Fahrtmittel daraus gebildet werden. Im allgemeinen Fall wird man ein Trampschiff, das also auf prinzipiell allen denkbaren Routen verkehrt, unterstellen und kann dann über alle Kurse mitteln. Man muß dabei beachten, daß auf allen Kursen gleich lange Strecken, also verschieden lange Zeiten gelaufen werden. Handelt es sich nur um bestimmte Routen mit ausgezeichneten Richtungshäufigkeiten des Windes, so ist diese zugrunde zu legen. Die so ermittelte mittlere Geschwindigkeit — nach Einführung der insgesamt oder gebietsweise gültigen Windgeschwindigkeit — stellt dann eine Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dar.

**7. b)  $\eta$ : Segeln auf Schienendreieck.** Dies ist eine Spezialaufgabe, falls das Interesse besteht, zwei bzw. drei Orte an Land durch ein Schienendreieck mit Segelwagen so zu verbinden, daß bei jeder Windrichtung die Verbindung gefahren werden kann. Die Aufgabe ist mit den gleichen Mitteln zu erledigen.

### 7. c) Segeln mit dynamischem Auftrieb und Krümmungsausgleich

Durch Berührung der genannten Effekte bei der Behandlung von Besegelung und Unterwasserschiff sind die Grundlagen hierfür geklärt. Für extreme Leistungen bei sehr hohen Geschwindigkeiten können mit den sonst gleichen Mitteln entsprechende Optimalprüfungen zusätzlich angestellt werden.

### 7. d) Stromsegeln ohne Wind

In Abschnitt 2 ist diese Möglichkeit bereits berührt worden. Die Fahrtberechnung geht prinzipiell in gleicher Weise wie beim normalen Segeln — unter sinnemäßiger „Vertauschung“ von Luft und Wasser — vor sich.

### 7. e) Segeln mit Hilfsmotor

Der Vortrieb des Hilfsmotors wird als Verminderung des Widerstandsbeiwertes  $f$  in die im übrigen völlig normale Rechnung eingeführt. Dadurch können kleinere Winkel  $\chi_A$  gelaufen werden, und die Geschwindigkeit steigt stärker an, als es dem Motor allein entsprechen würde, ganz besonders am Winde. Vor dem Winde bringt der Motor nur relativ wenig Gewinn.

## 8. Folgerungen für Anwendungen und Ergänzungen

### 8. a) Zur Anwendung der einzelnen Ergebnisse

Die Behandlung der kinematischen Grundlagen der Segelmechanik hat nicht nur die Grundlagen für weitere Ausarbeitungen geliefert, sie hat auch schnelle Abschätzungen von kinematisch gezogenen Leistungsgrenzen ermöglicht. Die dabei angegebene Diagrammdarstellung des Zusammenhangs von Wind und Fahrtgeschwindigkeit mit den daraus abzuleitenden Geschwindigkeitsverhältnissen und Winkeln kann auch anderweitig verwendet werden, z. B. bei der Beurteilung der Strömungssituation, in der sich der Gasaustritt aus einem Schornstein befindet oder die relativen Windbedingungen an Deck eines Schiffes überhaupt. Eine erweiterte Abschätzung für segelmechanische Zwecke ist durch Einführung dynamischer Beziehungen zwischen Besegelung und Unterwasserschiff gewonnen worden. Die Darstellung der Kräfte am Unterwasserschiff bzw. an der Besegelung hat in der Anwendung auf das Segelschiff zwar ein sehr reizvolles Anwendungsbeispiel gefunden, ist aber keineswegs darauf beschränkt. Die Anwendung erstreckt sich vielmehr auch auf alle anderen Arten von Quertriebskörpern der schiffbaulichen Strömungstechnik, wie Fragen der Ruderwirkung und der Steuereigenschaften, des Überwasserschiffes und des Schornsteins, der Kopf- und der Seitenscherbretter am Schleppnetz und andere Anwendungen verschiedener Art.

### 8. b) Vertiefung in der Behandlung der bearbeiteten Probleme

Das Ziel dieser Arbeit ist es gewesen, zu zeigen, daß mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln der Strömungstechnik die Frage der Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes und des Segelfahrzeuges schlechthin mit Aussicht auf gültige Ergebnisse angefaßt werden kann. Auch die Seitenwege sollten nicht unbeachtet gelassen werden, da ja gerade aus solchen Betrachtungen sich Komponenten einer Entwicklung des Kernproblems ergeben könnten. Um die Einsichtigkeit der Darstellung in einem zu großen äußeren Rahmen nicht verlorengehen zu lassen, sind darum der Einführung in die Aufgabenstellung und in die zur Lösung geeignet erscheinenden Gedanken — besonders Kräfteermittlung — die breitere und vollkommene Durchführung der darauf aufzubauenden Rechnungen geopfert worden. So ergibt sich die Notwendigkeit, besonders diesen letzten Teil der Arbeit durch stärkere numerische Behandlung für aktuelle und praktische Fragestellungen geeigneter auszubauen.

### 8. c) Weitere Aufgaben der Segelmechanik

Für die praktischen Bedürfnisse beim Entwurf leistungsfähiger Segelfahrzeuge spielen nicht nur deren Leistungen, sondern auch deren Eigenschaften, die auf die Dauer brauchbare Durchführung und Sicherheit des Betriebes bestimmen, eine Rolle. Die Steuereigenschaften und die Manövrierfähigkeit des fahrenden wie des stehenden Segelschiffes, die diese Eigenschaften praktisch verkörpern, sind zu untersuchen. Es ist zwar schon unausgesprochen bei den Ansätzen für die Leistungsrechnung darauf Rücksicht genommen worden, doch ist eine eigenschaftsmäßige Kontrolle besonders der Hochleistungsfahrtzustände eines Fahrzeuges immer notwendig, wenn die projektierte Leistung auch wirklich erreicht werden soll. Die für die Besegelung und das Unterwasserschiff gegebenen Grundlagen der Strömungskräfte sind zu erweitern und dann für die Bestimmung der Manövrier- und Steuereigenschaften heranzuziehen. Die in Abschnitt 8a genannte Anwendung dieser Ergebnisse auch auf andere Gebiete kommt damit also sehr schnell der Segelmechanik wieder selbst zugute. Grundsätzliche Schwierigkeiten sind nicht zu erwarten. Eine Art Bindeglied zwischen Leistung und Eigenschaft stellt die Untersuchung über den Fahrtverlust beim Wenden und Halsen dar, was für die Beurteilung der effektiven Leistung und des Betriebes von Ausführungsformen bedeutsam werden kann.

### 8. d) Ergänzungen zur Darstellung der Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes

Die in vorstehenden Unterabschnitten genannten Vertiefungen und Erweiterungen in der Aufgabenstellung und deren Durchführung erfordern auch eine wesentliche Verbesserung der Grundlagen. In den unter [84] bis [86] zitierten Arbeiten sind derartige hierfür notwendig erscheinende Ergänzungen

bereitgestellt bzw. in Arbeit. Es handelt sich um eine vollständige Erfassung von Besegelungsformen, die durch eine entsprechende Darstellung der Schwimmwerksformen zu ergänzen wäre, um die Zusammenstellung von experimentellem und theoretischem Material für die Bestimmung der Strömungskräfte an Rumpf und Takelage, um die Untersuchung der Wetterbedingungen und den heutigen Betrieb von Segelfahrzeugen und schließlich um die Feststellung der für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen interessanten Punkte.

Dipl.-Ing. H. Thieme, Hamburg (Dankwort)

Durch die Nennung des anschließend aufgeführten Schrifttums sind die Quellen dieser Arbeit nur unvollständig genannt. Einen persönlichen Dank möchte ich mit der Nennung von Namen verbinden.

Herr Professor Erbach, als der Altmeister der Bemühungen um das Segelschiff in der neueren Zeit und mein Lehrer an der T.H. Danzig.

Herr Professor Schlichting gab durch seine Auswahl die Richtung für das Thema und die Durchführung dieser Arbeit.

Herr Professor Kempf gab durch sein Entgegenkommen die technischen Voraussetzungen für den Beginn der Arbeit.

Herr Professor Weinblum förderte die Fortführung und Fertigstellung der Arbeit in jeder Weise und gab insbesondere Anregungen und Möglichkeiten für den Zusammenhang mit allgemeineren schiffstheoretischen Problemen.

Herrn Professor Wieghardt danke ich, zugleich stellvertretend für die Namen weiterer Herren, für die Bereitwilligkeit in Diskussionen der „offenen Tür“ die Gesichtspunkte und die Methoden der Arbeit zu formieren.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Förderung parallel laufender Untersuchungen über Schiffsrudder, die zu einer gegenseitigen Befruchtung beider Arbeiten geführt haben.

Herr Professor Schnadel hat aus seinem Interesse an dem behandelten Stoff heraus die Behandlung für die Schiffbautechnische Gesellschaft veranlaßt.

## 9. Schrifttum

Neben einer nur geringen Anzahl von Arbeiten, deren Thema dem hier behandelten etwa entspricht, sind in größerem Umfang auch Arbeiten zitiert, deren eigentliche Zielsetzung von der Mechanik des Segelantriebes zwar weiter entfernt ist, die aber teils numerisch wichtige, teils praktisch anschauliche Beiträge hierzu liefern. Da das Quellenstudium hierbei besonders weit aus dem engeren Gebiet der schiffbaulichen Fachliteratur herausführt, ist eine vollständige Literaturerfassung nicht recht möglich gewesen. Ein eingehendes Schrifttumsverzeichnis zur Entwicklung und Form der Besegelung findet sich in [84], das hier nicht wiederholt, sondern nur ergänzt worden ist. Weitere umfangreichere Literaturangaben werden in [85] und [86] zu den dort behandelten speziellen Themen gemacht. Diese Angaben dienen mittelbar auch dieser Arbeit. Auf eine Wiederholung der Listen an dieser Stelle ist jedoch verzichtet worden.

- [1] van Aken, J., und W. Rösingh: Sleeproefresultaten met zeiljachten. N. S. P. Public. No. 59 (1948), Schip en Werf 1948, No. 4 u. 5.
- [2] Askania-Werke A. G.: Rechenggerät für Flugzeugführer „Avionaut“. Askania Druckschrift Aero 180 (30. 7. 1936).
- [3] Bader, H. G.: Berechnung der Fahrtgeschwindigkeit von Segelschiffen. W. R. H. 1925, S. 371.
- [4] Barkla, H.: „Effect of varying the aspect ratios of the sails.“ Sail, Yachting Press Ltd. Vol. 2, S. 12.
- [5] —: Speed under sail. März 1950, unveröffentlicht.
- [6] —: High-speed sailing. T. I. N. A. 1951, S. 235.
- [7] Bauermeister, H.: Die Verwertung aerodynamischer Erkenntnisse im Yachtbau. Yacht 1925, 28. Nov., S. 13.
- [8] Bavier, R. N.: The planing sailboat. Yachting, 1949, Jan., S. 106.
- [9] Benjamin, L.: Die Stabilität der Segelschiffe und die Middelndorfschen Koeffizienten. W. R. H. 1925, S. 89.
- [10] Blom, Chr.: The future of sailing vessels fitted with auxiliary motors. T. I. N. A. 1927, S. 105/120.
- [11] Bock, B.: Aktueller Segelschiffsbau. Hansa 1948, Nr. 17, S. 12.
- [12] Brandt, G.: Schotführung auf Yachten. Yacht 1933, Nr. 5, S. 8.
- [13] Brandt, H.: Die Teilung des Großsegels. Yacht 1952, S. 146.
- [14] Clark, F. E.: Training in sailing vessels carries on. U. S. Naval Institute Proceedings, Vol. 81, 1955, No. 10, S. 1134/1151.
- [15] Croseck, G.: Beiträge zur Theorie des Segelns auf Grund der neueren durch Versuche und Erfahrungen der Luftfahrt gewonnenen aerodynamischen Erkenntnisse über die Strömungsvorgänge an Flächen. W. R. H. 1925, S. 379.
- [16] —: Beiträge zur Theorie des Segelns. Berlin, Springer, 1925.
- [17] —: Die Wölbung des Segels. Yacht 1925, Nr. 45, S. 9; Nr. 46, S. 14.
- [18] —: Praktische Versuche mit einer neuartigen Takelage. Yacht 1927, Nr. 19, S. 13.
- [19] —: Segel- und Rotorschiffahrt. Hdb. d. phys. u. techn. Mechanik (Auerbach-Hort) 1928, Bd. VI, S. 601.
- [20] Curry, M.: Die Aerodynamik des Segelns und die Kunst des Regattasegelns. Diessen vor München: I. C. Huber, 1925.
- [21] —: Amerikanische Versuche mit Segeln. Yacht 1928, Nr. 5, S. 11.
- [22] Davidson, K.: Some experimental studies of the sailing yacht. S. N. A. M. E. 1936, S. 288.
- [23] Drewitz, R.: Eine eigenartige Segelform. Yacht 1950, S. 179.
- [24] Duhamel, R.: Carènes et propulsion, de la galère a l'hydravion. Paris, Dunod, 1946.

- [25] Eggers, K.: Widerstandsverhältnisse bei Zweikörperschiffen. Bericht des Inst. f. Schiffbau d. Universität Hamburg, Nr. 22 (1955); Jb. d. S. T. G. 1955.
- [26] Eichler, C.: Wendigkeit und Kursbeständigkeit von Yachten. Yacht 1953, S. 160 und 171.
- [27] vom Ende, C.: Reibung und Rollwiderstand. Landolt-Börnstein, 6. Aufl., Bd. IV/1, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer 1955, S. 563.
- [28] Erbach, R.: Stabilitätsmessungen bei Segelschiffen. W. R. H. 1925, S. 371.
- [29] —: Der Zukunftsegler. Eine grundlegende Studie. Hansa 1944, S. 480 und 492.
- [30] —: Forschungen aus der Blütezeit des Bauens hölzerner Segelschiffe im 19. Jahrhundert. Jb. d. S. T. G. 1951, S. 288.
- [31] Everett, H.: Aerodynamical experiments upon yachts mainsail. S. N. A. M. E. 1915, S. 1.
- [32] Frey, K.: Beitrag zur Theorie des Segelns. Schiffbau 1929, S. 339.
- [33] —: Theorie des Segelns mit Abtrifftberücksichtigung. Jb. d. S. T. G. 1933, S. 228.
- [34] Fyfe, R. A., and C. F. Casey and R. Tate: Effect of certain mast shapes upon the efficiency of a Sail, and a study of the distribution and variation of sail pressures. Mass. Inst. Technology, Thesis 1932.
- [35] Grohmann, H.: Das Segel, seine Bedienung, Herstellung und Behandlung. München: F. Bruckmann, 1937.
- [36] Harmsen, C.: Allgemeine Grundlagen über Formgebung von modernen Segelyachten. Schiffbau 1926, S. 361 und 390.
- [37] Helm, K.: Bericht über die Prüfungen von Schwertern für Olympiajollen. Bericht Nr. 23 der Hans. Ing. Ver. (1946).
- [38] —: Bericht über die Prüfung von Olympiajollen mit verschiedenen Schwertern und Rudern. Ber. Nr. 35 d. H. I. V. (1948).
- [39] v. Holst, E.: Die Eisyacht. Berlin: Klasing & Co., 1925.
- [40] Johow-Foerster: Segeln. Johow-Foerster, Hilfsbuch für den Schiffbau, 5. Aufl., S. 253, 1928.
- [41] —: Bemastung und Takelung. Johow-Foerster, Hilfsbuch für den Schiffbau, 5. Aufl., S. 706, 1928.
- [42] Judaschke, F.: Strömungstechnik und Segelschiffe. Hansa 1944, S. 573.
- [43] Kurz, B.: Der Zukunftsegler. Hansa 1944, S. 277.
- [44] Laas, W.: Entwicklung und Zukunft der großen Segelschiffe. Jb. d. S. T. G. 1907, S. 275.
- [45] Matarese, A. D., and W. P. Sammet: Distribution of pressure over sail areas. Mass. Inst. Technology, Thesis 1922.
- [46] Middendorf, F. L.: Bemastung und Takelung der Schiffe. Berlin: Springer 1903.
- [47] Mildebrath, A.: Der Zukunftsegler, seine Technik und Leistungen. Hansa 1944, S. 48.
- [48] Morwood, J.: Sailing Aerodynamics. Folkestone (Kent) 1953.
- [49] Möckel, W.: Fahrtverlust der Schiffe im Seegang aus Fahrtbeobachtungen. Schiff und Werft 1944, S. 224.
- [50] —: Über die Nutzbarmachung der Schiffstagebücher zur Gewinnung von Kenntnissen über die Segel-eigenschaften der Großsegler. HSVA 1945.
- [51] —: Über die Dienstgeschwindigkeit und den Fahrtverlust im Schiffsbetrieb. H. I. V.-Bericht Nr. 25.
- [52] Nordmann, H.: Mechanik der Zugförderung. Hütte, VB, S. 241, 1955.
- [53] Parham, J.: A bat boat in real life. Yachts and Yachting, 1953, Vol. 13, S. 199.
- [54] Petersohn, E.: Über die Schiffsgeschwindigkeit beim Segeln. Schiffbau 1932, S. 1.
- [55] —: Aerodynamik och segling. Teknisk Tidskrift 1943, S. A 185.
- [56] —: Om den effekt, som vid segling ur vinden. Teknisk Tidskrift 1948, S. 401.
- [57] Phillips-Birt, D.: The Motor-Sailer. The Rudder, 1955, Mai, S. 12 und 46.
- [58] Pot, A.: Zeilen met vleugelprofielen. Het Schip 1933, S. 185.
- [59] Prager, M.: Die Fahrtgeschwindigkeit der Segelschiffe auf großen Reisen. Ann. d. Hydrographic u. marit. Meteorologie 1905, S. 1.
- [60] Recker, E., und L. Niederstrasser: Bahnhofsanlagen — Ablaufdynamik. Hütte VB, S. 67, 1955.
- [61] Remmers, K.: Die Leistung von Hilfssegeln. Schiff und Hafen 1949, S. 5.
- [62] Rösingh, W.: Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit von Segelschiffen. W. R. H. 1942, S. 269.
- [63] Scheibert, J.: Starre Segelflächen. Yacht 1927, Nr. 34, S. 13.
- [64] v. Schulmann, H.: Die Aerodynamik des Segels. Berlin: Klasing & Co., 1925.
- [65] —: Stabilität und Segel. Yacht 1926, Nr. 16, S. 13.
- [66] —: Zur Frage der Durchlässigkeit von Segeln. Yacht 1926, Nr. 31, S. 14.
- [67] —: Starre Triebflächen an Stelle von Segeln. Yacht 1927, Nr. 19, S. 18.
- [68] —: Bemerkungen zur Vorsegelfrage. Yacht 1928, Nr. 3, S. 6.
- [69] —: Segel und Boot. Yacht 1928, Nr. 40, S. 7.
- [70] —: Die Gestalt des Segels. Yacht 1935, Nr. 12, S. 6; Nr. 13, S. 9.
- [71] —: Höchstgeschwindigkeit von Eisyachten. Yacht 1940, Nr. 6, S. 62.
- [72] —: Die Grundgleichungen der Segeltheorie unter Berücksichtigung der Segelneigung in Längs- und Querrichtung. Z. A. M. M. 1941, S. 308.
- [73] —: Die Segelfrage als Stabilitätsproblem. W. R. H. 1941, S. 220.
- [74] Schwering, F., und H. Kother: Energiefragen der Verkehrsbetriebe. Hütte VB, S. 439, 1955.
- [75] Shipbuilding and Shipping Record: Technical development of sailing. Ship. a. Shipp. Record 1952, 15. Mai, S. 622.
- [76] Szabo, J.: Scharpieform nicht nur Notlösung! Schleppversuche mit Rundspant und Scharpiebooten. Die Yacht 1953, Nr. 22, S. 476.
- [77] —: Sixteen months of catamaran research and design. Seacraft 1954, Sept., S. 18 und 41.
- [78] —: Doppelboot mit Propellersegel. Yacht 1955, S. 384.
- [79] Tanner, T.: The forces on a yacht's sail. Journ. Royal Aeronautical Society, 1930, Okt.
- [80] The Motor Boat and Yachting: The Vosper-Hasler Lapwing Rig. The Motor Boat and Yachting 1954, Aug., S. 340; Ship and Boat Builder 1954, Sept., S. 314.
- [81] —: The World's fastest sailing boat. The Motorboat and Yachting 1955, Nov., S. 463.

- [82] The Rudder: David Cluett's Trident . . . The Rudder 1955, Sept., S. 22.  
 [83] Thieme, H.: Sind technische Entwicklungen im Segelschiffbau aktuell? Hansa 1948, Nr. 13, S. 11.  
 [84] —: Entwicklung der Besegelungen. HSVA-Ber. Nr. 956 (1949/50).  
 [85] —: Bedingungen und Entwicklung des Windkraftantriebes. (Teiluntersuchung B für die Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes.) Bericht des Inst. f. Schiffbau d. Universität Hamburg.  
 [86] —: Strömungskräfte an Körpern von kleinem Seitenverhältnis. (Teiluntersuchung C für die Leistungsmöglichkeiten des Segelschiffes.) Bericht des Inst. f. Schiffbau d. Universität Hamburg.  
 [87] Tiller, A.: Yachtbau. Berlin: Schmidt & Co., 2. Auflage.  
 [88] Timmermann, G.: Die Entwicklung des Schiffbaus seit den ältesten Zeiten. Jb. d. S. T. G. 1955.  
 [89] Umlauf, F.: Untersuchung verschiedener Ruder- und Flossenformen am Modell eines 6-m-R-Bootes. T. H. Berlin 1934.  
 [90] Voelz, K.: Profil und Auftrieb eines Segels. Z. A. M. M. 1950, S. 301.  
 [91] Warner, E. P., and S. Ober: The Aerodynamics of Yacht Sails. Trans. S. N. A. M. E. 1925.  
 [92] Wendling, P.: Moderne Segler. Hansa 1944, S. 604.  
 [93] Westell, J.: Sailing on hydrofoils. Yachts and Yachting 1955, Vol. 17, S. 414.  
 [94] de Witt, H.: Über eine Anwendung natürlicher Strömungsenergie zum Vortrieb von Fahrzeugen. Braunschweig 1955 (unveröffentlicht).  
 [95] Wittmaack, H.: Von der Wirkung der Segel und des Lateralplanes und der Lage des Schwerpunkts derselben. Yacht 1921, Nr. 12, S. 239.  
 [96] Yacht: Drei ungewöhnliche Entwürfe. Yacht 1933, Nr. 7, S. 10.  
 [97] —: Drachensegel. Yacht 1953, S. 93.  
 [98] —: Ausleger- und Doppelboote. Yacht 1953, S. 146.  
 [99] —: Hochseerennyacht „Zeevalk“. Yacht 1953, S. 210.

### Erörterung

Dr.-Ing. S. Schuster, Berlin

Wenn auch, wie der Herr Vortragende einleitete, sein Thema uns heute im Großschiffbau etwas fernliegt, so deckte uns doch sein schöner Vortrag so viel interessante Zusammenhänge auf, die zu kennen nicht nur für die Sportsegelerei, sondern auch für die Beurteilung des Windeinflusses auf die Aufbauten von Schiffen und der Strömungsverhältnisse am schiebenden Schiff, besonders am Tragflügelboot, mir sehr wesentlich erscheint. Leider ist die Diskussionszeit am Ende dieser Tagung so beschränkt, daß ich nur einige Fragen stellen möchte zu Aussagen, die ich nicht ganz verstanden habe.

Herr Thieme forderte, daß der Geradeauswiderstand und der Querkraftwiderstand zu einem Minimum zu machen sind. Das ist einzusehen, wenn beide Kräfte tatsächlich Widerstände entgegengesetzt der Fahrtrichtung sind, der Querkraftwiderstand also den Widerstand infolge der Querkraft bedeutet. Häufig, z. B. bei Flugzeugen und Tragflügelbooten, faßt man aber als Querkraftwiderstand oder Querkraftwiderstand den Widerstand in Querrichtung auf. Der muß nämlich als Gegenkraft zur Luftquerkraft auf möglichst energiesparende Weise hinreichend groß gemacht werden können. Bei Segelschiffen erzeugt man ihn durch eine Schiebewegung, d. h. eine Bewegung in Richtung der Schiffsquerachse. Da nun aber der Schiffskörper einen denkbar schlechten Tragflügel darstellt, sollte man ihn selbst besser geradeaus fahren lassen und die Querkraft mit Bug- und Heckrudern erzeugen.

Herr Thieme stellte Segelpolaren  $c_W = f(c_Q)$  mit der Optimumbedingung auf, daß man im Bereich von  $c_{Q\max}$  segeln sollte. Diese Forderung scheint mir den sonst doch vom Flugzeug her übertragbaren Verhältnissen zu widersprechen. Wir fahren einen weiten Bereich der Polare durch, wenn wir alle möglichen Einfallswinkel berücksichtigen, wobei die Quergleitzahl  $\epsilon = c_W/c_Q$  Werte zwischen  $\epsilon_{\min}$  und  $\epsilon_{c_{Q\max}}$  annimmt. Optimal kann meines Erachtens doch aber nur der Zustand sein, bei dem der Leistungsbedarf im Verhältnis zur aufgenommenen Querkraft am geringsten ist, d. h., wenn die „Querflügzahl“  $c_W/c_Q^{1,5}$  ein Minimum wird. Dieses analog zu der von Everling in die Luftfahrt eingeführten Flügzahl  $\alpha = c_W/c_a^{1,5}$  gebildete Verhältnis erhält man durch Gleichsetzen der aus dem Leistungsansatz und dem Quertriebsansatz gewonnenen Fahrtgeschwindigkeit

$$v = \left( \frac{2N}{\rho c_W F} \right)^{1/3} = \left( \frac{2}{\rho c_Q F} \right)^{1/2}$$

$$N_{\min} = C \left( \frac{c_W}{c_Q^{1,5}} \right)_{\min}$$

Der in diesem Sinne optimale Betriebspunkt wäre also auf der Polare da gegeben, wo sie von einer semikubischen Parabel berührt wird.

Das von dem Herrn Vortragenden gegebene Bild von den physikalischen Verhältnissen des Segelantriebes und seiner Aussichten für die Praxis war sehr eindrucksvoll. Besonders reizvoll fand ich, daß es uns unmittelbar nach einem Vortrag über den Schraubenantrieb vorgeführt wurde, dessen Theorie uns noch recht viel Kopfzerbrechen verursacht.

Dipl.-Ing. H. Thieme, Hamburg (Schlußwort)

Ich danke Herrn Dr. Schuster, daß er mich auf mögliche Unklarheiten in meiner Ausdrucksweise aufmerksam gemacht hat. Als Widerstand möchte ich immer nur eine entgegen der Fortbewegungsrichtung gerichtete Kraft bezeichnen. Der gesamte Wasserwiderstand des Segelschiffes ist zerlegt worden in einen „Geradeauswiderstand“, für den man beim Segelschiff nicht anders als beim Maschinenschiff natürlich einen Minimalwert zu erreichen trachtet, und in einen Zusatzwiderstand infolge Schräganströmung und Krängungsmoment —

Formel (42) —. Dieser Zusatzwiderstand ist ursächlich mit dem Auftreten der quer zur Fortbewegungsrichtung wirkenden Querkraft verbunden und darum „Querkraftwiderstand“ genannt worden. Ihn aus Leistungsgründen ebenfalls zu einem Minimum zu machen, ist eine spezielle Aufgabe der Segelmechanik. Der Hinweis auf die Querkrafterzeugung allein durch Bug- und Heckruder, wobei der Rumpf ohne Schrägströmung fährt, erscheint mir eine wertvolle Ergänzung zu den Ausführungen des Abschnitts 5 c, um zu günstigen Unterwasserschiffpolaren zu kommen, wie sie als Beispiel in Bild 21 angegeben ist. Für Bugruder gilt allerdings die Einschränkung, daß sie unterhalb der Kiellinie (als Senkruder also) sitzen müssen, oder daß hinter ihnen der Lateralplan sehr weit beschnitten sein muß, da sie sonst ja wirkungslos bleiben.

Herr Dr. Schuster weist weiter im Zusammenhang mit der Auswahl der optimalen Punkte der Segelpolare darauf hin, daß für das Flugzeug die Optimalbetrachtungen zu anderen Polarenpunkten führen. Der Hinweis auf diesen scheinbaren Widerspruch ist sehr interessant, da er sehr deutlich die Auswirkungen der beim Flugzeug und beim Segelschiff in der Leistungsmechanik sehr unterschiedlichen Bedingungen beleuchtet. Wegen der ja sonst so großen Verwandtschaft — um nicht zu sagen Identität — in der Aerodynamik von Segel und Tragflügel können diese Unterschiede leicht übersehen werden. Beim Flugzeug ist die Antriebsleistung nur schwach veränderlich mit der Relativgeschwindigkeit gegen Luft. Fortbewegungsrichtung und Anblasrichtung entsprechen sich. Bei konstanter Bahn stehen Hubleistung und Vortriebsleistung in festem Verhältnis und müssen von der Antriebsleistung aufgebracht werden. Beim Segelschiff bilden Fortbewegungsrichtung und Anblasrichtung miteinander den Winkel  $\chi_A$ , der vom Kurs zum Wind  $\chi_W$  und der Geschwindigkeit abhängig ist. Ebenfalls ist die Leistung von der Geschwindigkeit sehr stark abhängig. So hat die Optimalbedingung des Segelschiffes (68) dann natürlich auch ein anderes Aussehen als die von Herrn Dr. Schuster zitierte des Flugzeuges. Je nach dem Kurs und den Querkrafteigenschaften des Unterwasserschiffes werden also verschiedene Punkte der Segelpolare optimal sein. Die besondere Bedeutung von  $c_{QA, \max}$ , dem Querkraftmaximum, ergibt sich daraus, daß in vielen Fällen der zwischen diesem Punkt und der reinen Queranströmung des Segels liegende Teil der Polare konkav gewölbt ist und damit keine optimalen Zustände liefert, was aus einer grafischen Konstruktion ersehen und aus den Beziehungen in 3. d)  $\beta$ : abgeleitet werden kann. Somit wird der Punkt  $c_{QA, \max}$  mit horizontaler Tangente zugleich für viele Fälle praktisch optimal sein, für die sich nach (68) optimal eine negative Tangente ergeben würde.

Professor Dr.-Ing. G. Weinblum, Hamburg (Dankwort)

Ich danke Herrn Thiem e aufrichtig für seinen Vortrag. Die verhältnismäßig wenig umfangreiche Diskussion hat uns gezeigt, wie wenig verbreitet heutzutage in unserem Kreise Kenntnisse des Segelproblems sind. Bei den Dankesworten, die Herr Thiem e an mich richtete, fühlte ich mich etwa wie Faust in seinem Bericht über medizinische Praktiken „daß man den frechen Mörder lobt“. Aus meiner Einstellung heraus, daß das Thema technisch nicht mehr sonderlich aktuell ist, habe ich Herrn Thiem e gebeten, in seiner Arbeit auf diesem Gebiet möglichst auf Probleme einzugehen, die allgemeinere Bedeutung, wie z. B. für die Erfassung der Kursstabilität von Schiffen usw., haben. Ich darf betonen, daß in dieser Beziehung die Arbeit von Herrn Thiem e eine Fülle wertvoller Ergebnisse enthält.

Ein Freund von mir, der in der Großindustrie in leitender Stellung tätig und auch in unserem Kreise hier wohlbekannt war, prägte einmal das entsetzliche Wort von „den Niederungen der Sportboote“. Glücklicherweise ist es heutzutage direkt gefährlich, den Begriff „Sport“ mit Niederung zu verbinden. Ich kann mir denken, daß unsere Jachtkonstrukteure aus der Arbeit von Herrn Thiem e wertvolle Anregungen ziehen werden. Ohne die Wichtigkeit dieser Möglichkeit zu unterschätzen, möchte ich demgegenüber aber die Bedeutung der Arbeit für die Philosophie unseres Faches noch besonders unterstreichen.

Mit einem nochmaligen Dank an den Herrn Vortragenden und die Diskussionsredner schließe ich im Auftrage des Herrn Präsidenten die meines Erachtens sehr erfolgreiche Versammlung des heutigen Nachmittags.

(Lebhafter Beifall.)

# Mechanik des Segelantriebes

von

H. Th i e m e

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg

Vortrag auf der Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft e. V.



Sonderdruck aus der Fachzeitschrift „Schiff und Hafen“

Jahrgang 7 · Heft 12 · Dezember 1955

Druck und Verlag: C. D. C. Heydorns Buchdruckerei, Uetersen bei Hamburg

## Mechanik des Segelantriebes

(Eigenbericht des Vortragenden.)

Für umfangreichere Untersuchungen zum Thema Segelschiff kann heute keine besondere Aktualität mehr beansprucht werden. Dennoch ist auch in jüngster Zeit — zuletzt wohl von Barkla vor der Institution of Naval Architects in London — wieder hierüber vorgetragen worden. Im Zusammenhang mit der historischen Zielsetzung solcher Bemühungen sei hier ganz besonders auf die Arbeiten von Herrn Professor Erbach, als dem Altmeister dieses Faches überhaupt, hingewiesen. Eine unmittelbar aktuelle Bedeutung hat das Thema für den Segelsport. Das Bemühen nach Höchstleistungen ist zur Zeit ausgeprägter denn je. Schließlich ist die Frage zu stellen, ob technische Entwicklungen die Wirtschaftlichkeit des Segelschiffes entscheidend zu beeinflussen vermögen. Eine weitere mittelbare — und dabei aber recht aktuelle — Anwendung der Segelmechanik ergibt sich auf anderen Gebieten der schiffbaulichen Strömungstechnik. Solch ein physikalisch nahe verwandtes Gebiet ist vor allem das des Schiffsruders und der damit zusammenhängenden Steuer- und Manöviereigenschaften der Schiffe. Für dieses Gebiet ebenso wie für das Segeln besteht das Bedürfnis, die Behandlungsmethoden dem derzeitig sonst erzielten Stande der Strömungstechnik anzupassen, um besser gesicherte und weiter gehende Aussagen insbesondere über die Kräfte an Segel und Schiff machen zu können. Für die Einführung in die Segelmechanik erscheint ein Hinweis auf ein besonderes Charakteristikum des Segelantriebes geeignet. Es ist die Art der Abhängigkeit des Segelschubes von der Fahrtgeschwindigkeit, wie sie in Abb. 1 dargestellt ist. Das Verhältnis von Schub in Fahrt zu Schub am Stand  $S/S_0$  zeigt je nach dem Anblaswinkel  $\chi_A$  (zwischen Fahrtrichtung und relativer Luftgeschwindigkeit) einen Abfall oder auch Anstieg mit wachsender Fahrtgeschwindigkeit  $v_H$ . Augenfällig ist der — im Vergleich zum mit eingezeichneten Strahl- bzw. Propellertriebwerk — bei kleineren Winkeln  $\chi_A$  erheblich steilere Anstieg der Kurven. Dies bedeutet eine entsprechende Zunahme der Antriebsleistung des Segels, das damit kinematisch zu einem Antriebsorgan speziell für sehr hohe Geschwindigkeiten prädestiniert erscheint.

Abb. 1 ist lediglich aus den kinematischen Grundlagen der Segelmechanik gewonnen worden, die sich aus den einfachen trigonometrischen Beziehungen zwischen Fahrtgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Luftgeschwindigkeit und den Winkeln zwischen diesen ergeben. Mit diesen Grundlagen — Abb. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen Anblaswinkel  $\chi_A$  (scheinbarer Windkurs) und Windkurs  $\chi_W$  — können bereits Grenzen für die größte kinematisch mögliche Geschwindigkeit angegeben werden. Dies ist ein weiteres unterschiedliches Charakteristikum beim Vergleich mit anderen Antriebsarten. Für den einfachen Fall des Segelns ohne Strom ist in Abb. 3 gezeigt, daß kinematisch bedingte Geschwindigkeitsverläufe angegeben werden können und daß bereits Überlegungen für günstigstes Kreuzen gegen und vor dem Wind rechnerisch zu verfolgen sind. Mit den gleichen Grundlagen ist der etwas mühseligere Fall des Segelns mit Wind und Strom zu behandeln. Ein kinematisch ebenso einfacher wie in seiner An-

wendung interessanter Fall ist das Segeln ohne Wind bei Vorhandensein eines Stromes durch Gefälle oder Tide. Es ist dies die genaue Umkehrung des Segelns mit Wind ohne Strom. Das Unterwasserschiff wirkt gewissermaßen als „Segel“ und das Segel als „Unterwasserschiff“. Der Effekt ist bei Stromgewässern auch praktisch ausnutzbar; er wird durch die geringen Stromgeschwindigkeiten und die vergleichsweise geringere Güte des Unterwasserschiffes als „Segel“ nicht so augenfällig.

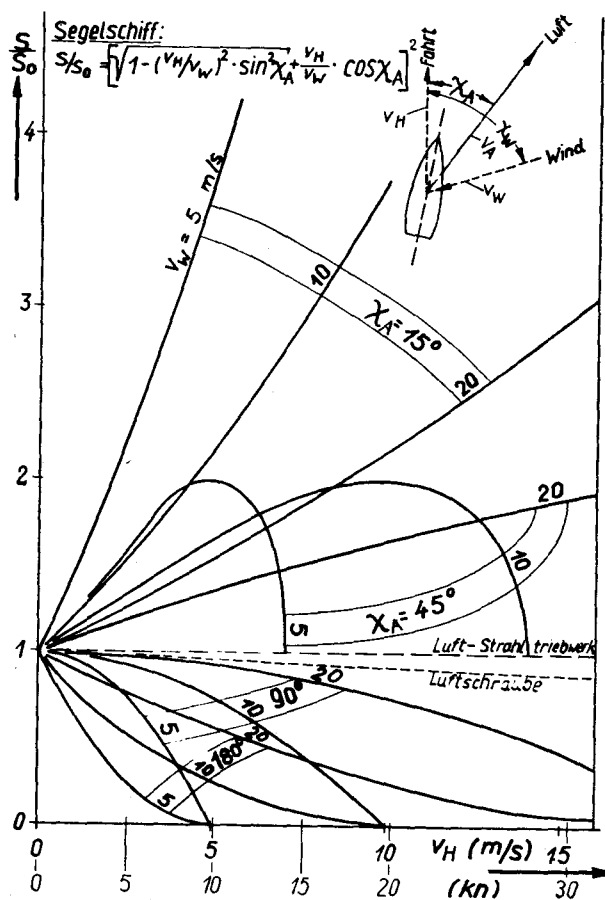


Abb. 1: Schubänderung mit der Fahrtgeschwindigkeit

Mit der Hinzunahme allgemeiner dynamischer Beziehungen, die lediglich das Vorhandensein verschiedener Kräfte an Besegelung und Unterwasserschiff in Rechnung stellt, ohne jedoch eine begründete Herleitung ihrer Größen zu geben, wird ein Schritt zur Verfeinerung der Behandlung getan, der

die Grundlage für weitere Schritte in dieser Richtung darstellt und zugleich schon recht gute Übersichten und Abschätzungen zu geben gestattet. Aus der Luftkraft ergibt sich Vortrieb und Querkraft für das Fahrzeug. Diese erfordert aus Gleichgewichtsgründen eine entsprechende Wasserquerkraft, deren Erzeugung durch Schräganströmung des Unterwasserschiffes mit einem Zuwachs an Widerstand unmittelbar verbunden ist. Eine weitere mittelbare Widerstandserhöhung rührt von den baulichen Maßnahmen her, die der durch die Querkraft gegebenen Stabilitätsbeanspruchung begegnen sollen. Es ist dabei rechnerisch ohne prinzipielle Bedeutung,

noch die Frage der optimalen Zuordnung von Besegelung und Unterwasserschiff, die bei Verwendung einer Polare zur Darstellung der Luftkräfte erforderlich wird, um die besten Leistungen erzielen zu können. Bei dieser Zuordnung, die dann von den für den Wasserwiderstand zu machenden Voraussetzungen abhängig ist, spielt die Neigung der Polarentangente, also das Verhältnis  $d c_Q / d c_W$ , die entscheidende Rolle und kennzeichnet geradezu den Fahrtzustand des Segelfahrzeuges.

Die Verwendung der erwähnten Polare — bisher praktisch ausschließlich auf Grund von Modellversuchen — war bisher das alleinige Fundament zur Bestimmung der Kräfte an der Besegelung. Das damit aus früheren Untersuchungen vorliegende Material bietet eine gewisse Anschauung über den Charakter der zu erwartenden Kräfte. Für brauchbare Interpolationen reicht es nicht aus. Für Weiterentwicklungen bedarf es noch zum Teil erheblicher Extrapolationen. Eine Verdoppelung der Kräfte bei gleicher Segelfläche muß in Betracht gezogen werden. Zur Durchführung derartiger Extrapolationen sind theoretische Grundlagen mit entsprechenden numerischen Berechnungsverfahren erforderlich,

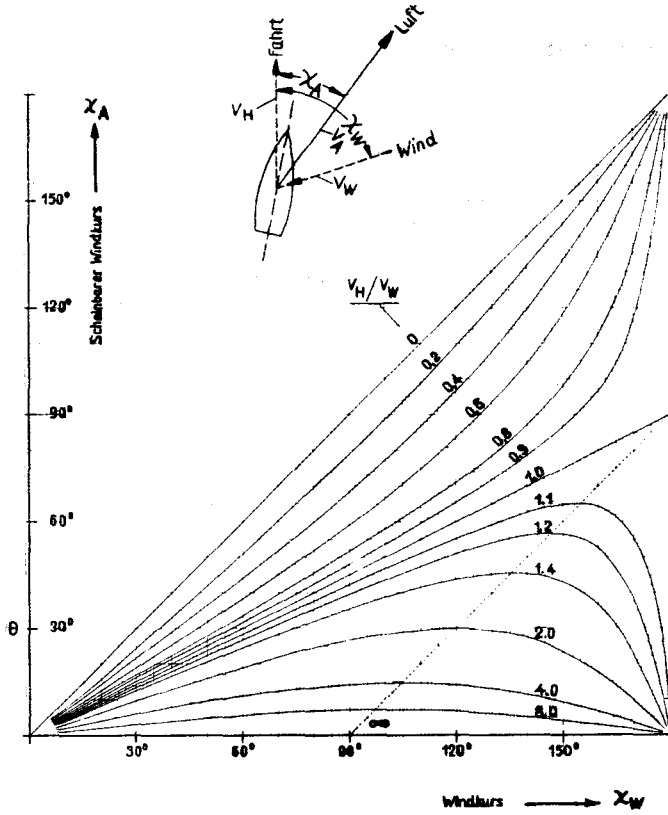


Abb. 2: Kinematischer Zusammenhang zwischen Kurswinkeln gegen Luft und Wind

ob es sich um Kielballast, Verbreiterungen des Rumpfes oder zusätzliche Ausleger als Stützorgane handeln soll. Die genannten kinematisch bedingten Geschwindigkeitsgrenzen für das Segeln entsprechen dem Segeln ohne jeden Widerstand, was ja beim Segeln interessanterweise nicht zu einer unendlich großen Fahrtgeschwindigkeit führt. Mit der Einführung dynamischer Bedingungen werden nun wieder schrittweise diese idealen Voraussetzungen abgebaut und der Wirklichkeit angepaßt. Solche Schritte sind das Segeln ohne Luftwiderstand und ohne Wasserquerkraftwiderstand bzw. mit konstantem Verhältnis von Wasserquerkraftwiderstand zu Wasserquerkraft. Extreme „Idealkonstruktionen“ von Segel und Schwert bei reellem Rumpf sind von diesen Voraussetzungen nicht weit entfernt. Realer ist jedoch die Einführung eines konstanten Verhältnisses von Luftwiderstand zu Luftquerkraft (oft Gleitzahl genannt). Hierbei kommt der Fall ganz ohne Wasser- bzw. Fahrzeugwiderstand den Verhältnissen bei einer Eisyacht doch schon recht nahe. Beschränkt man die Idealisierung auf die Ausschaltung des normalen Wasserwiderstandes, des „Geradeauswiderstandes“, so ist das eine Art Extrem für das Segeln mit einem an sich sehr widerstandsgünstigen Schiff, das jedoch einen unzulänglichen Kiel besitzt. Der umgekehrte Fall, nur Geradeauswiderstand ohne Wasser-Querkraftwiderstand, kann ebenfalls praktische Fälle berühren. Im — in diesen Rahmen — allgemeinen Fall wird der Geradeauswiderstand ebenso wie ein konstantes Verhältnis von Wasserquerkraftwiderstand zu Wasserquerkraft berücksichtigt. Ein weiterer Schritt untersucht dann

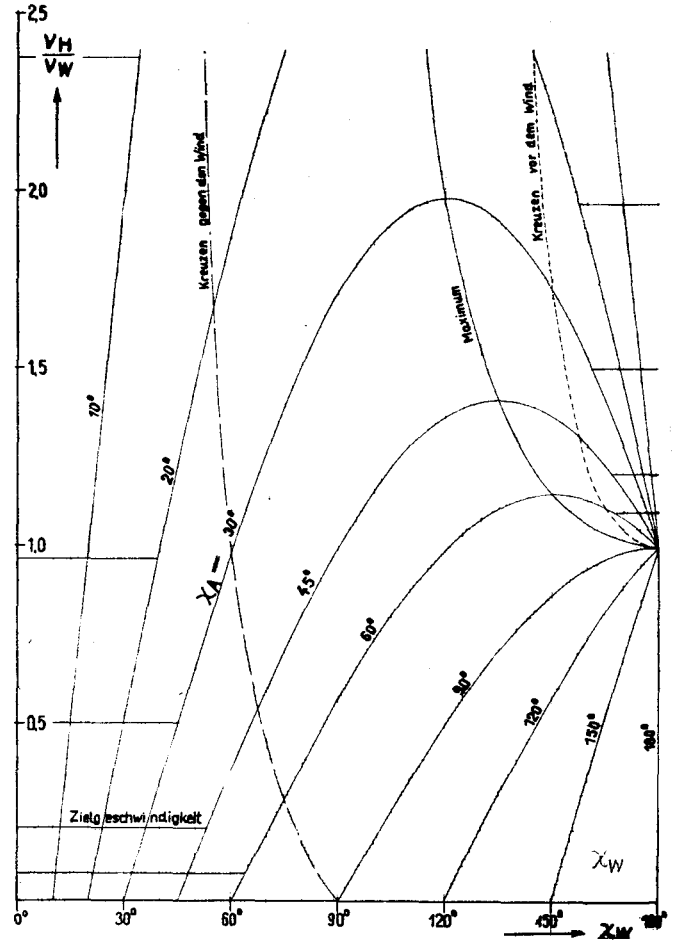


Abb. 3: Kinematisch bedingte Geschwindigkeitsgrenzen für das Segeln ohne Strom

da man den sonst erforderlichen erheblichen experimentellen Aufwand für ein derartiges Spezialgebiet heute kaum wird vertreten können. Der Nutzen des Ausbaues der numerischen Methoden kommt aber den erwähnten nahe verwandten Gebieten der schiffbaulichen Strömungstechnik noch zusätzlich zugute und spricht so also auch sehr für diesen Weg. Es ist früher vielfach versucht worden, ein Segel als eine Art Flugzeugflügel aufzufassen und in gleicher Weise zu berechnen und zu bewerten. Beides führt zu falschen Ergebnissen; die Optimalbedingungen sind andere als beim Flugzeugflügel

und berühren sich mit diesen nur in wenigen Punkten. Das Segel hat fast durchweg ein sehr viel kleineres Seitenverhältnis (Höhenquadrat zu Segelfläche) als die Tragfläche eines normalen Flugzeuges im inkompressiblen Bereich. Die bei solchen Flugzeugen übliche und zulässige Verwendung der Prandtl'schen Tragflügeltheorie in ihrer angenäherten Form (Traglinientheorie) wird beim Segel zu ungenau und ist außerdem allein nicht mehr ausreichend. Durch die Tragflügeltheorie in vollständigerer Form (Tragflächen-theorie) wird der Teil der Strömungseffekte am Segel erfaßt, der aus der Vorstellung von Potentialströmung mit Zirkulation gewonnen werden kann. Dieser Teil — er wird hier Wasserlinienströmung genannt — spielt beim Flugzeugflügel die praktisch allein entscheidende Rolle; er wird durch die Reibung der realen Strömung etwas beeinflusst und kann in eine numerisch relativ bequeme Form gebracht werden. Ein anderer Teil — Spantumströmung genannt — beruht auf dem durch die Reibung ausschließlich bedingten Widerstand der Fläche bei Queranströmung unter 90 Grad. Erst bei kleineren Seitenverhältnissen wird dieser Anteil entscheidend. Beim Seitenverhältnis Null ist dieser Anteil allein noch vorhanden. Von dieser Seite her setzt seine Berechnung an, auf deren Grundlagen zuerst von Flügel und wenig später unabhängig von Betz hingewiesen worden ist. Zwischen beiden Anteilen, Wasserlinienanteil und Spantanteil, tritt noch eine die Kräfte verstärkende Interferenz auf, deren Berechnung nicht übergegangen werden kann, in vielen Fällen aber stark zu vereinfachen ist. Mit diesen Methoden können die Segelkräfte im Bereich gesunder und voll abgelöster Strömung verhältnismäßig einfach bestimmt werden. Unter gewissen Normalannahmen kann die Berechnung auch auf teilabgelöste Zustände und besonders auf den für das Segeln so wichtigen Punkt der maximalen Segelquerkraft ausgedehnt werden. Glücklicherweise können die umfangreichen experimentellen Untersuchungen der Flugzeugaerodynamik zur Stützung des Verfahrens herangezogen werden.

Schon die Art der Bezeichnung der vorstehend erwähnten Umströmungsanteile weist auf die Analogie zur Berechnung der Kräfte des Unterwasserschiffes hin. Die Methoden sind prinzipiell die gleichen. Besonderheiten ergeben sich beim Zusammenspiel von reinem Rumpf und von diesem ausgeprägt unterschiedener Flosse oder Schwert bzw. auch Ruder. Die Behandlung dieser Aufgabe findet eine Analogie bei Hochgeschwindigkeitsflugzeugen mit großem Rumpf und kleinen Stummelflügeln. Besonders für das Rekordsegeln spielen Sonderausführungen durch Anwendung von Gleitflächen und Unterwassertragflächen eine Rolle. Bei mäßig hohen Geschwindigkeiten auf dem Wasser sind im Catamaran und besonders im Trimaran bzw. Auslegerboot (vgl. die gleichzeitige Arbeit von Eggers) günstige Lösungen gegeben. Eine entsprechend eingehende Behandlung der Widerstände von Kufen und Rädern kann im Hinblick auf die besondere

Eigenart dieser Fahrzeuge, die sie auch zu besonders hohen Geschwindigkeiten prädestinieren, und in Anbetracht eines gewissen vorliegenden statistischen Materials hier übergangen werden.

Wenn in diesem Rahmen die eigentliche Bestimmung der Geschwindigkeit von Segelfahrzeugen gegenüber der Behandlung der Grundlagen hierfür etwas zurücktritt, so nur darum, weil auf dem Gebiete der Grundlagen größere Lücken erkennbar waren und die Berechnung der Geschwindigkeiten damit sich dann mehr oder weniger selbst anbietet. Ein Blick auf statistische Untersuchungen über die Geschwindigkeiten von Segelfahrzeugen läßt für derartige Rechnungen ein weites Feld offen. Der Reisedurchschnitt im Mittelalter soll bei nur 3 bis 4 Knoten gelegen haben; moderne Eisyachten haben in Rekordfahrten bereits 120 kn erreicht und sind hierauf kinematisch keineswegs begrenzt. Die Höchstgeschwindigkeit ist jedoch keineswegs die entscheidende Leistung. Das höchste Anliegen am Wind, die Eigenschaften beim Kreuzen und platt vorm Wind sind lediglich markante Punkte aus der Reihe der vielen Kurse zum Wind, deren richtige Mittelung dann zur mittleren Geschwindigkeit führt. Die Mittelung muß, falls keine speziellen Fahrtgebiete vorgesehen sind, auf allen Kursen der Windrose mit gleicher Strecke — nicht gleicher Zeit — erfolgen. Bei diesem Segeln muß immer die schon erwähnte optimale Zuordnung von Segel und Schiff eingehalten werden, für die sich unter Verwendung der dynamischen Beziehungen und der Segelpolare als entscheidende Luftkraft der Ordinaten-Abschnitt der Tangente an die Segelpolare entwickeln läßt. Mit dieser Kraft, der Neigung der Tangente und den Bedingungen des Unterwasserschiffes ergibt sich der Winkel zum Luftstrom  $\chi_A$  und damit bei vorgegebener Fahrtgeschwindigkeit alle weiteren kinematischen Beziehungen und der damit zu „bewältigende“ Geradeauswiderstand des Schiffes. Besonderheiten lassen sich oft leicht berücksichtigen. Beim Segeln mit Hilfsmotor wird eine entsprechende Erhöhung des Geradeauswiderstandes zulässig oder durch die effektive Verminderung des Geradeauswiderstandes wird das Fahrtgleichgewicht bei höherer Geschwindigkeit erzielt. Bei kleineren Winkeln  $\chi_A$  (vgl. Abb. 1) ergibt sich dadurch eine erhebliche Steigerung der Geschwindigkeit, da dabei ja gleichzeitig der Schub des Segels erhöht wird. Für sehr hohe Geschwindigkeiten kann noch das Segeln mit dynamischem Auftrieb und dynamischem Krängungsausgleich vorteilhaft werden. v. Schulmann und neuerdings wieder Barkla haben solche Vorschläge gemacht. Eine Ausdehnung der Methode auf Gleichzeitigkeit der Effekte, und zwar in Luft wie in Wasser, ist möglich.

In einer solchen Untersuchung werden sehr viele Gebiete zum Teil als Hilfsmittel berührt, so daß eine befriedigende Vollständigkeit der Behandlung des Themas nur durch weitere Vertiefungen und Ergänzungen zu erreichen sein wird.