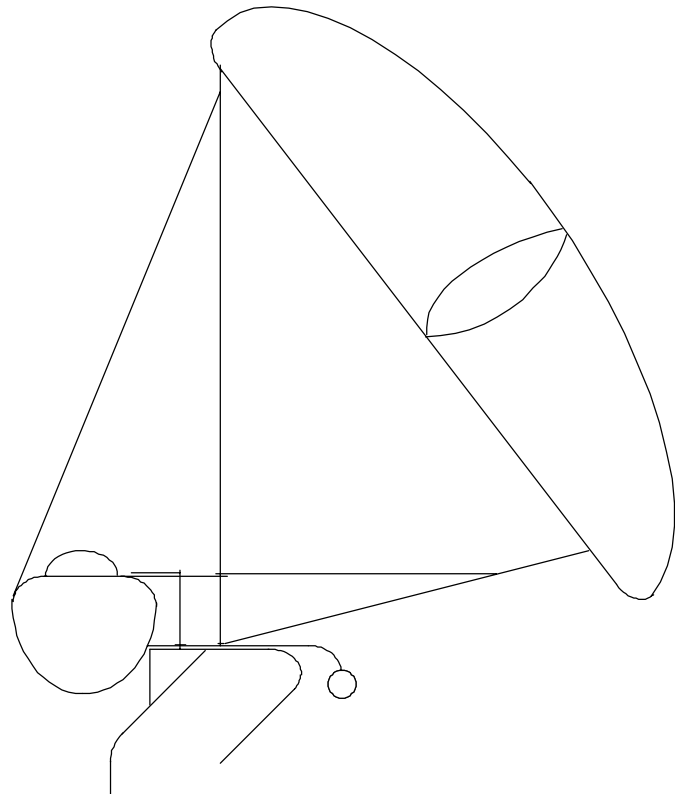


Horst Sammler
Alexanderstr.18
D - 45130 Essen
Tel.: 02018775624
Fax: 02018775625

Januar 2000



Das 100 km/h Segelschiff

Einleitung

I. Strömungstechnische Voraussetzungen

1. Luftkraftnutzung für Vortrieb, Auftrieb, Querkraft
2. Widerstandsverminderung

- a) im Wasser
- b) über Wasser

II. Anforderungskatalog

III. Gesamtauslegung

IV. Rechenansätze mit Tabellenkalkulation

Einleitung:

In England und Frankreich werden Speedweeks durchgeführt, auf denen die unterschiedlichsten Konstruktionen zu sehen waren: vom Drachen über Fallschirme und Auslegerboote bis zu Hydrofoils und Surfbrettern.

Leider fehlen bisher die alles verbindenden Gedanken; denn die einzelnen erforderlichen Ideen zum 100 Km/h Schiff sind alle schon einmal irgendwo aufgetaucht.

I. Strömungstechnische Voraussetzungen

1. Luftkraftnutzung

Die in der Segelfläche entstehende Luftkraft soll folgende Anforderungen erfüllen:

- a) Sie soll Vortrieb erzeugen.
- b) Sie soll Auftrieb erzeugen.
- c) Sie soll Querkraft erzeugen, die genutzt werden muß, um das Schiff auf schiefer Ebene entlang den Hydrofoils aus dem Wasser zu ziehen.
- d) Sie soll auf den Lateralschwerpunkt wirken.
- e) Sie soll möglichst wenig Widerstand im Segel erzeugen.
- f) Sie soll mit möglichst kleinem Anstellwinkel erzeugt werden.

2. Widerstandsverminderung

a) im Wasser

Der Wasserwiderstand ist 820 mal größer als der Luftwiderstand, weshalb man hier keine Kompromisse eingehen darf, d.h. das Schiff muß auf Tragflächen (Hydrofoils) über dem Wasser fahren. Das heißt aber, daß man bestimmte Anforderungen an den Seegang stellen muß. Zwei Hydrofoils im Wasser genügen möglicherweise, das dritte Bein ist die Luftkraft, dadurch erspart man sich von dem Widerstand der Hydrofoils noch einmal 33 %. Bei Anwendung des Proa-Prinzips kann man günstige Profile verwenden, da man nur auf einem Bug fährt. Die Hydrofoils haben zu 2/3 Schwertfunktion (Aufnahme des Querkraftanteils der Luftkraft und nur 1/3 hebende Funktion. Die Flächenbelastung der Hydrofoils darf nur so hoch sein, daß bei Höchstgeschwindigkeit gerade keine Kavitation auftritt. Um Luftsoog zu vermeiden, kann man die Hydrofoils etwas schränken (verdrehen), zusätzlich Luftsoogzäune wie bei Außenbordern.

Man darf nie vergessen, daß man bei dem sehr vorlich einfallendem scheinbaren Wind nur geringen Vortrieb hat und daß man damit nur um so schneller segeln kann, je geringer der Widerstand ist. Als Unterwasserteil des Rumpfes bietet sich ein Rennruderboot an.

b) über Wasser

Der Überwasserteil ist einem Segelflugzeugrumpf anzugleichen. Für die Stabilität ist ein Ausleger leichter als ein Kiel.

Gewichtsreduzierung ist aber möglicherweise weniger wichtig als Reduzierung von Strömungswiderstand, da dieser sich quadratisch mit der Windgeschwindigkeit vergrößert, während das Gewicht konstant bleibt. Das Schiff (Rumpflängsachse) wird nach dem Abheben in Richtung des scheinbaren Windes gesteuert (nach Faden wie beim Segelflugzeug, Hydrofoils in Fahrtrichtung). Das Segel soll eine hohe Streckung (Seitenverhältnis) haben, um den induzierten Widerstand zu minimieren. Ein höherer Mast bewirkt aber einen höheren Segelschwerpunkt und damit ein größeres Kentermoment. Es ist mit kleinem Anstellwinkel (ca. 10°) zu segeln, möglicherweise ist ein Starrsegel erforderlich.

II. Anforderungskatalog für Rekordschiff

1. Die optimale Größe ist zu ermitteln
2. Das Schiff muß um alle Achsen im Trimm und stabil sein, krängende Momente müssen aussteuerbar sein
3. geringes Gewicht
4. Manövrierfähigkeit
5. Sicherheit gegen Kenterung, Überschlag, Abheben

zu 1. Optimale Größe

Im Wesentlichen spielen 2 Parameter gegeneinander:

- a) Je größer ein Schiff wird, desto besser arrangiert es sich mit dem Wellengang, den man bei dem dazu gehörenden Wind erwarten kann.
- b) Je größer das Schiff wird, desto relativ schwerer wird es, weil das Gewicht mit der dritten Potenz der Länge zunimmt, während die Segelfläche nur mit der zweiten Potenz wächst.
Es muß ein Mittelweg gefunden werden.

Ein Rekordboot wird mit einem hebenden Rigg zu bauen sein; denn ein Rigg, das das Schiff krängen läßt (d.h. das das Schiff ins Wasser drückt), wird immer unnötigen Widerstand erzeugen. Die Auftriebskomponente der Luftkraft, die bei Höchstgeschwindigkeit auftritt, darf aber nicht so groß sein, daß das Schiff aus dem Wasser gehoben wird. Hieraus folgt, daß eine gewisse Mindestgröße des Schiffes für die nötige Flächenbelastung des Segels und die Stabilität nötig ist oder daß die Mastneigung variabel sein sollte. Ein Teil des Auftriebs für das Fliegen über dem Wasser muß aus Sicherheitsgründen immer von den Hydrofoils kommen.

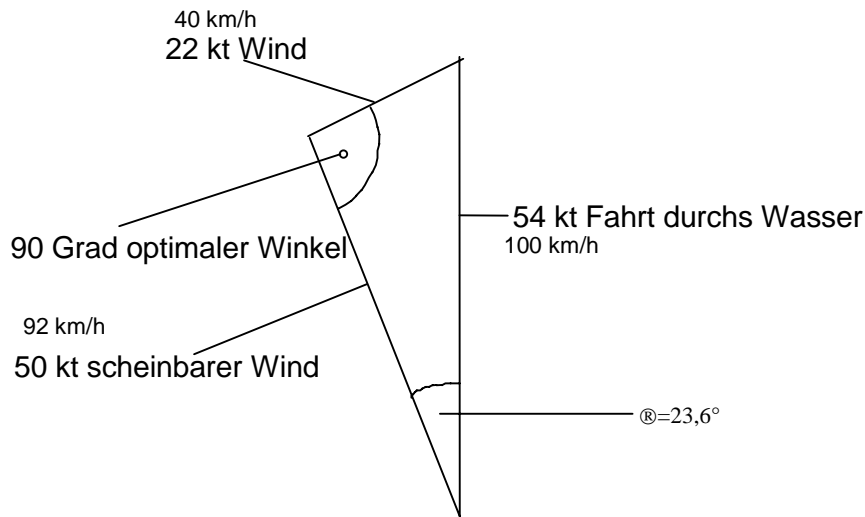
Bei Starrsegeln werden schon bei kleinen Anstellwinkeln ausreichend hohe Auftriebsbeiwerte erreicht, so daß man bei den spitzen Einfallswinkeln des scheinbaren Windes ausreichend Vortrieb hat, um dem Gesamtwiderstand das Gleichgewicht zu halten. Das bedeutet auch, daß ein großes Verhältnis von Schiffsgeschwindigkeit zu Windgeschwindigkeit erreicht wird (ca. 2,5) und damit kann auch mit weniger Wind und weniger Wellengang gesegelt werden und folglich kann auch die Schiffsgröße reduziert werden.

III. Gesamtauslegung eines 100 Km/h Segelboote

Vorgaben:

- 1) Das Schiff soll 100 km/h segeln.
- 2) Das Verhältnis Segelgeschwindigkeit zu Windgeschwindigkeit soll 2,5 betragen.
- 3) Daraus ergibt sich die erforderliche Windgeschwindigkeit (wahrer Wind) von 40 Km/h. Das entspricht 11 m/sek. Oder 22 Knoten oder Beaufort 5-6.
- 4) Ebenfalls ergibt sich ein Windeinfallswinkel von $\alpha = 23,6^\circ$

Damit der Windeinfallswinkel α des scheinbaren Windes möglichst groß wird, müssen scheinbarer und wahrer Wind aufeinander senkrecht stehen (siehe Skizze).



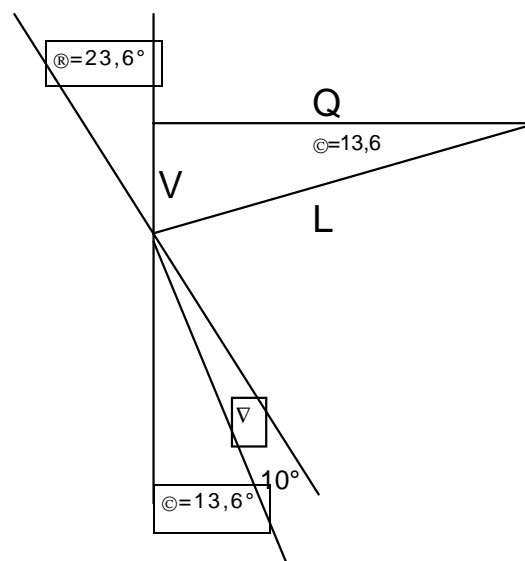
Der Windeinfallswinkel beträgt $\alpha = 23,6^\circ$, Der Anstellwinkel soll $\nabla = 10^\circ$ betragen
 Damit ergibt sich ein Vortriebsanteil der Luftkraft von
 $V = L \cdot \sin(23,6 - 10)$
 Die Segelfläche soll 6 m^2 betragen,
 Das Gewicht soll 200 Kg betragen.
 Der Vortriebsanteil der Luftkraft muß gleich sein der Summe aus Wasser- und
 Luftwiderstand.

Luftkraft	L
Querkraft	Q
Vortrieb	V
scheinbarer Wind	S
Segelfläche	F
Luftkraftbeiwert	ca

$$L = ca \cdot S^2 / 16 \cdot F$$

$$Q = L \cdot \cos \alpha$$

$$V = L \cdot \sin \alpha$$



Wir wissen, daß die Segelgeschwindigkeit positiv abhängig ist von der Größe der Segelfläche und von der aerodynamischen und hydrodynamischen Güte. Negativ abhängig ist sie vom Gewicht und von allen Widerständen. Am günstigsten ist das Verhältnis von Segelfläche zu Gewicht bei kleinen Schiffen, dagegen spricht aber, daß bei sehr kleinen Schiffen das Pilotengewicht einen übergroßen Anteil ausmacht und daß kleine Schiffe Schwierigkeiten mit dem dem Wind entsprechenden Seegang haben. Damit das Schiff nicht zu groß wird, suchen wir uns eine Segelstrecke für die Rekordfahrt in Lee von flachem Land, um größeren Seegang zu vermeiden.

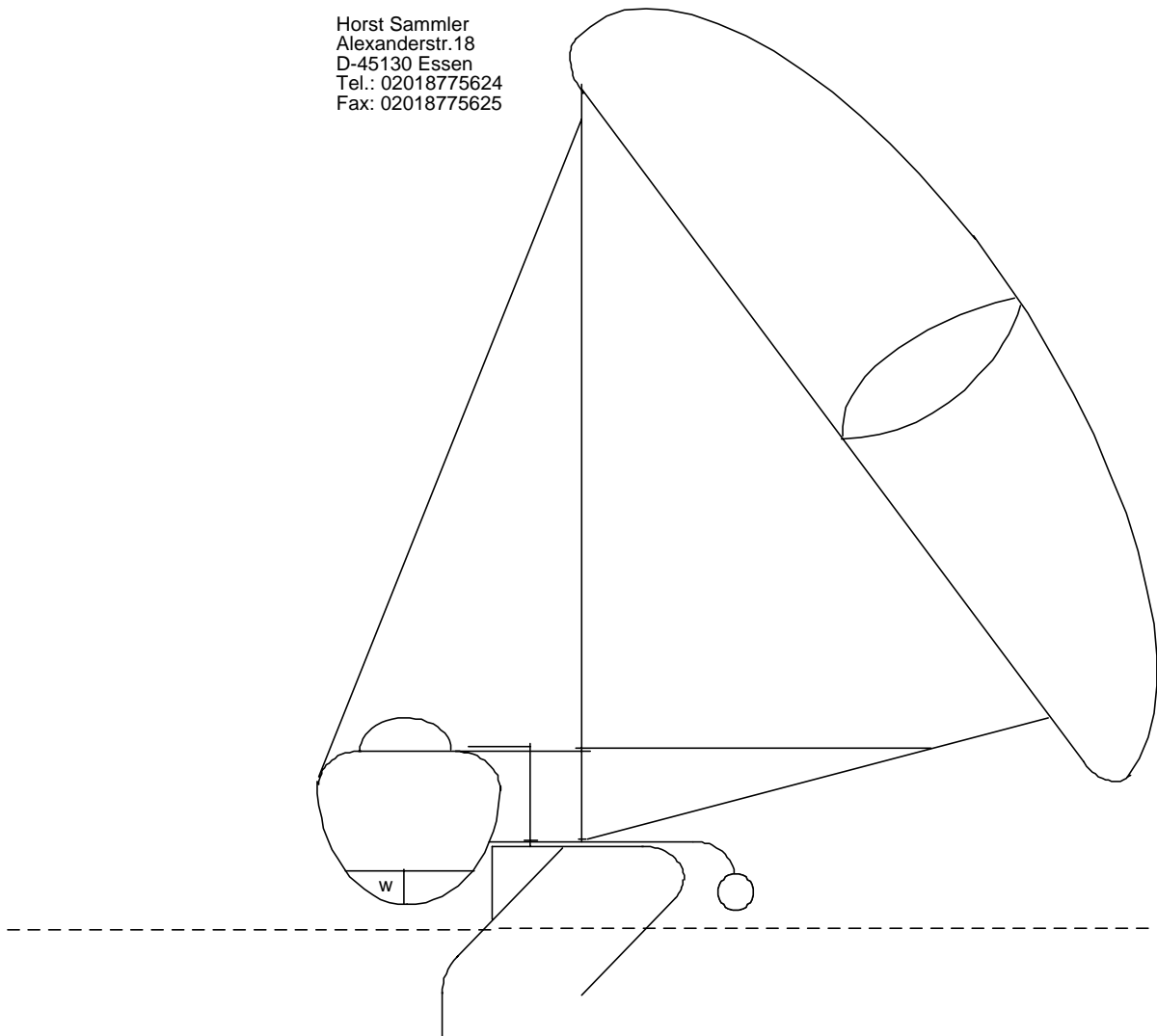
Da der Wasserwiderstand bei 100 km/h ungeheuer groß ist, ergibt sich zwingend eine Konstruktion mit Wassertragflächen (Hydrofoils), zumal bei dem Windeinfallswinkel des scheinbaren Windes von 23,6 Grad der Vortriebsanteil der Luftkraft nicht sehr groß ist (siehe Tabellenkalkulation).

Es bietet sich eine Proa mit hebendem Rigg an.

Grundsätzlich ist die Proa das leichtest mögliche Schiff. Nun gäbe es sicher viele Proas, wenn es so einfach wäre, ein geeignetes Rigg zu entwickeln, das unter allen Bedingungen so auf das Schiff einwirkt, das dieses um alle Achsen im Trimm bleibt. **Die Luftkraft muß senkrecht zum Segel auf den Lateralschwerpunkt gerichtet sein.** Daher muß das Segel außerhalb der Mittschiffsebene montiert und zum Rumpf hin geneigt installiert werden. Um die Neigung nicht zu groß werden zu lassen, müssen Segel und Schwert in der Horizontalen möglichst weit auseinander liegen. Damit der evtl. Ausleger kein zu großes Schlepptomoment erzeugt, und auch leichter vom Segel angehoben werden kann, soll die Schiffsbreite eher weniger als mehr als die Hälfte der Schiffslänge sein. Daher wird das Segel frei tragend und um den Mast schwenkbar angeschlagen und mit seinem Unterliek den Ausleger nach Lee überragen (Leeproa). Die beim Segeln entstehende Querkraft wird genutzt, um das Schiff mit seinen schrägen Tragflächen sozusagen auf einer schiefen Ebene aus dem Wasser zu ziehen.

Unten: Neueste Skizze zum Projekt

Horst Sammler
 Alexanderstr. 18
 D-45130 Essen
 Tel.: 02018775624
 Fax: 02018775625



Steuerung mit Drehschwertern
 unsinkbar
 3 Hydrofoils, 2 Segel
 w = evtl. Wasserballast mit Lenzöffnung?
 Krängung nach luv?

Steuerbordbug und Backbordbug:
 Linkssteuerung jeweils mit vorderem Hydrofoil
 Rechtssteuerung jeweils mit hinterem Hydrofoil

Speedsegelboot und Monoproa

Wenn wir wissen, daß jedes Schiff mit Schratsegeln nur so schnell fahren kann bis es kentert, dann kann man auch ausrechnen, bei welcher Geschwindigkeit dies spätestens der Fall ist. Wenn wir aber schneller segeln wollen, müssen wir Ballast auf die hohe Kante bringen, was aber dem Prinzip des schnellen Bootes widerspricht. Und viel schneller werden wir dann auch nicht, weil die krängende Luftkraft mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt und das Schiff immer wieder zum Kentern bringen will, denn die Luftkraft wirkt bei hohen Geschwindigkeiten fast ausschließlich als Querkraft.

Wenn wir das Prinzip des hebenden Riggs verstanden haben, wird es uns nicht wieder loslassen, denn hier wirken alle Kräfte in die gleiche Richtung, man spart Gewicht vom Kiel, vom zweiten Rumpf und von der Formstabilität der Jolle, Es genügt ein wenige Kilo leichtes Rennruderboot, das nur minimalen Formwiderstand und auch minimale benetzte Fläche hat, diese Eigenschaften benötigen wir, um die Abhebegeschwindigkeit zum Segeln auf Tragflächen möglichst früh zu erreichen.

Das nicht krängende Schiff

Man stelle sich ein Segel ganz ohne Mast vor, wo dann bestimmt kein Mastdruck entsteht: wir nehmen einfach an, ein Drachen sei unser Segel und befestigen die Drachenschnur in der Mastspur. Da man aber mit einem Drachen so schlecht unter der Fehmarn - Sundbrücke hindurch kommt, befestigen wir den Drachen an einigen Stellen am Schiff und lassen den Segelschwerpunkt auf den Lateralschwerpunkt wirken. Kleiner Nebeneffekt: das Schiff krängt nicht. Wir haben ein sogenanntes krängungsfreies Rigg. Wenn ein Schiff aber nicht krängt, dann braucht man auch keinen Kiel am Rumpf oder einen breiten Jollenrumpf oder zweiten Katamaranrumpf.

Wenn wir uns für das Rennruderboot entschieden haben, dann geht der Kampf um die Verringerung des Widerstandes weiter. Auch ein Rennruderboot hat Formwiderstand und dieser steigt wieder quadratisch mit der Geschwindigkeit an und im Wasser ist der Widerstand sowieso schon 820 mal größer als in Luft. Außerdem bremst die benetzte Fläche.

Ab einer bestimmten Geschwindigkeit kommt man an Hydrofoils nicht vorbei, welche natürlich die damit verbundenen Probleme mit sich bringen.

Hydrofoils oder Hydrofoil? Ist eine Wassertragfläche nicht ausreichend?

Mann könnte eine Wassertragfläche durch ein Lufthöhenruder ersetzen, erkaufte sich für den geringeren Wasserwiderstand aber den Nachteil, daß das Schiff permanent um eine zusätzliche Achse, die Querachse, gesteuert werden muß.

Die Jagd nach Verringerung des Widerstandes geht weiter, jetzt in der Luft. Auch in der Luft wächst der Widerstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, weshalb auch hier alle Widerstandsarten bedacht werden müssen. Auch Schumacher hat an seinem Rennwagen den Luftwiderstand bei jedem Detail minimiert. An einer aerodynamischen Verkleidung von Rumpf und Rigg und der Berücksichtigung aller Restwiderstände kommt man nicht vorbei. Der scheinbare Wind, mit dem wir es ja zu tun haben, trifft uns gewohntermaßen schräg von vorn. Warum nicht genau von vorn, dann würde man sehr viel Luftwiderstandsfläche einsparen, da die Projektion des Rumpfes in seiner Längsachse den geringsten Widerstandsquerschnitt ergibt: das Schiff (Rumpflängsachse) (wird nach dem Abheben in Richtung des scheinbaren Windes gesteuert (nach Faden wie beim Segelflugzeug, Hydrofoils in Fahrtrichtung).

Sollte es nun eine Proa sein? Andere haben es mit der Proa bereits versucht, aber sie haben die Vorteile der Proa gar nicht genutzt.

1. Asymmetrie
2. Wind von der gleichen Seite, deshalb nur halbe Tragflächenanzahl, geringes Gewicht.
3. Kräfte arbeiten nicht gegeneinander.
4. Die Wende ist problemloser, weil man nicht durch den Wind muß(siehe Vorteile der Proa).
5. Die Nutzung eines hebenden Riggs ist möglich.

Wenn wir wissen, wie ein Speedsegelboot grob aussehen muß, beginnt erst unser Nichtwissen. Einige Fragen lauten:

Wieviel Segelfläche wird benötigt, soll die Segelfläche ein Drachen sein, oder soll das hebende Segel mit dem Boot fest verbunden sein, welche Neigung ist am sinnvollsten, wie lenkt man die Luftkraft auf den Lateralschwerpunkt, welches Seitenverhältnis, welche Profilwölbung u.s.w.?

Wieviele Hydrofoils soll man nehmen, wie sollen sie aussehen, wie sollen sie geneigt sein, wieviel Fläche ist sinnvoll, auch hier das Seitenverhältnis u.s.w.? Wie soll gesteuert und getrimmt werden?

Viele Faktoren greifen ineinander und alle verändern sich laufend. Man kann ein Tabellenkalkulationsprogramm erstellen, welches zeigt, wie sich alle anderen Werte ändern, wenn man einen einzelnen Wert variiert und ob es überhaupt realistisch ist, ein bestimmtes Speedbootprojekt zu bauen. Hier ist eine solche Tabelle abgedruckt. Für jeden Wert in der Ergebnisspalte gibt es eine Formel im Computerprogramm.

Unten:

Tabellenkalkulation

Auftrieb, Vortrieb und Widerstand für 100 Km/h - Segelboot (StarCalc)

Horst Sammler, Alexanderstr.18, D-45130 Essen, Tel./Fax 02018775624/5

Nov.1999

Wer macht mit?

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit	Formel	Ergebnisse
Vfe	Fahrt bei Endgeschwindigkeit	m/sek		27,78
G= Al+Aw	Gewicht	Kp		200
cal	Auftriebsbeiwert Luft	dimensionslos		1,5
vwwa	wahrer Wind	m/sek		11,11
vww	wahrer Wind für Endgeschwindigkeit	m/sek		11,11
wsa	scheinbarer Wind beim Abheben		$w_{sa}=v_{ww}$	10
wse	scheinbarer Wind bei Endgeschwindigkeit	m/sek	Wurzel aus Qu	25,46
Beta	Windeinfallswinkel	Grad	$\sin \text{Beta}=V_{ww}$	23,6
qwww	Staudruck wahrer Wind	Kp/m ²	$v_{ww}^2 / 16$	7,72
qwsa	Staudruck scheinbarer Wind beim Abheben	Kp/m ²	$w_{sa}^2/16$	6,25
qwse	Staudruck scheinbarer Wind bei Endgeschwindigkeit	Kp/m ²	$w_{se}^2/16$	40,51
Fs	Segelfläche	m ²		6
G/Fs	Segelflächenbelastung	Kp/m ²		33,33
Lwww	Luftkraft bei wahren Wind	Kp	$cal \cdot q_{www} \cdot F_s$	69,44
Lws	Luftkraft scheinbarer Wind	Kp	$cal \cdot q_{ws} \cdot F_s$	364,58
Awww	Auftrieb Luft w. Wind	Kp	$L_{www} \cdot \cos(\text{delt})$	34,72
Aws (AL)	Auftrieb Luft s. Wind	Kp	$L_{ws} \cdot \cos(\text{delt})$	182,29
Qw	Querkraft wahrer Wind	Kp	$L_{www} \cdot \sin(\text{delt})$	58,45
Q	Querkraft scheinbarer Wind	Kp	$L_{ws} \cdot \sin(\text{delt})$	306,89
AQsW	Auftrieb durch Querkraft scheinbarer Wind	Kp	$Q \cdot \sin 45$	217
AQwW	Auftrieb durch Querkraft wahrer Wind	Kp	$Q_w \cdot \sin 45$	41,33
V	Vortrieb	Kp	$Q \cdot \sin \text{gamma}$	72,16
caw	Auftriebsbeiwert Wasser	dimensionslos		0,2
cww	Widerstandsbeiwert Wasser	s.o.	$caw/20$	0,01
vwa	Geschwindigkeit durchs Wasser	m/sek		27,78
qw	Staudruck Wasser	Kp/m ²	$v_{wa}^2 \cdot 51$	39351,85
Fh	Tragfläche Hydrofoil	m ²		0,1
Ge /Fh	Flächenbelastung der Hydrofoils effektiv	Kp/m ²		1652,78
Aw	Auftrieb Wasser	Kp	$caw \cdot q_w \cdot F_h \cdot \sin$	556,52
A =AL+Aw	Gesamtauftrieb ohne Querkraftanteil	Kp	$AL+Aw$	738,81
Ages	Gesamtauftrieb mit Querkraftanteil	Kp	$AL+Aw+AQ$	955,81
∇	Anstellwinkel Luft	Grad		10
®	Windeinfall scheinbarer Wind	Grad		23,6
©	®-∇	Grad		13,6
sin©		dimensionslos		0,24
Wid s	Luftwiderstand Segel	Kp	$cwl \cdot q_{ws} \cdot F_s$	18,23
Wid Rigg	Luftwiderstand Rigg	Kp	$cwl \cdot q_{ws} \cdot F_r$	3,04
Wid Ru	Luftwiderstand Rumpf	Kp	$cwl \cdot q_{ws} \cdot F_R$	0,91
Wid Luft	Luftwiderstände	Kp		22,18
Ww	Wasserwiderstand	Kp	$cww \cdot q_w \cdot F_h$	39,35
W=Wl+Ww	Widerstand Luft + Wasser	Kp		61,53
Ge	effektives Gewicht	Kp		165,28
vaw	Abhebegeschwindigkeit aus Wasser	m/sek	Wurzel(Ge/caw)	12,86
LS	Abstand Segelschwerpunkt zum Schwerpunkt	m		2
LB	Abstand der Rumpfmitten	m		3
Mk	Krängungsmoment?	mkp	$L \cdot LS$	138,89
Ma	aufrichtendes Moment?	mkp	$G \cdot LB/2$	300
Vf/Vww	Verhältnis Bootsgeschwindigkeit zu wahrer Wind	dimensionslos		2,5
Vk	Kentergeschwindigkeit (nicht hebendes R)	m/sek	Wurzel (16*G)	16,33
val	Abhebegeschwindigkeit in die Luft (Al=G)	m/sek		26,67
Ag	Auftrieb Gleitflächen	kp	$0,2 \cdot v_w^2 \cdot 50 \cdot F$	48
Fr	Restfläche	m ²		1
FR	Rumpffläche	m ²		0,3
cwl	Beiwert Luftwiderstand		$cal/20$	0,08
cww	Beiwert Wasserwiderstand		$caw/20$	0,01
TM	Schrägstellung des Mastes für Auftrieb	° Grad		60
∏	Neigung der Hydrofoils	° Grad		45

Widerstandsbeiwerte für Luft und Wasser müssen gemessen werden

ebenso Windeinfallswinkel und caww vor Heck- und Dwersanker

anfahen bei halbem Wind, dann um den Winkel Beta=23 Grad abfallen.

Meßstrecke= Windrichtung +113,6°

evtl Abdrift berücksichtigen