

Wingsail Segeltabelle

Dipl.Ing.(FH), Kapt.(AG) Wolf Scheuermann

Forschungskontor für angewandte Mathematik

Hamburg 2014

Inhalt

Wingsail ... 2

Nomenklatur und Geometrie ... 3

Modellbeschreibung ... 4

Wingsail0015 ... 5

Wingsail0315 ... 6

Wingsail0515 ... 7

Wingsail0815 ... 8

Wingsail1015 ... 9

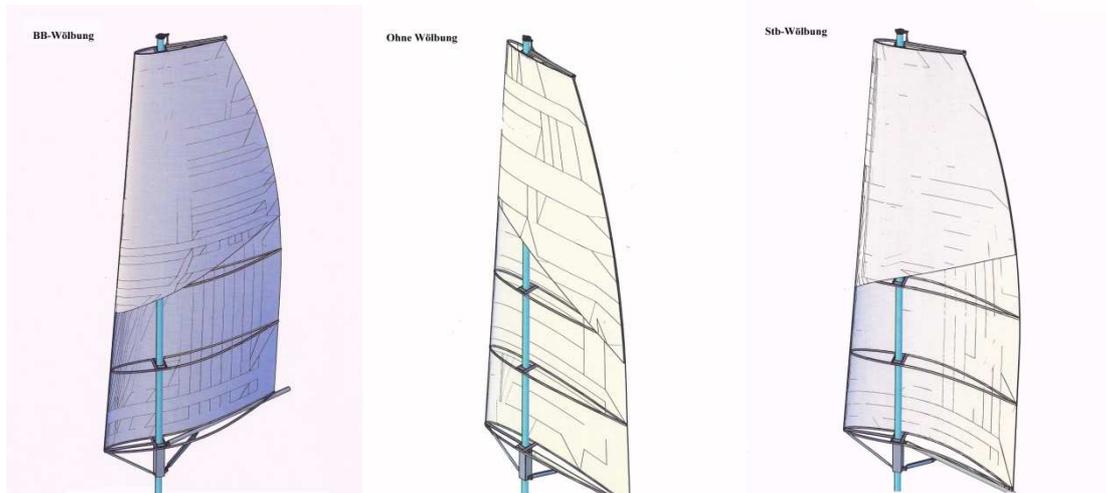
Auswertung ... 10

Segeltabelle ... 12

Quellen ... 13

Wingsail

Im Gegensatz zu konventionellen Segeln ist ein Wingsail im Prinzip ein vertikal freistehender Flügel mit dickem Profil.



1 Wingsail von Detlev Rost

Während beim klassischen Segel der Mast die Rolle der runden Profilnase übernimmt und das Segel selbst ein dünnes aber flexibles Profil mit passiver, selbstanpassender Wölbung darstellt, wobei aufgrund des Hebelarms der Auftriebskraft erhebliche Schotkräfte auftreten, hat ein Wingsail eine feste symmetrische Profilnase und einen flexiblen hinteren Teil bis zur Hinterkante. Der unverstakte Mast steht hierbei etwa in der Position des Angriffspunktes der Auftriebskraft. Dadurch ist das Wingsail um 360° drehbar und die Wölbung des unteren Profils mittels des Baumes einstellbar, während die oberen Profilwölbungen sich passiv anpassen.

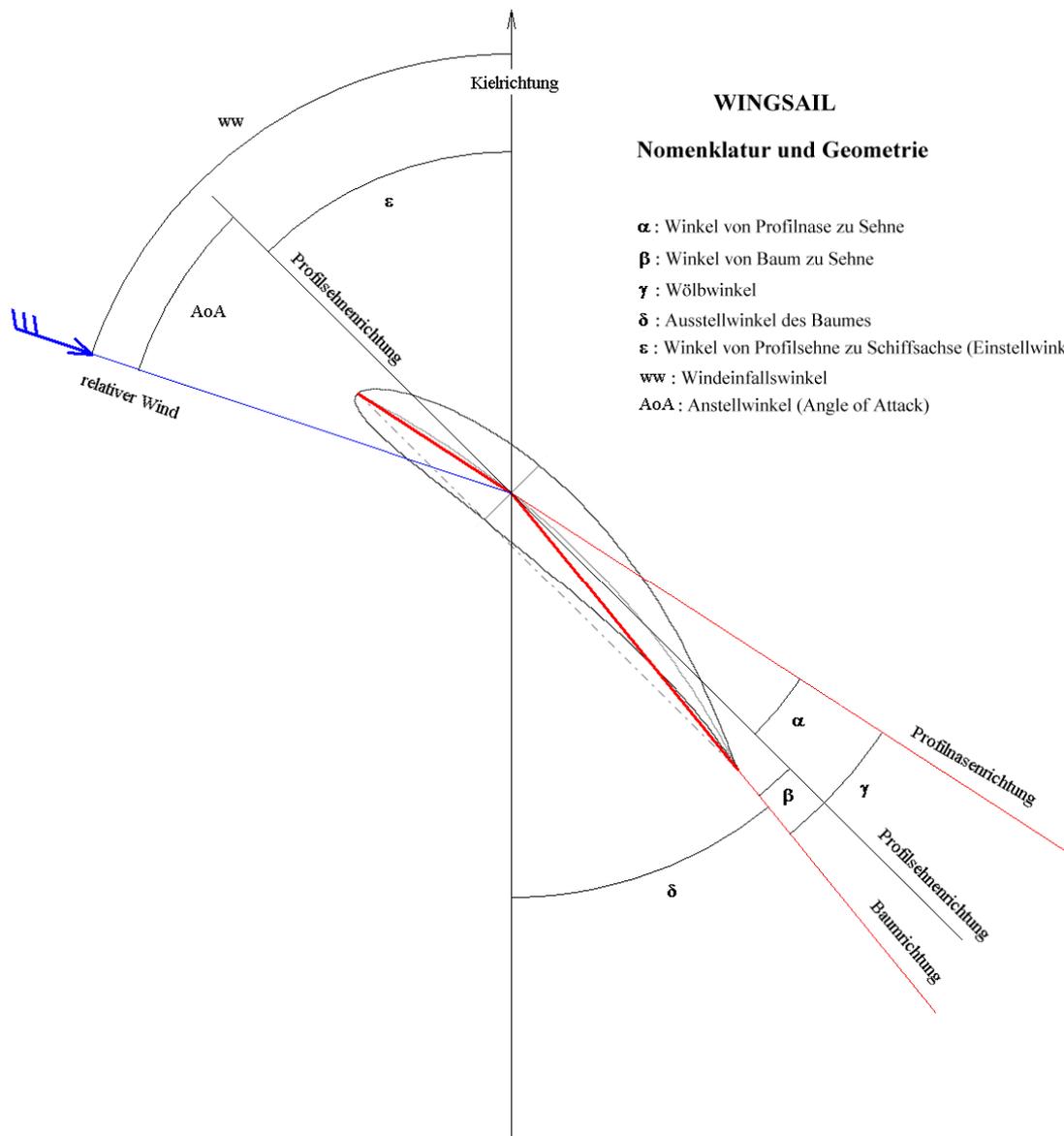
Die Schotkräfte sind sehr viel geringer als beim klassischen Segel und das Segel- und Manövrierverhalten ist deutlich verschieden.



2 Segelboot mit Omer Wingsail

Nomenklatur und Geometrie

Zur Steuerung der Profilgeometrie und der Berechnung der Zusammenhänge werden dafür folgende Begriffe definiert:



Formale Zusammenhänge:

$$\gamma = \alpha + \beta$$

$$\epsilon = \delta + \beta$$

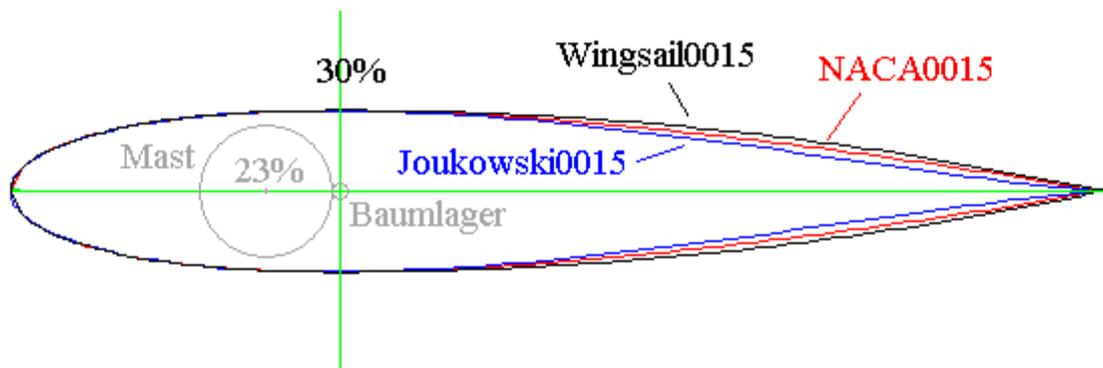
$$ww = \epsilon + AoA$$

Modellbeschreibung

Das hier beschriebene Computermodell eines Wingsail hat folgende grundlegende Größen:

- Profildicke 15%,
- Größte Dicke bei 30% Profillänge. Hier beginnt der flexible Teil des Segels.
- Mast bei 23% Profillänge um leichten Windfahneffekt zu erzielen, der Mast hat damit einen Durchmesser von maximal 12% der Profillänge.
- Lager des Baumes bei 30% der Profillänge.

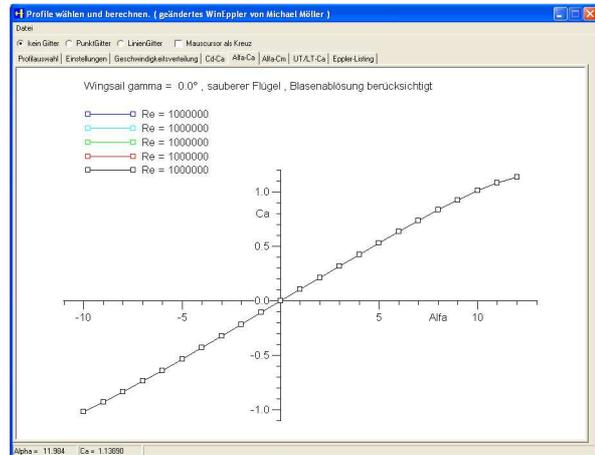
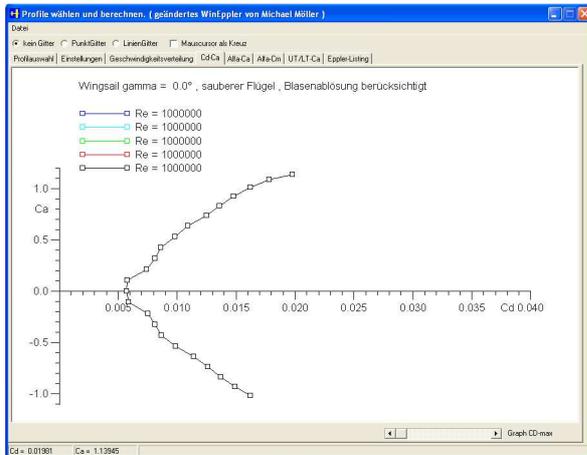
Als Profilnase kann die Nase des Profils NACA0015 verwendet werden, da diese sich nicht von der Idealform Joukowski0015 unterscheidet. Die Profilnase wird als starr angesehen und ist in ihrer Form nicht veränderlich. Im Modell Wingsail0015 wird der flexible Teil des Segels durch Parabeln dargestellt:



Im Folgenden werden die aerodynamischen Eigenschaften des so konstruierten Wingsail-Profils für verschiedene Krümmungen berechnet.

Wingsail0015

Wölbung $c = 0\%$ Wölbwinkel $\gamma = 0^\circ$



Michael Möller's Nurflügel Version 1.2

Tragflächendefinition | Aerodynamische Beiwerte | Tragflächenprofile

Tragflächendefinition: d: [data]

Alle Profildateien:

- J8.DAT
- NACA0015.DAT
- SC015.DAT
- WING00.DAT**
- WING05.DAT
- WING10.DAT
- WING15.DAT
- WING20.DAT
- WING25.DAT
- WING30.DAT
- WING35.DAT

Wingsail gamma = 0.0°

Anzahl Koordinaten: 201

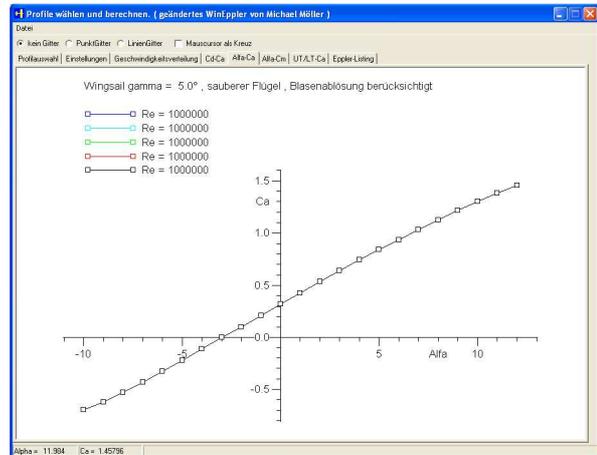
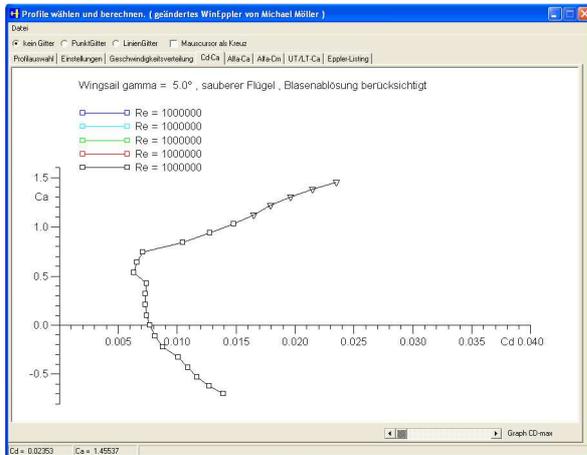
d =	15 %
xd =	31 %
f =	0.2755 %
xf =	0.3 %
alpha-0 =	0.00835 °
cm0.25 =	0.000238
dca =	7.1
xnp =	26.36 %
ae =	0.01464 °
cae =	0.0006905

$\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$

Wingsail0315

Wölbung $c = 3\%$

Wölbwinkel $\gamma = 5^\circ$



Michael Möller's Nurflügel Version 1.2

Tragflächendefinition | Aerodynamische Beiwerte | Tragflächenprofile

d: [data] | Alle Profildateien

- D:\
 - Wolf
 - Forschungskontor
 - Forschungskontor Projekte
 - Forschung Wingsail
 - Detlef Rost
 - Wölbungswinkel

- Alle Profildateien
- J8.DAT
- NACA0015.DAT
- SC015.DAT
- WING00.DAT
- WING05.DAT
- WING10.DAT
- WING15.DAT
- WING20.DAT
- WING25.DAT
- WING30.DAT
- WING35.DAT

Wingsail gamma = 5.0°

Anzahl Koordinaten: 201

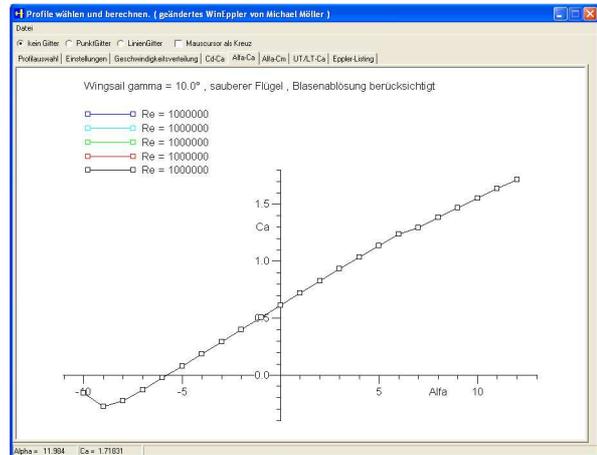
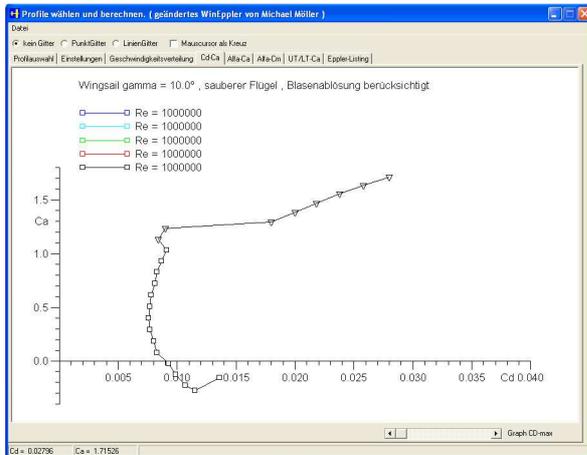
d =	15.04 %
xd =	31.25 %
f =	2.55 %
xf =	53.32 %
alpha-0 =	-3.005 °
cm0.25 =	-0.08609
dca =	7.1
xnp =	26.34 %
ae =	0.01227 °
cae =	0.3311

$\alpha = 4^\circ$ $\beta = 1^\circ$

Wingsail0515

Wölbung $c = 5\%$

Wölbwinkel $\gamma = 10^\circ$



Michael Möller's Nurflügel Version 1.2

Tragflächendefinition | Aerodynamische Beiwerte | Tragflächenprofile

d: [data] | Alle Profildateien

- D:\
 - Wolf
 - Forschungskontor
 - Forschungskontor Projekte
 - Forschung Wingsail
 - Detlef Rost
 - Wölbungswinkel

- J8.DAT
- NACA0015.DAT
- SC015.DAT
- WING00.DAT
- WING05.DAT
- WING10.DAT
- WING15.DAT
- WING20.DAT
- WING25.DAT
- WING30.DAT
- WING35.DAT

Wingsail gamma = 10.0°

Anzahl Koordinaten: 199

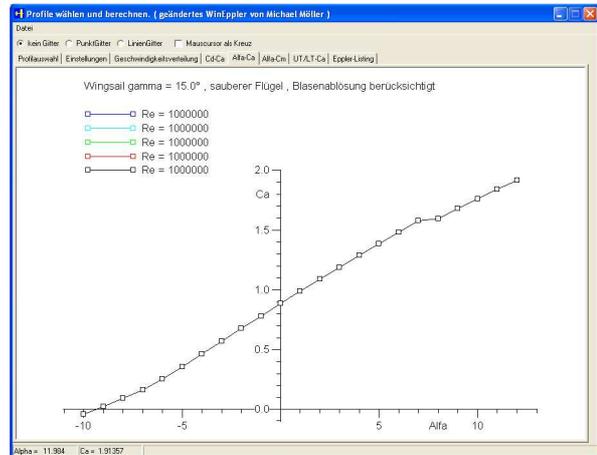
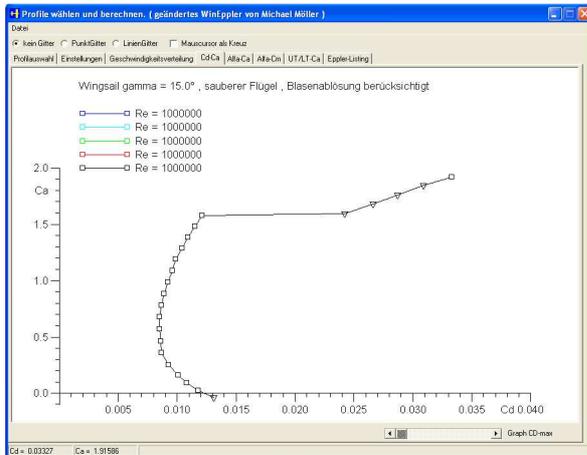
d =	15.16 %
xd =	29.9 %
f =	5.082 %
xf =	54.1 %
alpha-0 =	-5.947 °
cm0.25 =	-0.1699
dca =	7.1
xnp =	26.26 %
ae =	0.0638 °
cae =	0.6595

$\alpha = 7^\circ$ $\beta = 3^\circ$

Wingsail0815

Wölbung $c = 8\%$

Wölbwinkel $\gamma = 15^\circ$



Michael Möller's Nurflügel Version 1.2

Tragflächendefinition | **Aerodynamische Beiwerte** | Tragflächenprofile

d: [data] | Alle Profildateien

- D:\
 - Wolf
 - Forschungskontor
 - Forschungskontor Projekte
 - Forschung Wingsail
 - Detlef Rost
 - Wölbungswinkel**
 - WING15.DAT**
 - WING20.DAT
 - WING25.DAT
 - WING30.DAT
 - WING35.DAT

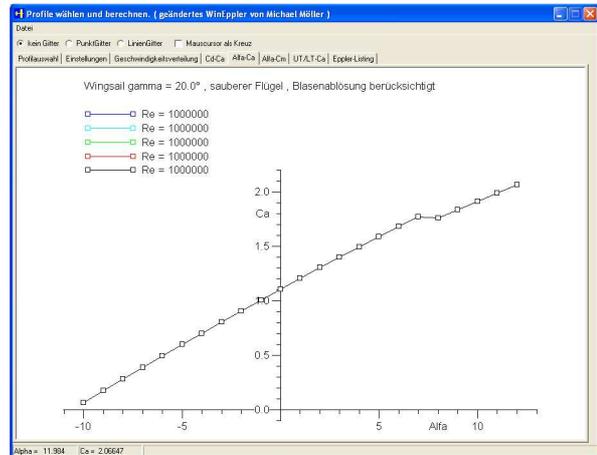
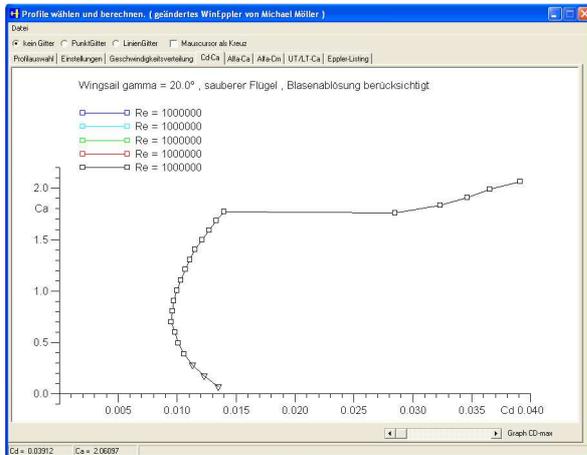
Wingsail gamma = 15.0°
Anzahl Koordinaten: 197

d =	15.36 %
xd =	29.95 %
f =	7.577 %
xf =	52.3 %
alpha-0 =	-8.711 °
cm0.25 =	-0.2476
dca =	7.101
xnp =	26.12 %
ae =	0.2323 °
cae =	0.9812

$\alpha = 11^\circ$ $\beta = 4^\circ$

Wingsail1015

Wölbung $c = 10\%$ Wölbwinkel $\gamma = 20^\circ$



Michael Möller's Nurflügel Version 1.2

Tragflächendefinition | Aerodynamische Beiwerte | Tragflächenprofile

d: [data] Alle Profildateien

- D:\
 - Wolf
 - Forschungskontor
 - Forschungskontor Projekte
 - Forschung Wingsail
 - Detlef Rost
 - Wölbungswinkel**

- J8.DAT
- NACA0015.DAT
- SC015.DAT
- WING00.DAT
- WING05.DAT
- WING10.DAT
- WING15.DAT
- WING20.DAT**
- WING25.DAT
- WING30.DAT
- WING35.DAT

Wingsail gamma = 20.0°

Anzahl Koordinaten: 193

d =	15.62 %
xd =	28.44 %
f =	10.02 %
xf =	52.03 %
alpha-0 =	-11.32 °
cm0.25 =	-0.3194
dca =	7.101
xnp =	25.95 %
ae =	0.451 °
cae =	1.291

$\alpha = 14^\circ$ $\beta = 6^\circ$

Formale Zusammenhänge:

$$c = \frac{\gamma}{1.9 \left[\frac{\circ}{\%} \right]}$$

bzw.

$$\gamma = 1.9 \left[\frac{\circ}{\%} \right] \cdot c$$

und

$$\alpha = 0.73 \cdot \gamma$$

$$\beta = 0.27 \cdot \gamma$$

wobei c (camber) die Wölbung bezeichnet.

Um abzuschätzen wie hoch man an den Wind gehen kann, fordern wir, daß der minimale Auftriebsbeiwert in Vorausrichtung bei Hartwindlage einen bestimmten Wert (Ca_{min}) nicht unterschreitet. Dieser Wert wird hier mit 0.3 angesetzt. Damit sollte sich eine ausreichende Vortriebskraft ergeben, die Wasser-, Wellen- und Luftwiderstand eben noch zu überwinden vermag.

Da der Auftrieb (etwas idealisiert) senkrecht zur Profilschneide steht, ist die Vorkomponente proportional zum Sinus des Einstellwinkels ϵ . Da weiterhin Ca_{min} abhängig vom aktuellen Ca, dem Anstellwinkel AoA und dem Einstellwinkel ϵ ist, ergibt sich z.B. bei einer Wölbung von $c = 8\%$ und einem Anstellwinkel von $AoA = 8^\circ$:

$$Ca = 1.60$$

$$Ca_{min} = 0.3 = Ca \cdot \sin(\epsilon_{min}) = 1.60 \cdot \sin(\epsilon_{min})$$

Daraus folgt:

$$\sin(\epsilon_{min}) = 0.1875 \Rightarrow \epsilon_{min} = 10.8^\circ \approx 11^\circ$$

Zusammenfassend:

Kriterium:	Einstellwinkel		Epsilon ϵ_{min}	
	$Ca_{min} = Ca(c, AoA) \cdot \sin(\epsilon_{min}) = 0.3$			
Wölbung	AoA 8°	AoA 4°	AoA 0°	
0%	21	44	---	
3%	15	24	71	
5%	13	17	29	
8%	11	13	20	
10%	10	12	16	

Der Windeinfallswinkel ergibt sich als Summe aus Anstell- und Einstellwinkel. Im Beispiel

$$\epsilon_{min} + AoA = 11^\circ + 8^\circ = 19^\circ$$

Im Überblick ergeben sich folgende minimalen Windeinfallswinkel:

minimaler $ww_{\min} = \varepsilon_{\min} + AoA$			
Wölbung	AoA 8°	AoA 4°	AoA 0°
0%	29	48	---
3%	23	28	71
5%	21	21	29
8%	19	17	20
10%	18	16	16

Es läßt sich beobachten, daß in einem weiten Bereich von Wölbung und Anstellwinkel der minimale Windeinfallswinkel sich im Bereich von 20° bewegt. Dies bedeutet, daß man mit einem Wingsail bis 20° an den Wind gehen könnte und beim Aufkreuzen jedem konventionellen Segelschiff weit überlegen wäre.

Praktisch wird der Winkel etwas schlechter sein, da hier nur das untere Profil und dazu in idealisierter Weise betrachtet wird. Aber selbst ein minimaler Windeinfallswinkel von 30°- 40° wird immer noch einen gewaltigen Vorteil darstellen.

Wenn der Windeinfallswinkel ww gemessen wird und das Wingsail über den Ausstellwinkel δ des Baumes sowie den Wölbwinkel γ des Profils kontrolliert wird, läßt sich eine Segeltabelle theoretisch berechnen.

Die Messung des Windeinfallswinkels kann mit einem konventionellen (auch elektronischen) Verklicker an der Mastspitze erfolgen. Allerdings sollte der Verklicker mindestens 0.5 m über dem Wingtip sitzen, um außerhalb des Bereichs des Randwirbels die Windrichtung zu messen. Die Winkel, welche das Wingsail steuern, sollten am Kontrollmechanismus des Segels einstellbar bzw. ablesbar sein.

Segeltabelle

Abhängig vom gemessenen Windeinfallswinkel ww wird der Anstellwinkel AoA vorgegeben. Berechnungen ergeben, daß AoA entweder kleiner 10° oder in der Nähe von 90° sein sollte. Damit ergibt sich der Einstellwinkel ε . Bis halben Wind wird die Wölbung c aerodynamisch unkritisch bei 8% gehalten, darüber maximale Wölbung. Der Wölbwinkel γ ergibt sich daraus und der letztlich für die Segelmanöver interessante Ausstellwinkel δ des Baumes.

Ca_{eff} ist der in Vorausrichtung wirkende Teil des Auftriebs.

Letztlich ist die folgende Segeltabelle nur theoretisch errechnet. Sie sollte in Testfahrten überprüft, korrigiert und gegebenenfalls ergänzt werden, z.B. um tatsächlich erreichte Geschwindigkeiten.

ww	AoA	ε	c	γ	β	α	δ	Ca	Ca _{eff}
20°	8°	12°	8%	15°	4°	11°	8°	1.60	0.33
30°	8°	22°	8%	15°	4°	11°	18°	1.60	0.60
40°	8°	32°	8%	15°	4°	11°	28°	1.60	0.85
50°	8°	42°	8%	15°	4°	11°	38°	1.60	1.07
60°	8°	52°	8%	15°	4°	11°	48°	1.60	1.26
70°	8°	62°	8%	15°	4°	11°	58°	1.60	1.41
80°	8°	72°	8%	15°	4°	11°	68°	1.60	1.52
90°	8°	82°	10%	19°	5°	14°	77°	1.77	1.75
100°	10°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	1.77	1.77
110°	20°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	1.77	1.77
120°	30°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	2.00	2.00
130°	40°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	2.30	2.30
140°	50°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	2.50	2.50
150°	60°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	2.70	2.70
160°	70°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	3.00	3.00
170°	80°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	3.30	3.30
180°	90°	90°	10%	19°	5°	14°	85°	3.50	3.50

Quellen

- Detlev Rost, private Mitteilung, Hamburg 2014
- Richard von Mises: Theory of Flight, p.128, Dover, New York 1959
- Holt Ashley, Martin Landahl: Aerodynamics of Wings and Bodies, p.54, Dover, New York 1985
- Frank Ranis: NURFLUEGEL.EXE according to Michael Möller's Nur.exe and Wineppler.exe, based on the work of Dipl.-Ing. Jochen Schneider, Dipl.-Ing. Erich Truckenbrodt, Prof. Dr. R. Eppler, John G. Roncz's Eppler.exe, n.n. 2002
- Omer Wingsail, <http://omerwingsail.com/>, Internet 2014