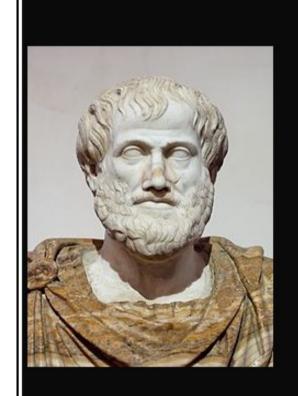
Aerodynamik des Segelns

SKM-Vortrag zum 1. April 2016 Peter Boese



Wir können den Wind nicht ändern, aber die Segel anders setzen.

(Aristoteles)

gutezitate.com

Ein wunderbares Zitat nicht nur für Segler:

Die Naturkräfte können wir nicht verändern aber wir müssen sie verstehen…

...·denn die <u>Segelführung</u> und den <u>Kurs</u> müssen wir selbst wählen, denn <u>wir</u> sind die Mannschaft!·

Aerodynamik des Segelns

Wir Segler bewegen uns an der Grenze zwischen zwei Medien:

Das Wasser

- Hat eine ca. 800 mal höhere Dichte als die Luft
- trägt unser Boot: Auftrieb (statisch Verdrängung/Archimedes), dynamisch (Gleit- und Tragflächenboot)
- gibt dem Boot Stabilität in Quer- und Längsrichtung
- bietet der Vorwärtsbewegung einen Widerstand, der mit wachsender Geschwindigkeit stark ansteigt und schließlich für "Verdränger" unüberwindlich wird
- bietet der seitlichen Bewegung eine Gegenkraft (durch Lateralflächen), sodass der Kurs gehalten werden kann
- Der Seegang erzeugt Bootsschwingungen und zusätzlichen Widerstand

Die Luft (-bewegung = Wind)

- erzeugt Druckkräfte am Segel (und Überwasserschiff), die mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit ansteigen
- zwar ist die Dichte der Luft ca. 800 mal geringer als die des Wassers, aber bei steigender Windgeschwindigkeit im Quadrat (!) können die Windkräfte die Wasserkräfte im Gleichgewicht halten
- die resultierende Druckkraft am Segel erzeugt durch entsprechende Kursrichtung, Segelstellung und -form eine "nützliche" vorwärts gerichtete Komponente (Vortriebskraft) und eine "schädliche" seitwärts gerichtete Komponente (Querkraft/Krängungskraft)
- das Können der Mannschaft ist darauf gerichtet den Kurs und die Segel so zu setzen, dass bei Einhaltung von Sicherheitsgrenzen (max. Krängung, Kursstabilität) die optimale Geschwindigkeit gehalten wird

Der Wind

Der "wahre" Wind:

- Luftbewegung an Land und über dem Wasser
- Sichtbar an den Wellen, an anderen Seglern
- ablesbar am Instrument ("true wind"), wird mit Hilfe der gemessenen "scheinbaren" Windrichtung/Geschwindigkeit und der Bootsgeschwindigkeit berechnet (Verktordreieck)
- aus welcher Himmelsrichtung und zum Kurs?
- welche Windgeschwindigkeit im Mittel, in Böen?
- welche Winddrehungen langsam, schnell?
- welche Zunahme der Windgeschwindigkeit in der Höhe?

Windprofil

Zunahme der Windgeschwindigkeit über die Höhe ü.W.

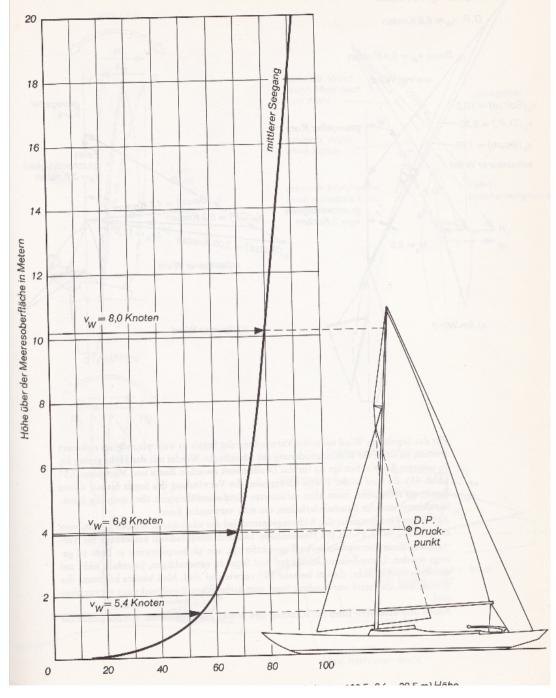
8 kn

bei mittlerem

Seegang

6,8 kn

5,4 kn



Bildquelle ff.: C.A.Marchaij, B.Wagner: Segeltheorie und -praxis, Delius Klasing, Bielefeld 1962

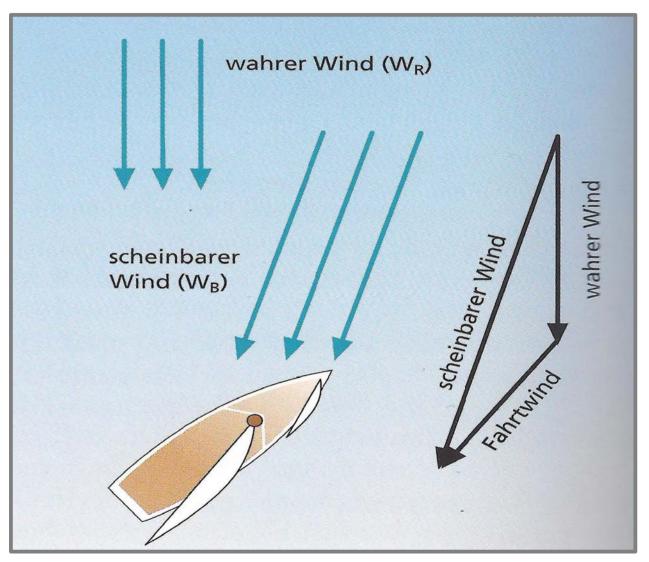
Der relative Wind

Der "scheinbare" Wind:

- Luftbewegung auf dem Boot
- was Verklicker bzw. Windex anzeigen!
- welche Richtung zur Bootsachse und zum Kurs über Grund (Abdrift!)
- welche Richtung zum Segel (Segelstellung)
- welche Windgeschwindigkeit im Mittel, in Böen
- welche Winddrehungen langsam, schnell
- welche Änderung von Windgeschwindigkeit und Richtung in der Höhe (durch das Windprofil der wahren Windes)

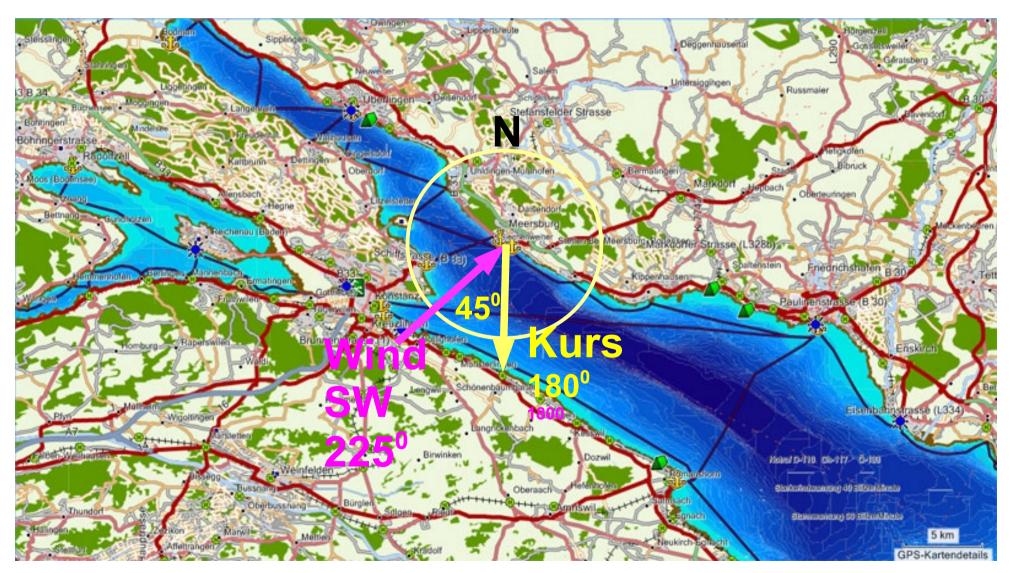
Der relative Wind

Der "scheinbare" Wind:



Bildquelle ff.: R. Denk, Handbuch Segeln, Delius Klasing, Bielefeld 2007

"wahre" Windrichtung zum Kurs = Windrichtung zu Nord -/+ Kursrichtung zu Nord (über Grund)



Ausschnitt: Bodensee Navigationskarte Open Source 2014, http://bodensee-navigationskarte.scbh.at

Der relative "scheinbare" Wind

Wir motoren aus dem Hafen und nehmen mit 5 kn Kurs gegen den Wind um Segel zu setzen.

- Der "wahre" Wind (z.B. 8 kn) plus Fahrtwind (z.B. 5 kn) addieren sich zum "scheinbaren" Wind von 13 kn von vorn.
- Das Großsegel wir gesetzt und fängt an zu "ziehen"
- Wir gehen auf Hochwindkurs mit (z.B. 20°) am "scheinbaren" Wind, d.h. ca. 45° am "wahren" Wind.
- Mit ca. 5° Abdrift erreichen wir allerdings nur noch 50° am "wahren" Wind
- Damit können wir unseren Kurs zum Ziel (z.b. von Meersburg nach Altnau) nicht ganz halten (s.Karte)...
- und müssen voraussichtlich einen Kreuzschlag einrechnen
- Taktik: Damit warten wir möglichst bis nahe am Ziel (da die Windrichtung sich unterwegs noch ändern kann)

Der relative Wind

bei verschiedenen "wahren" Windrichtungen zum Kurs

Hoch am Wind

Seitlicher Wind

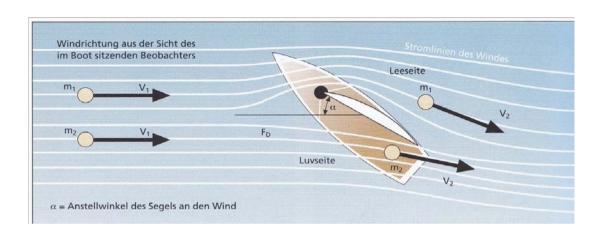
Raumer Wind

gesegelter Kurs seithigher und raumer Wind v_S— Fahrt-geschwindigkeit (unes)

Vorm Wind

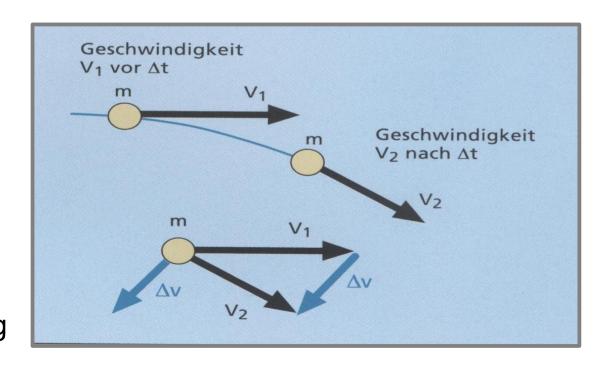
Das Segel "zieht"

Luftströmung am Segel (anliegende Strömung)



Vortrieb entsteht durch Umlenkung und Abbremsung der Strömung

d.h. Reaktionskraft aus Richtungs- und Geschwindigkeits-Änderung der Luftströmung



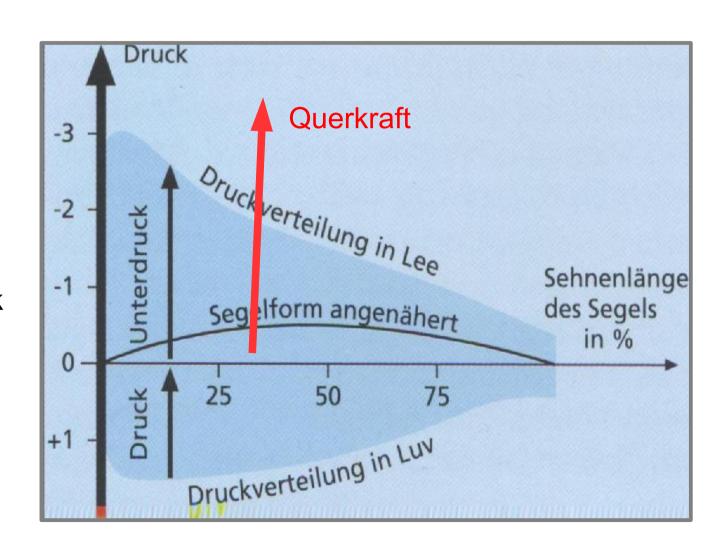
Druckverteilung am Segelprofil

Leeseite Sog

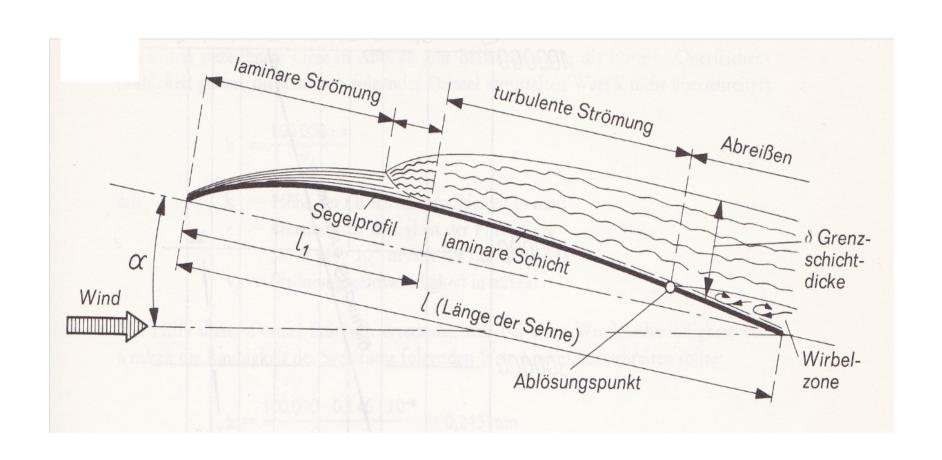
plus

Luvseite Druck

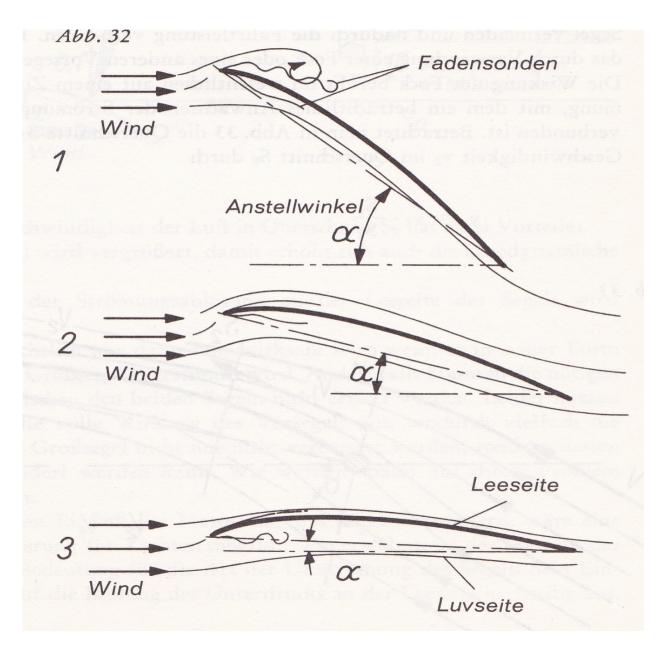
bewirkt Querkraft senkrecht zur Sehne



Segelprofil-Strömungscharakter beeinflusst Querkraft und Widerstand



Segelprofil-Strömunganzeiger



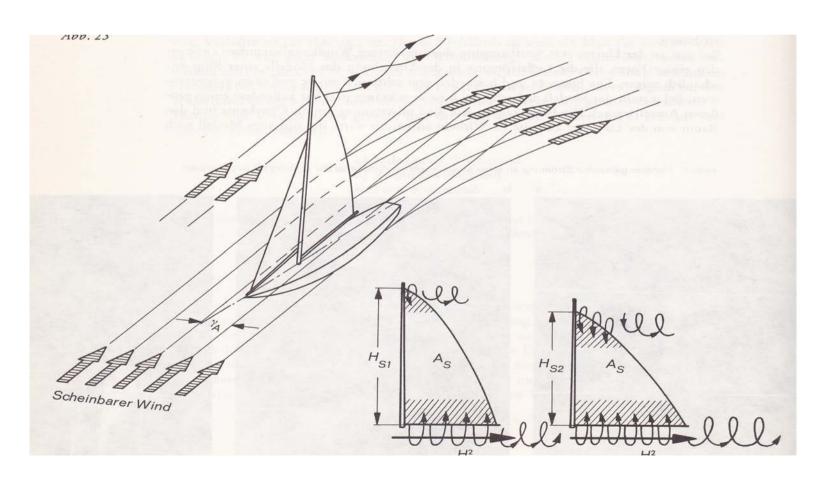
Fäden oder Bändsel

Strömungsanzeige

- (1) Anliegende Strömung (pralles Segeltuch, Bändchen anliegend)
- (2)Sich ablösende Strömung (teilweises Einbeulen, Bändchen drehen sich)
- (3) Abreißende Strömung (Segel killt, Bändchen wirbeln)

Windwiderstände

- Rauhigkeit Segel, Deck
- Formwiderstände/Wirbel an Segelprofil, Rigg, Überwasserschiff
- Induzierte Widerstände durch Wirbel und Querkraftverluste an Segelober- und Unterkanten (s. Bild):



Induzierte Widerstände vermindern

Großsegel Oberseite: Anstellwinkel und Profiltiefe reduzieren (auswehen

lassen); analog moderne Flugzeug

Großsegel Unterseite:

- Breiter flacher Großbaum
- Breite Segelbergetaschen ("Lazy Bag")



Vorsegel Unterseite:

 Genua möglichst dicht über Deck fahren.





Wie entstehen Windkräfte am Segel

Am Wind:

- Gesamte Summe der Druckkräfte am Segel werden gedanklich zerlegt in 2 Kraftkomponenten:
- Nützliche Sogkraft ("aerodynamischer Auftrieb") nach vorn gerichtete Komponente
- Schädliche Querkraft (aerodynamischer Widerstand) zur Seite und nach hinten gerichtete Komponente
- diese erzeugt Krängung und Abdrift und damit zusätzlichen Wasserwiderstand

Wie entstehen Windkräfte am Segel

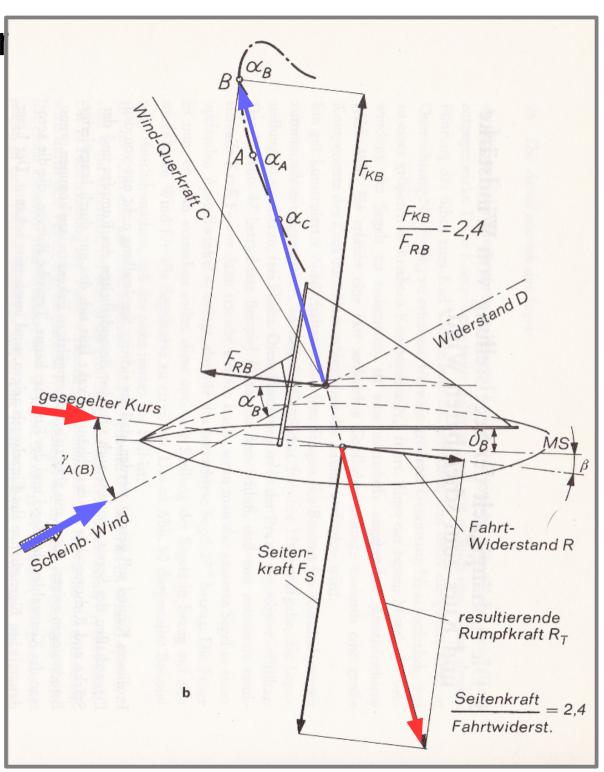
Vor dem Wind:

- Sogkraft erzeugt die meiste Vortriebskraft
- Widerstandskraft erzeugt ebenfalls nützliche Vortriebskraft, aber begrenzt
- Querkraft ist geringer je weiter man abfällt
- aber Kursstabilität kann kritisch werden

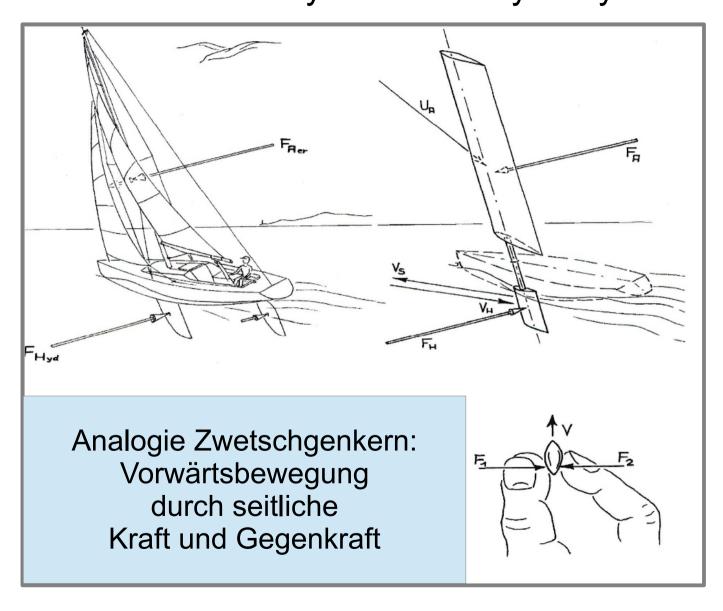
Zusammenwirken vor Windkraft und Wasserkraft

Gleichgewicht der Kräfte!

daraus ergeben sich Bootsgeschwindigkeit und gesegelter Kurs für Wind (Stärke, Richtung) und Segelstellung

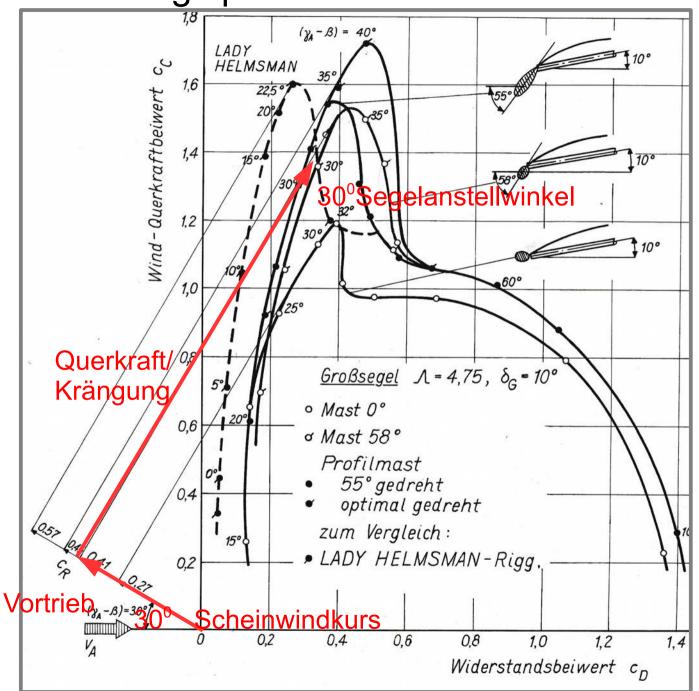


Kräftegleichgewichte aerodynamisch = hydrodynamisch



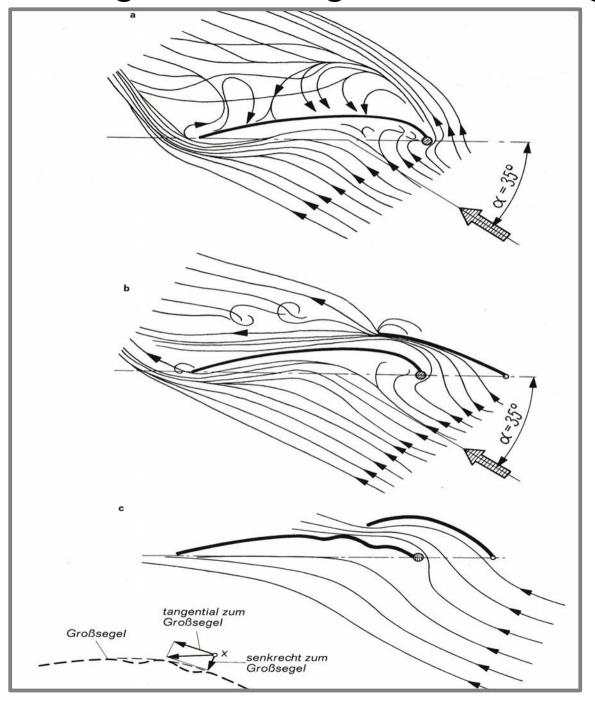
Bildquelle: P.Schenzle, Vorlesung "Segeltechnik", Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg 2014

Segelpolaren für Mastformen

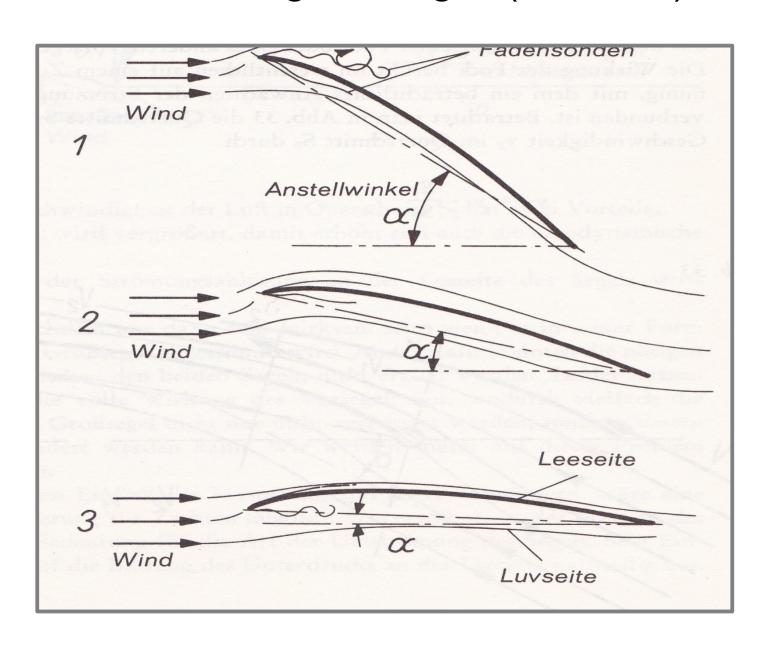


Bildquelle: B.Wagner, P.Boese: Windkanaluntersuchungen einer Segelyacht, Institut für Schiffbau Ber. 207, Hamburg 1968

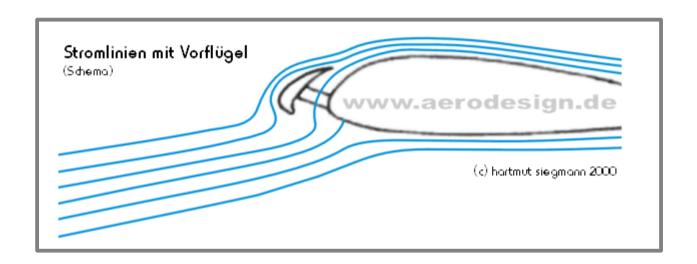
Großsegelströmung durch Vorsegel



Strömungsanzeiger (Bändsel)



Analogie Vorflügel beim Flugzeug



 Durch den Spalt wird der Strömung an der Tragflügel Oberseite frische Energie zugeführt.

•

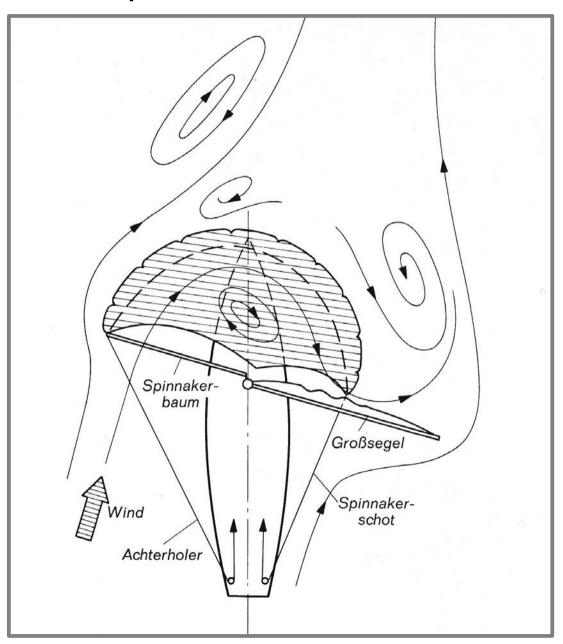
 Die Strömungsablösung wird damit bei grösseren Anstellwinkeln bei Start und Landung) verhindert.

•

• Dadurch kann der Auftrieb trotz geringerer Geschwindigkeit gehalten werden.

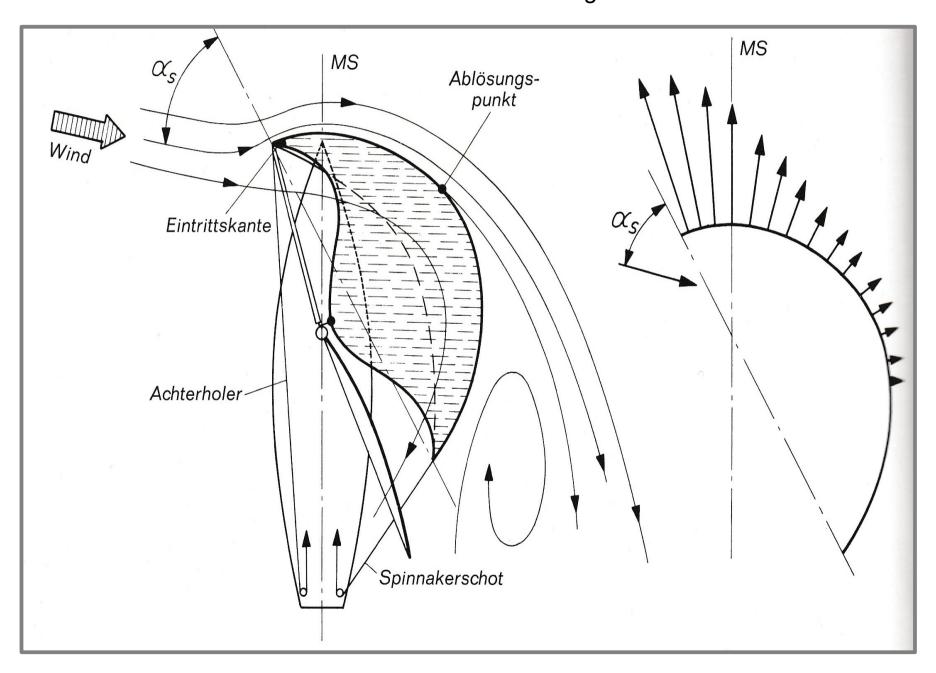
Spinnaker achterlicher Wind "platt vorm Laken"

nur Luftwiderstand gibt Vortrieb

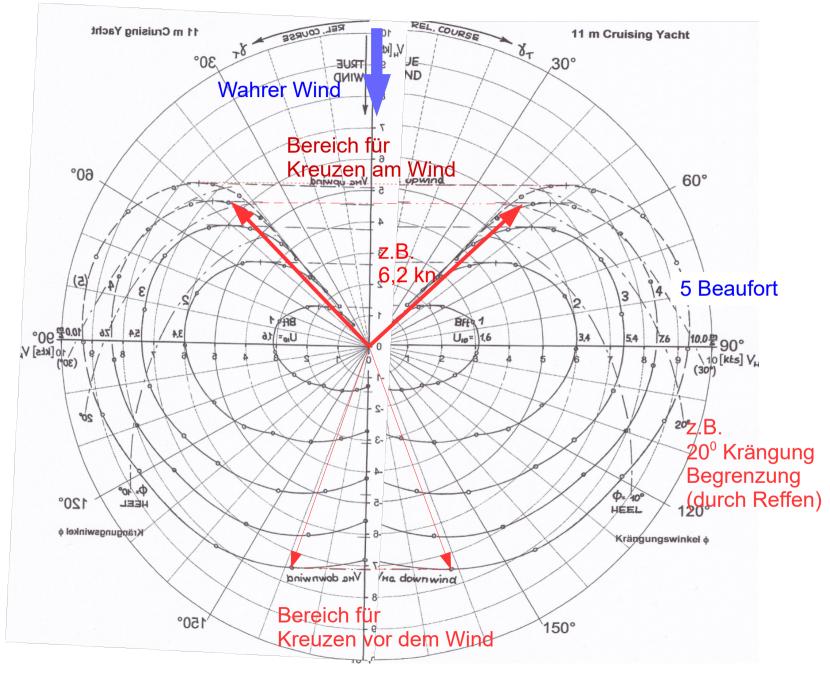


Spinnaker halber Wind

hauptsächlich Querkraft ("Auftrieb") gibt Vortrieb



Fahrtleistungsdiagramm Berechnung für 11 m Seekreuzer



Drehbarer Mast mit Doppelgroßsegel "es ging auch ohne Vorsegel+Spi"





Fotoarchiv: P.Boese, Meersburg 1973