



## Segelforschung



- [Segelforschung](#)
- 

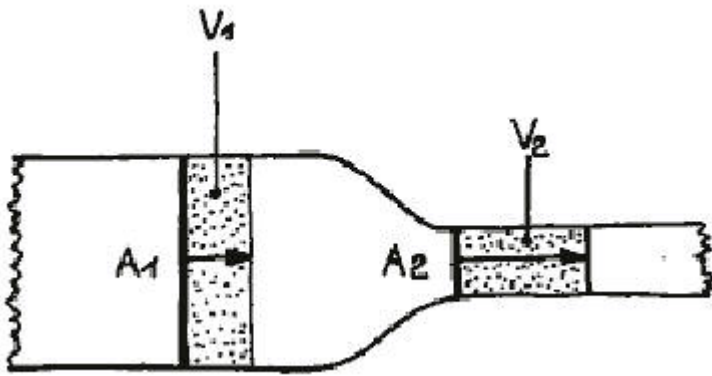
### Physik für Segler ohne Ballast

#### Allgemeines über Strömung von Flüssigkeiten und Gasen

#### Ähnlichkeiten der Verhältnisse bei strömenden Flüssigkeiten und Gasen

Flüssigkeiten sind nicht komprimierbar, d.h. zusammendrückbar. Dagegen läßt sich das Volumen von eingeschlossenen Gasen durch Druck verändern. Bei einer Strömung darf man aber auch ein Gas als nicht zusammendrückbar betrachten, wenn seine Geschwindigkeit kleiner als die Schallgeschwindigkeit ist. Die Druckänderungen sind dann bei strömenden Gasen so klein, daß keine wesentlichen Volumenveränderungen auftreten. Man darf sie vernachlässigen, so daß zwischen Gas und Flüssigkeitsströmung kein wesentlicher Unterschied mehr besteht. Für strömende Flüssigkeiten und Gase gelten daher die gleichen Gesetzmäßigkeiten. In den folgenden Abschnitten versteht man deshalb unter dem Wort "Flüssigkeit" sowohl eine Flüssigkeit als auch ein Gas.

#### Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit vom Querschnitt



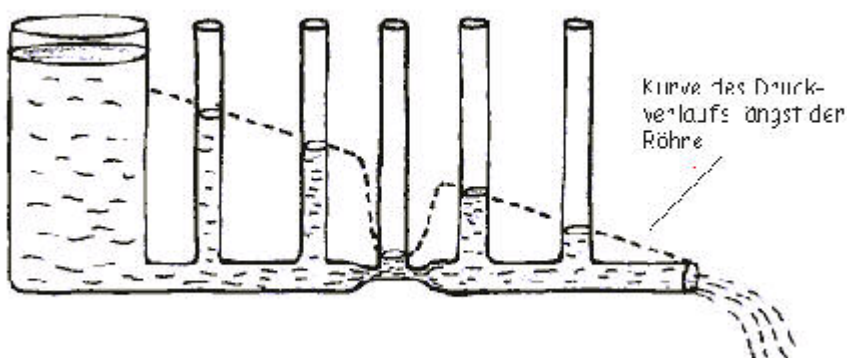
Durchströmt eine Flüssigkeit eine Röhre mit veränderlichem Querschnitt, so muß sich auch die Durchflußgeschwindigkeit ändern. Weil eine Flüssigkeit sich nicht zusammendrücken läßt, muß das in einer Zeit von z.B. 1 sek durch den Querschnitt A1 strömende Flüssigkeitsvolumen  $V_1$  ebenso groß sein wie das durch den Querschnitt A2 strömende Volumen  $V_2$ . Im Querschnitt A2 müssen die Flüssigkeitsteilchen aber eine wesentlich größere Strecke zurücklegen als im Querschnitt A1, um das gleiche Volumen zu haben. Daraus folgt, daß die Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt A2 größer ist als im Querschnitt A1. Diesen Zusammenhang bezeichnet man als Kontinuitätsgleichung.

**In einer Rohrleitung mit wechselndem Querschnitt verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie die Rohrquerschnitte.**

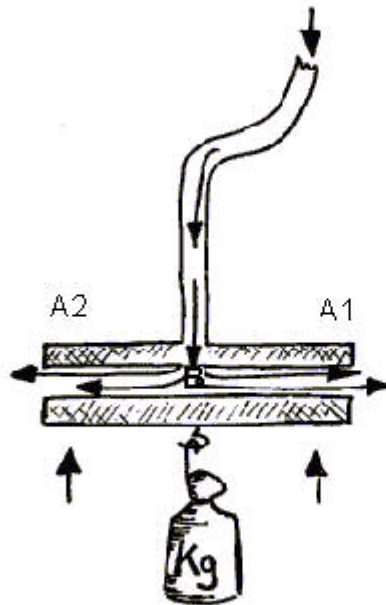
### Das Gesetz des Bernoulli

In jeder Röhre, in der eine Flüssigkeit fließt, muß ein Druck herrschen, denn sonst würde die Flüssigkeit nicht fließen. Das Gesetz von Bernoulli beschreibt den Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit und Druck. Danach verhält sich der Druck innerhalb einer Röhre umgekehrt zur Strömungsgeschwindigkeit. Das heißt: Überall da, wo die Strömungsgeschwindigkeit klein ist, ist der Druck groß und wo die Strömungsgeschwindigkeit groß ist, ist der Druck klein.

Abbildung 2 zeigt einen Versuchsaufbau, der diesen Zusammenhang verdeutlichen soll.



Ein mit Wasser gefülltes Gefäß hat am Boden eine Abflußröhre, die an einer Stelle verjüngt ist. Auf dem Abflußrohr sind mehrere kleine Röhre als Flüssigkeitsmannometer angesetzt. Die Steighöhe der Flüssigkeit kennzeichnet den dort herrschenden Druck. Entgegen einer weitverbreiteten Falschannahme herrscht an der Engstelle eine Druckminderung. Diese Tatsache gibt die Erklärung, weshalb bei manchen Strömungen Saugwirkungen entstehen. Noch einfacher erkennt man die Saugwirkung bei der als hydrodynamisches Paradoxum bezeichneten Erscheinung in Abbildung 3 Aus einer Düse strömt Druckluft durch den schmalen Zwischenraum zweier Platten. Die obere Platte ist fest, die untere lose. Im dem Bereich A1, A2 am Rand der Platte, herrscht der Luftdruck. Daher ist an der Engstelle rings um die Eintrittsöffnung B, an der die Luft viel schneller strömt, der Druck kleiner als der Luftdruck. Die untere Platte wird nicht wie man erwarten sollte vom Luftstrom weggeblasen, sondern mit einer solchen Kraft angezogen, daß sie sogar



noch ein angehängtes Gewicht tragen kann.

Abb 3. Hydrodynamisches Paradoxon

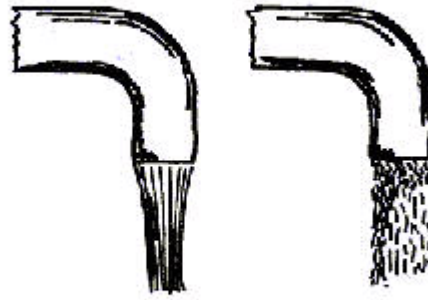
### Entstehung der inneren Reibung

Bei der Strömung einer wirklichen (nicht idealen) Flüssigkeit tritt immer Reibung auf. Sie entsteht aber nicht nur an den Berührungsflächen der Flüssigkeit mit den Röhren oder Behältern, sondern auch im Innern der Flüssigkeit, wo Schichten verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten aneinander vorbeigleiten. Deshalb bezeichnet man sie zum Unterschied gegen die äußere Reibung bei festen Körpern als innere Reibung. Man spürt sie als Widerstand wenn man einen Körper durch eine Flüssigkeit bewegt. Die unmittelbar an der Fläche anliegenden Flüssigkeitsteilchen haften in Folge der Adhäsion ganz an der Fläche und nehmen deren Geschwindigkeit an. Jede folgende Schicht bleibt dagegen etwas zurück.

Bei ebenen Berührungsflächen nimmt die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsteilchen auf einer gewissen Dicke vom vollen Betrag  $V$  gleichmäßig auf den Betrag  $0$  ab. Die Größe dieser inneren Reibung ist im Wesentlichen abhängig von der Größe der Fläche, der Zähigkeit der Flüssigkeit sowie von der Geschwindigkeit. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt auch die Reibung.

### Turbulenzen und Strömungswiderstand

Die innere Reibung tritt überall auf, wo Schichten verschiedener Geschwindigkeiten aneinander vorbeigleiten, also vor allem in den Grenzschichten zwischen Flüssigkeiten und festen Körpern. In ihnen wird zur Überwindung der inneren Reibung ein Teil der Strömungsenergie verbraucht. Bei kleinen Geschwindigkeiten ist die innere Reibung klein. Dann sind auch die von ihr verursachten Energieverluste und die Änderungen des Druckes und der Geschwindigkeit so klein, daß die aneinander vorbeigleitenden Flüssigkeitsschichten nicht zerrissen werden. Sie gleiten glatt aneinander vorbei, und die Strömung ist laminar. Wenn aber bei größerer Geschwindigkeit die Reibung stärker wird, so ändert sich das Strömungsbild merklich. Es entstehen Wirbel; die Strömung wird turbulent. Dreht man z.B. einen Wasserhahn wie in Abbildung 4 nur wenig auf, so fließt das Wasser ruhig und glatt heraus; Dreht man nun aber weiter auf, fängt die Strömung beim Überschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit an,



unruhig zu werden und Wirbel zu bilden.

Abb 4. Laminare und turbulente Strömung aus einem Wasserhahn

### Entstehung der Wirbel

Das Zustandekommen der Wirbel wird am leichtesten durch einen Vergleich mit einem mechanischen Vorgang verständlich. Rollt eine Kugel durch eine Mulde wie in Abbildung 4, so verliert sie beim Hinunterrollen eine potentielle Energie und erhöht dabei ihre Geschwindigkeit. Beim Hinaufrollen nimmt die Geschwindigkeit wieder ab und wäre ohne Reibung im Punkte C eben so groß wie im Ausgangspunkt A. Bei kleiner Reibung kommt die Kugel zwar noch den Hang hinauf, aber die Geschwindigkeit ist in C kleiner als zuvor in A. Wird aber der Energieverlust durch Reibung noch größer, so reicht die in B gewonnene kinetische Energie nicht mehr aus, um den Hang nach C hinaufzurollen. In einem Punkt D ist die Geschwindigkeit auf den Wert Null gesunken, und die Kugel rollt in die Mulde zurück.

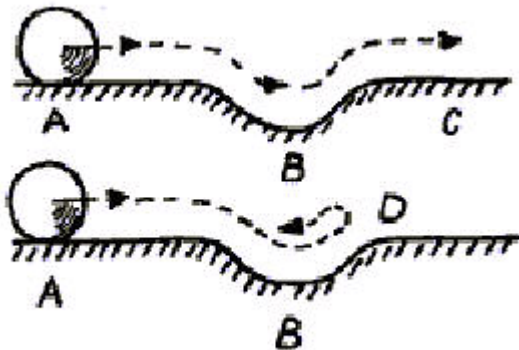


Abb. 5. Mechanischer Vergleich zur Erklärung der Wirbelbildung

Ganz entsprechend sind die Verhältnisse, wenn eine Flüssigkeit ein Hindernis, z.B. einen Zylinder, umströmt wie in Abbildung 6. Bei B entstehen Engstellen, bei denen sich nach der Kontinuitätsgleichung die Geschwindigkeit erhöht und der Druck abnimmt. Ohne Reibung wären aber bei C Geschwindigkeit und Druck wieder eben so groß wie in A. Bei kleiner Reibung treten zunächst nur unwesentliche Änderungen ein. Wenn aber bei größerer Geschwindigkeit die innere Reibung zunimmt, tritt schließlich der Fall auf, daß die Flüssigkeitsteilchen in B nicht mehr genügend kinetische Energie haben, um gegen den höheren Druck in C anzulaufen. Ihre Geschwindigkeit nimmt ab und erreicht an einer Stelle, z.B. in D den Wert Null, so daß die Flüssigkeitsteilchen umkehren und zurückströmen müssen. Beim Umkehren geraten sie in Rotation und bilden einen Wirbel. Die vorher laminare Strömung ist turbulent geworden. Die nacheinander auf beiden Seiten entstehenden Wirbel werden von der äußeren Strömung mitgenommen und bilden hinter dem Hindernis eine sogenannte Wirbelstraße.

### Die Entstehung des Auftriebs

Eine einfache Definition zur Entstehung des Auftriebs lautet so : Wird ein Körper umströmt, der zur Strömungsrichtung nicht symmetrisch ist, so sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf beiden Seiten nicht gleich. Daher gibt es nach dem Gesetz des Bernoulli Druckunterschiede, die eine seitliche Kraft auf den Körper zur Folge haben. Die Resultierende dieser seitlichen Kräfte nennt man den Auftrieb.

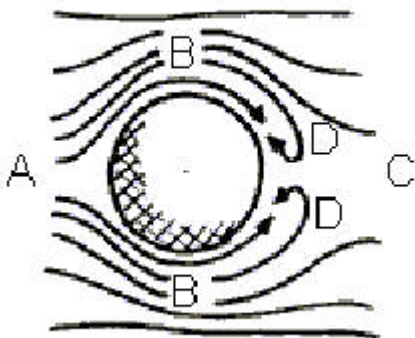
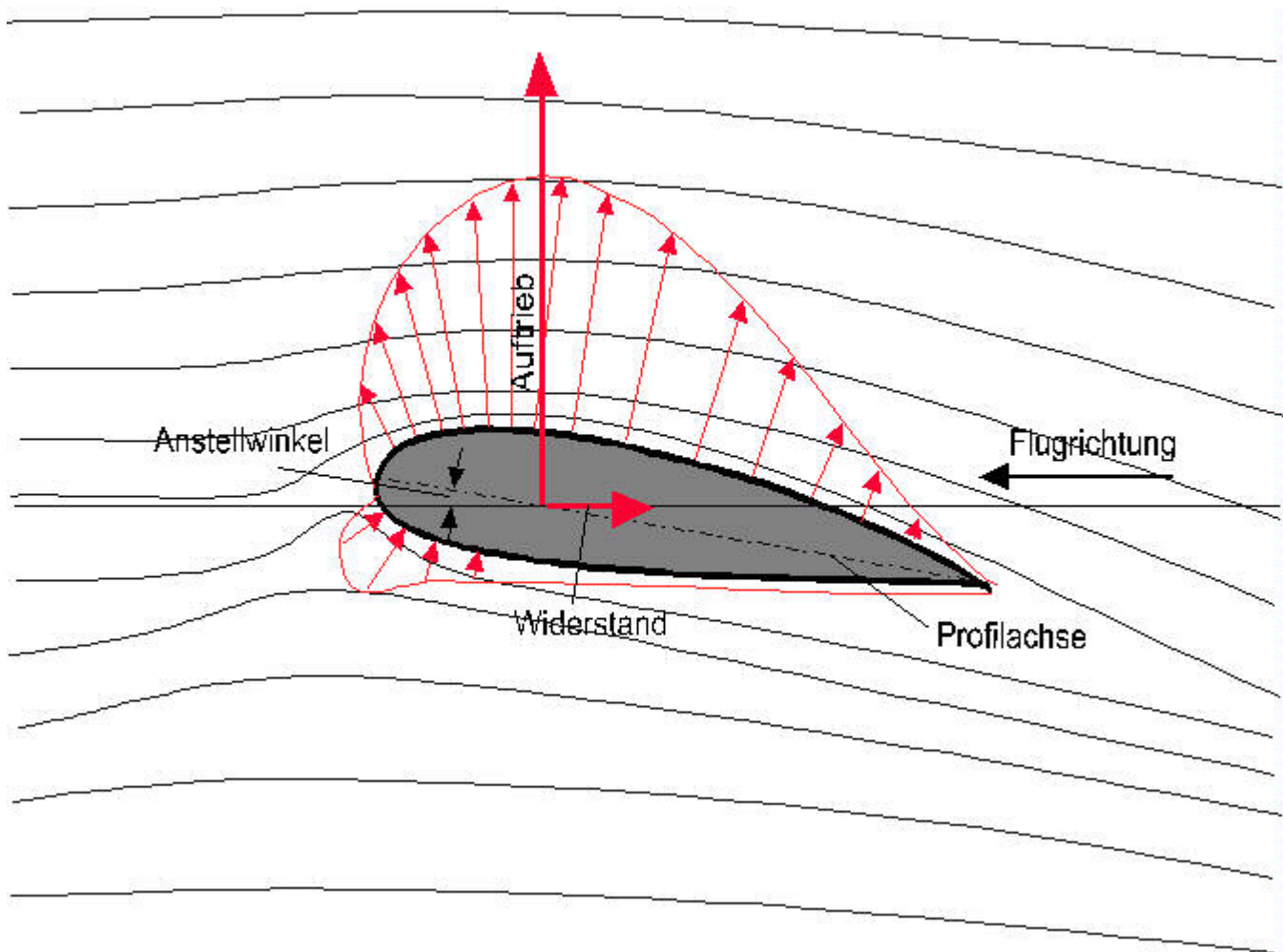


Abbildung 6 veranschaulicht die Entstehung des Auftriebs bei einem Tragflügelprofil.

An der Nase des Profils wird die Luft zum Teil gestaut. Die Form des Profils, das nach oben stärker gewölbt ist als nach unten, macht den Strömungsverlauf unsymmetrisch. Die Flüssigkeitsteilchen, die sich auf der Oberseite befinden, haben einen längeren Weg bis zum Flügelende, als die auf der Unterseite. Daraus ergeben sich unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Auf der Oberseite ist die Strömungsgeschwindigkeit größer und somit der Druck geringer. Über die gesamte Profillänge verteilt wirken jetzt Einzelkräfte, die in Richtung und Größe unterschiedlich sind. Die Resultierende aller Kräfte in Strömungsrichtung ist der Strömungswiderstand, die Resultierende aller quergerichteten Kräfte ist der Auftrieb.

### **Bedeutung des Anstellwinkels**

In Abbildung 6 bildet die Profilachse des Tragflügelprofils mit der Strömungsrichtung einen kleinen Winkel. Diesen Winkel bezeichnet man als Anstellwinkel. Wird er verändert so ändern sich auch die Kräfte Auftrieb und Widerstand. Schon bei einem kleinen Anstellwinkel entsteht ein Auftrieb. Er wächst mit der Vergrößerung des Anstellwinkels, solange die Strömung nicht von der Oberfläche des Tragflügels abreißt. Die Größe der entstehenden Auftriebskraft ist abhängig von der Größe der Fläche, dem Anstellwinkel und der Strömungsgeschwindigkeit.



## Widerstand

An jedem Auftriebskörper entsteht neben Auftrieb auch Widerstand. Dabei setzt sich der Gesamtwiderstand aus den drei Einzelwiderständen Reibung, Formwiderstand und induzierter Widerstand zusammen. Die Entstehung der inneren Reibung ist weiter oben schon erklärt.

## Formwiderstand

Der Formwiderstand entsteht im Grunde genommen durch die gleichen Kräfte, die auch für den Auftrieb verantwortlich sind. In Abb. 6 sieht man, daß die Druckkräfte in unterschiedlicher Richtung wirken. Die quer zur Strömung gerichteten Komponenten sind der Auftrieb, die in Strömungsrichtung gerichteten Komponenten bilden den Formwiderstand. Die Größe dieses Widerstandes ist im Wesentlichen von der Form des Flügels und vom Anstellwinkel abhängig. Der Formwiderstand nimmt mit größerem Anstellwinkel zu. Dabei nimmt er in der Regel mehr zu als der dazu gehörende Auftrieb. Das heißt: Bei größeren Anstellwinkeln wird das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand schlechter.

## Der induzierte Widerstand

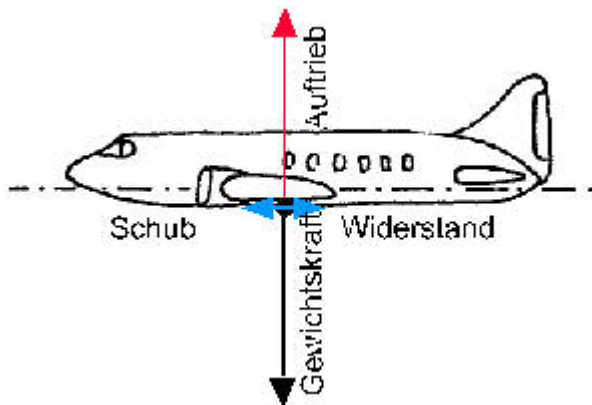
In unseren bisherigen Betrachtungen über die Druckverteilung an einem Auftriebskörper haben wir uns darauf beschränkt, die Verhältnisse an einem kleinen Querschnitt zu betrachten. Ein wirklicher Flügel oder ein Segel, hat aber zwei Enden. Die Vorgänge an den Enden sind von entscheidender Bedeutung für die Gesamtwirkung des Flügels. Der Auftrieb entsteht durch einen Druckunterschied zwischen der Ober- und Unterseite des Flügels. An den Enden des Flügels, kommt es aufgrund des Druckunterschiedes zu einer Umströmung, die quasi quer zur allgemeinen Strömung verläuft. Diese Querströmung mischt sich mit der allgemeinen Strömung und bildet eine Wirbelschlepe, die letztendlich für den induzierten Widerstand verantwortlich ist. Bei einem Segel ist dieser Widerstand oft der größte Anteil am Gesamtwiderstand. Selbst bei einem Flugzeug ist der überwiegende Widerstand der induzierte Widerstand. Bei dem Entwurf von Flügeln, die ein gutes Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand haben sollen, muß besonderer Augenmerk auf die Wirbelbildung an den Enden gelegt werden. Ein Mittel zur

Minimierung von Endwirbeln ist die Verwendung von sogenannten Endplatten. Die Endplatte soll die Umströmung an dem Flügelende verhindern. Oftmals bilden sich aber an der Endplatte selber Wirbel, so daß die Gesamtwirkung des Flügels wieder reduziert wird. Eine weitaus effektivere Methode zur Minimierung von Endwirbeln besteht darin, den Flügel so zu gestalten, daß sich entlang der Anströmkannte eine elliptische Auftriebsverteilung ergibt. Bei einem Flügel, der eine gleichbleibende Profiltiefe hat und der nicht verdreht ist, erhält man diese optimalen Bedingungen, wenn die Umrissform des Flügels elliptisch ist. Alle anderen Formen sind der elliptischen Form gegenüber schlechter. Flügel in Trapezform kommen den idealen Verhältnissen recht nahe. Die schlechteste Umrissform ist die eines Dreiecks.

## Das Seitenverhältnis

Das Seitenverhältnis beschreibt die Beziehung zwischen Länge der Anströmkannte und Sehnenlänge. (Bei einem Segel nimmt man die mittlere Sehnenlänge). Prinzipiell kann man davon ausgehen, daß Flügel mit großem Seitenverhältnis ein besseres Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand haben, als solche mit kleinem Seitenverhältnis. Dieser Zusammenhang wird leicht verständlich, wenn man bedenkt, daß die Abrißwirbel an den Enden des Flügels einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtwiderstandes ausmachen. Dieser Widerstand ist aber nicht von der Flügellänge abhängig, sondern bei einem langen oder kurzen Profil gleich. Demzufolge ist bei einem "langen" Profil das Verhältnis von effektiv wirkender Fläche und schlecht wirkender Enden günstiger als bei einem "kurzen" Profil.

## Die Bedeutung des L/D Verhältnisses



Wenn sich ein Verkehrsflugzeug in seiner Reiseflughöhe befindet, entspricht die an den Tragflächen wirkende Auftriebskraft, genau der Gewichtskraft des Flugzeugs. Der entstehende Widerstand muß durch den Schub der Triebwerke überwunden werden. Die dafür notwendige Leistung und somit auch die notwendige Treibstoffmenge, ist vom L/D Verhältnis des Flugzeugs abhängig. Sehr gute Verkehrsflugzeuge erreichen ein L/D Verhältnis von 1/20, die besten Segelflugzeuge erreichen Werte von 1/60, gute Segelyachten 1/3.

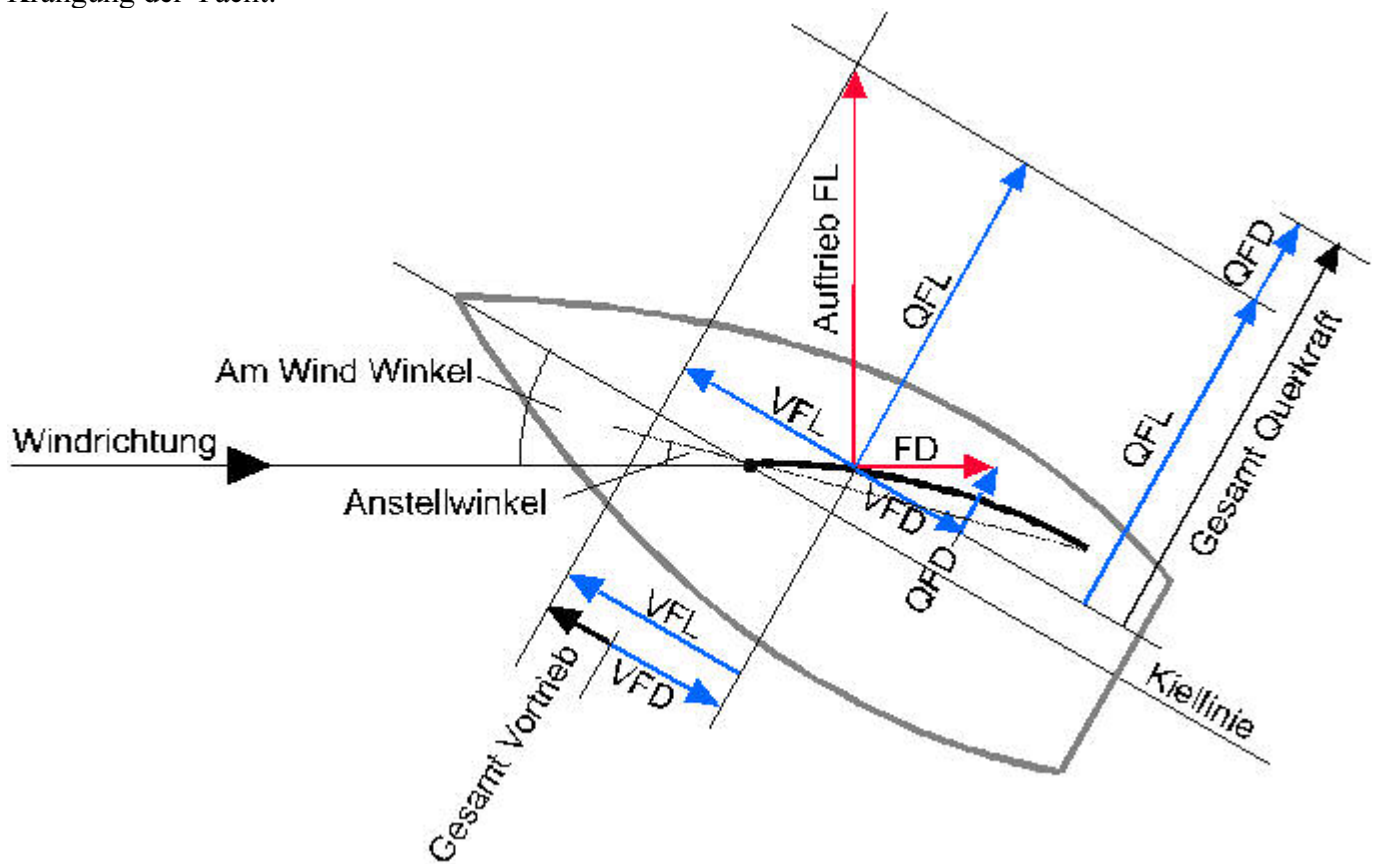
## Die Berechnung von Auftrieb und Widerstand

Für die Berechnung der an einem Flügel auftretenden Auftriebs- und Widerstandskräfte, benötigt man einen spezifischen Beiwert, der für jeden Flügel anders ist und sich nur durch Messen der Kräfte ermitteln läßt. Den Beiwert für den Auftrieb nennt man  $C_L$  und den für den Widerstand  $C_D$ . Die Beiwerte werden in der Regel für verschiedene Anstellwinkel ermittelt. Zur graphischen Darstellung dieser Werte verwendet man üblicherweise ein Polardiagramm. Dabei trägt man den  $C_D$  Wert auf der X-Achse und den  $C_L$  Wert auf der Y-Achse ein. Für jeden Anstellwinkel erhält man einen Punkt. Verbindet man diese Punkte, so erhält man die Polare für den entsprechenden Flügel.

Welche aerodynamischen Kräfte an einem Segelboot wirken ist in Abb. 8 dargestellt.

Das Boot segelt mit einem Winkel von  $30^\circ$  am scheinbaren Wind. Die Sehne des Segels bildet einen Anstellwinkel zur Windrichtung. Das Segel wird asymmetrisch umströmt. Dadurch entsteht an dem Segel eine Auftriebskraft, die rechtwinklig zur Windrichtung wirkt. Bei diesem Kurs kann die Auftriebskraft nicht in voller Größe für den Vortrieb des Bootes genutzt werden. Zerlegt man die Auftriebskraft  $F_L$  mittels eines Kräfteparallelogramms, so erhält man die Größe der Vortriebskraft  $VFL$  sowie der

Querkraft QFL. Bei dem im Beispiel gewählten Am Wind Winkel von  $30^\circ$ , ist die Vortriebskraft VFL genau halb so groß wie die Auftriebskraft FL. An jedem Körper, an dem ein Auftrieb entsteht (also auch an einem Segel), entsteht unvermeidlich auch ein Widerstand. Die Widerstandskraft FD wirkt genau in Richtung des Windes. Zerlegt man auch diese Kraft in eine Komponente, die in Längsrichtung und eine die quer zum Boot wirkt, so erhält man die Einzelkräfte QFD und VFD. Die Kraft VFD wirkt der Kraft VFL genau entgegen. Die wahre Vortriebskraft FV erhält man also, indem man VFD von VFL abzieht. Die wahre Querkraft FQ ergibt sich durch Addition der Kräfte QFL und QFD. Die Vortriebskraft bewegt das Boot in Fahrtrichtung. Die Querkraft wird vom Kiel aufgenommen und ist verantwortlich für die Krängung der Yacht.



Wir für Sie



Copyright © 1999 [Segelwerkstatt Stade](http://segelwerkstatt.stade.com) - Alle Rechte vorbehalten! - Email: [service@segelwerkstatt.com](mailto:service@segelwerkstatt.com).  
Ihre Anmerkungen zum Layout senden Sie bitte an: [webmaster@segelwerkstatt.com](mailto:webmaster@segelwerkstatt.com).