

## Segeltheorie

Die Segeltheorie befasst sich mit den Kräften, die durch Wind und Wasser auf ein Boot wirken, mit den daraus resultierenden Beschleunigungen und Bewegungen des Bootes und mit der Stabilität eines Bootes.

### 1 Grundsätzlicher Segeltrimm

Um durch Segel Vortrieb erzeugen zu können, müssen diese richtig zum Wind eingestellt werden - das Verändern der Segelstellung wird als „trimmen“ bezeichnet. Der Vortrieb wird durch die Umlenkung der Luftströmung erzeugt und ist abhängig davon wie der Wind auf das Segel trifft und hinter dem Segel weiterströmt. Ganz allgemein, und etwas vereinfacht ausgedrückt, sollte der an Bord spürbare Wind parallel auf das Vorliek treffen, ohne Erzeugung von Turbulenzen dem Segel entlang strömen und parallel zum Achterliek ab- und danach weiterströmen. Der an Bord spürbare Wind, auf den die Segel eingestellt werden, wird durch die Bootsbevewegung beeinflusst und ist aufgrund der Bodenreibung über die Masthöhe nicht konstant. Desweiteren ist eine effiziente Umlenkung zur Erzeugung von Vortrieb von der Profiltiefe (= „Bauchigkeit“) des Segels abhängig - und die optimale Profiltiefe von Windstärke und gefahrenem Kurs.

#### 1.1 Vektorielle Addition

Eine skalare Größe hat einen Betrag (Wert) ohne in eine bestimmte Richtung zu wirken. Skalare Größen sind zum Beispiel Druck, Masse, Energie oder Geld, deren Beträge, unter Beachtung der Vorzeichen, miteinander addiert werden, um die Summe zweier Größen zu erhalten.

Eine vektorielle Größe hat neben ihrem Betrag auch eine Richtung in die die Größe zeigt oder wirkt. Vektorielle Größen sind zum Beispiel Geschwindigkeit, Kraft, Drehmoment oder Beschleunigung. Es stellt sich die Frage in welche Richtung diese Größen wirken. Dargestellt werden diese als Vektoren (Pfeile), deren Länge ein Maß für ihren Betrag ist. Die Addition erfolgt durch das Hintereinandersetzen zweier Vektoren, die Spitze eines Pfeiles wird an den Schaft des anderen gesetzt. Der Summenvektor ergibt sich aus der Verbindung vom freien Schaft zur freien Spitze.

In Abbildung 1 ist eine vektorielle Addition dargestellt: Ein Matrose möchte einen Fluss überqueren (Fließgeschwindigkeit und -richtung dargestellt durch blauen Vektor). Der Matrose schwimmt quer zur Fließrichtung des Flusses (Schwimmgeschwindigkeit und -richtung dargestellt durch roten Vektor). Die vektorielle Addition dieser zwei Größen ergibt die Gesamtgeschwindigkeit und tatsächliche Bewegungsrichtung (über Grund) des Matrosen während der Überquerung.

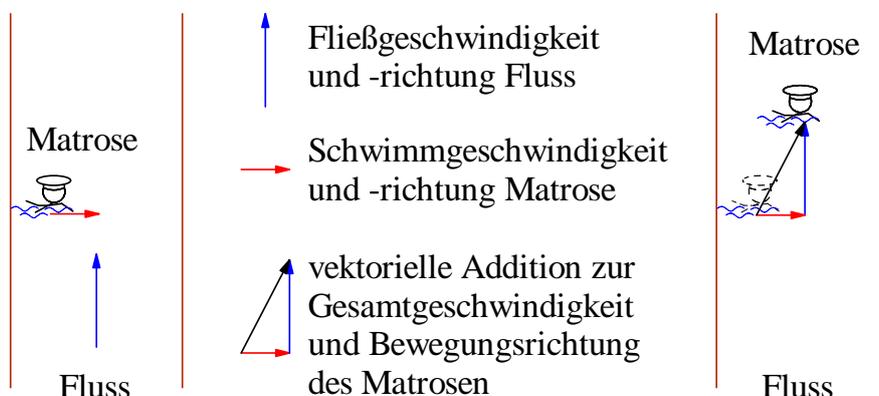


Abbildung 1: Vektorielle Addition am Beispiel eines schwimmenden Matrosen

## 1.2 Winddreieck

Der Wind, den man am Segelboot spürt bzw. auf den die Segel getrimmt werden, ist die vektorielle Addition des wahren Windes, wie er über Grund weht, und des Fahrtwindes, der stets mit der Größe der Bootsgeschwindigkeit entgegen kommt.

1. Ein Boot ohne Fahrt durchs Wasser soll beschleunigt werden. Die Segel werden so getrimmt, dass der Wind parallel zur vorderen Kante des Segels, dem Vorliek, einfällt. Der wahre Wind (grauer Vektor) entspricht ohne Fahrtwind dem gefühlten Wind am Boot - dem scheinbaren oder relativen Wind (schwarzer Vektor).

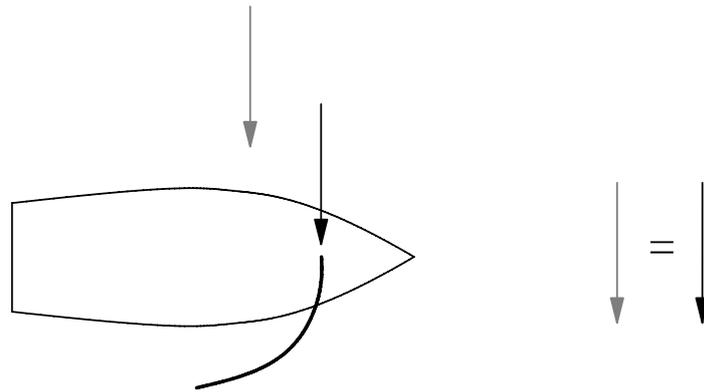


Abbildung 2: Beginn der Beschleunigung des Bootes

2. Sobald das Boot Fahrt aufnimmt entsteht Fahrtwind entsprechend der Bootsbewegung (roter Vektor), der den scheinbaren Wind verstärkt und vorlicher einfallen lässt. Der Segeltrimmer muss das Segel dichter holen, um das Vorliek auf den neuen Einfallswinkel einzustellen.

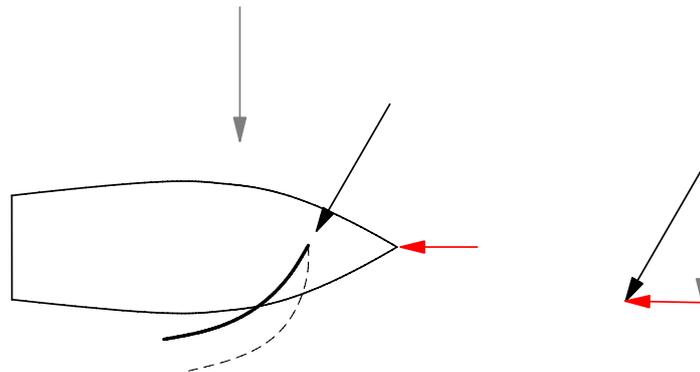


Abbildung 3: Langsame Fahrt des Bootes

3. Bis das Boot seine Endgeschwindigkeit erreicht hat, wird der scheinbare Wind an Bord durch den zunehmenden Fahrtwind stärker und dreht weiter nach vor - die Segel müssen mitgetrimmt werden.

Nimmt der Wind z.B. in einer Bö zu wird der scheinbare Wind zunächst stärker und fällt achterlicher ein. Auf Hart-am-Wind-Kurs kann der Rudergänger diese Veränderung ausnutzen, indem er anluvt und Weg nach Luv gewinnt. Auf allen anderen Kursen kann der Rudergänger ebenfalls mit dem (scheinbaren) Winddreher mitluven oder die Segeltrimmer fieren die Schoten.

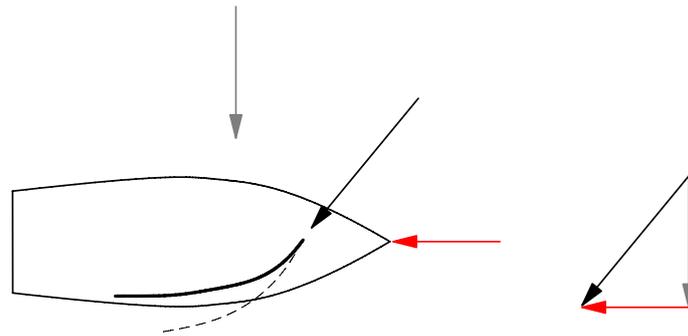


Abbildung 4: Endgeschwindigkeit erreicht

Verliert der wahre Wind nach dem Ende der Bö an Stärke, dreht der scheinbare Wind wieder nach vor und wird schwächer; auf Hart-am-Wind-Kurs muss der Rudergänger wieder abfallen, auf anderen Kursen nehmen die Segeltrimmer die Schoten wieder etwas dichter.

Ein Boot kann auf Am-Wind-Kursen schneller fahren als der wahre Wind, nicht aber als der scheinbare. Sportliche, schnelle Boote fahren aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit deswegen fast immer Am-Wind-Kurse.

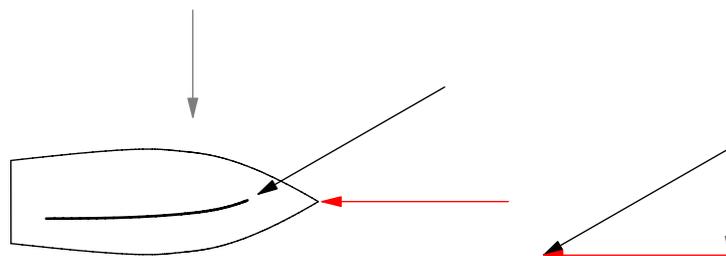


Abbildung 5: Schneller als der wahre Wind

### 1.3 Funktionsweise von Spionen

Trotz Verklicker oder Stander existieren für die Segeltrimmer im Segel angebrachte Trimmfäden, sogenannte Spione, mit Hilfe derer das Segel auf den scheinbaren Wind eingestellt werden kann. Im Vorsegel befinden sich die Spione in der Nähe des Vorlieks, im Großsegel am Achterliek. In den Abbildungen 6 und 7 sind die grünen Spione des Vorsegels an Steuerbord, also in Lee des Segels angebracht, und die roten in Luv - der Wind weht also gedanklich aus der Zeichenebene heraus. Die strichlierten Spione auf der Backbordseite sind für den Leser durch das Segel verdeckt. Der Feintrimm des Segels mit Hilfe der Spione ist nur möglich, wenn die Segel grundsätzlich zum gefahrenen Kurs passen. Ist die Segelstellung grob falsch kann man sich an den Spionen nicht orientieren.

Prinzipiell soll der Wind das Segel ohne Ablösung der Strömung an- und umströmen. Die leichten Trimmfäden folgen der Luftströmung praktisch ohne Verzögerung, an ihrem Verhalten kann die Umströmung am Segel erkannt werden.

**Großsegel** Die Trimmfäden im Großsegel befinden sich in der Regel am Achterliek, das Segel sollte so getrimmt werden, dass alle Spione parallel zum Achterliek nach hinten auswehen. Ist das Großsegel zu dicht getrimmt, klappen die Spione ins Lee des Großsegels. Ist das Großsegel zu weit gefiert, entsteht am Vorliek ein Gegenbauch aufgrund der Luftströmung, der von Lee gegen das Segel drückt.

**Vorsegel** Die Trimmfäden befinden sich in den Vorsegeln in der Regel knapp hinter dem Vorliek auf beiden Seiten des Segels. Ist das Segel über die ganze Höhe gut getrimmt, wehen alle Spione in horizontaler Position nach achtern aus. Ist das Vorsegel zu dicht getrimmt, legt sich der Wind an der Luvseite des Segels gut an und die Spione wehen ruhig nach achtern aus; an der Leeseite kann die Strömung dem Segel aber nicht folgen, löst ab und es entstehen Turbulenzen in denen die leeseitigen Spione chaotisch nach oben und unten zeigen. Ist das Vorsegel zu weit gefiert, passiert das Gegenteil: Die leeseitigen Spione liegen schön am Segel an, während die luvseitigen in den Turbulenzen herumwirbeln.

In den Abbildungen 6 und 7 ist das Verhalten der Spione bei zu dicht und zu offen getrimmten Segeln schematisch dargestellt.

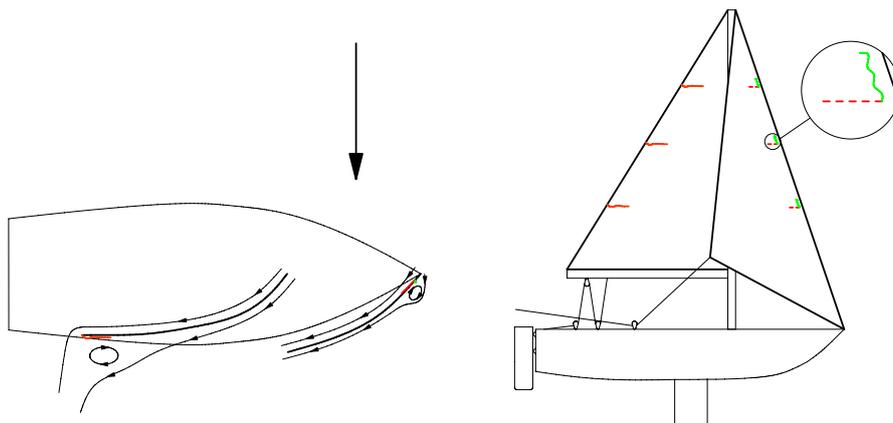


Abbildung 6: Verhalten der Spione bei zu dichten Segeln

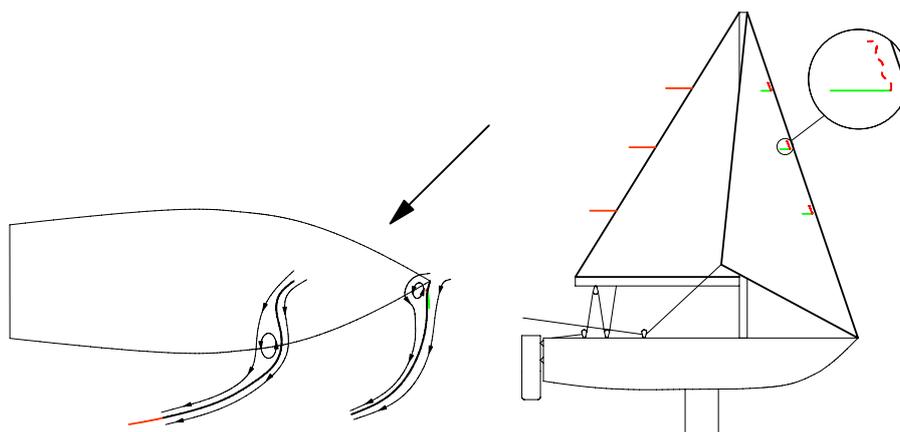


Abbildung 7: Verhalten der Spione bei zu offenen Segeln

Die Spione können als Indikator für den Trimm der Segel bzw. den richtigen Kurs nur genutzt werden, wenn der Grobtrimm der Segel bereits passt. Erst wenn die Einstellung der Segel ungefähr stimmt verhalten sich die Spione wie oben beschrieben. Unroutinierten Segeltrimmern kann folgende Faustregel für den Grobtrimm helfen: Der Großbaum des Segels sollte etwa mittig zwischen Schiffslängsachse und Windeinfallswinkel stehen.

## 1.4 Windscherung und Twist

Mit zunehmender Höhe nimmt der Einfluss der Bodenreibung ab und die Geschwindigkeit des (wahren) Windes nimmt nach oben zu (das vertikale Windprofil in Bodennähe kann sehr gut mit einer logarithmischen Funktion angenähert werden). Da der Fahrtwind aber über die gesamte Höhe des Mastes konstant ist, ergeben sich unterschiedliche scheinbare Winde über die Höhe - dieses Phänomen wird als Windscherung bezeichnet - und dementsprechend müssen die Segel unten dichter getrimmt werden als oben. Der über die Segelhöhe unterschiedlich eingestellte Einfallswinkel wird Twist genannt. Das Diagramm in Abbildung 8 stellt die Winkeldifferenz des scheinbar einfallenden Windes für ein Boot dar, das sich mit einer Geschwindigkeit von 5 kn über Grund bewegt. Der wahre Wind trifft genau im rechten Winkel ( $90^\circ$ ) auf die Schiffslängsachse, die unterschiedlichen Linien repräsentieren die Winkeldifferenz zwischen unterschiedlichen Höhen über der Wasseroberfläche.

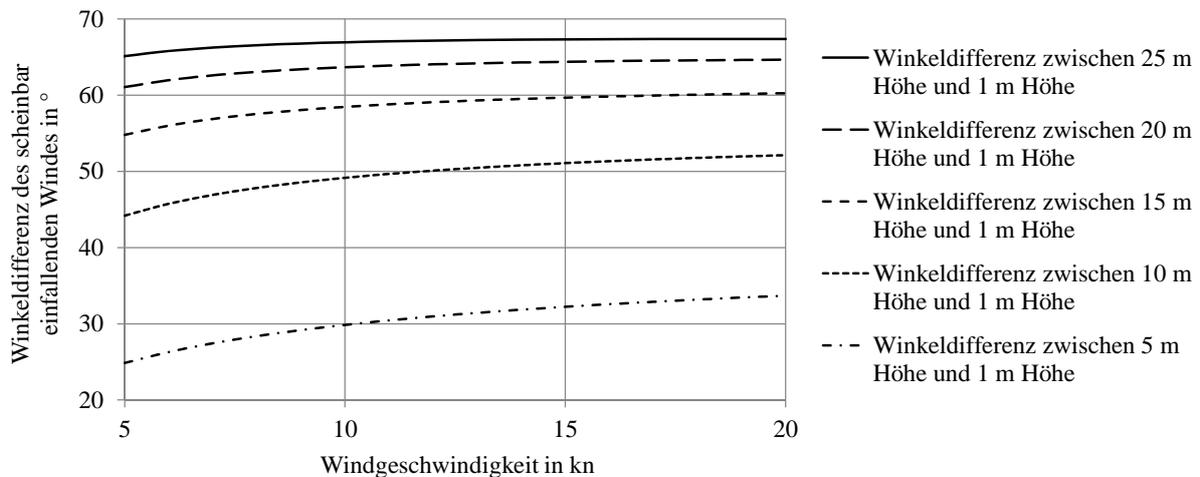


Abbildung 8: Differenz der Einfallswinkel des scheinbar einfallenden Windes auf die Schiffslängsachse abhängig von der Windgeschwindigkeit für fünf unterschiedliche Höhendifferenzen für ein Boot mit einer Geschwindigkeit über Grund von 5 kn und dem wahren Wind von querab

Aus den Verläufen der Graphen im Diagramm können drei Schlüsse gezogen werden:

1. Je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto größer ist ihr Gradient in der von der Reibung beeinflussten (Grenz-)Schicht. Die Segel müssen daher bei mehr Wind auch mit stärkerem Twist gefahren werden.
2. Bei sich änderndem Wind muss der Twist im unteren Bereich des Segels stärker angepasst werden, als im oberen Bereich.
3. Bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten ändert sich die Differenz des Einfallswinkels des scheinbaren Windes mit der Höhe gleichmäßiger als bei höheren Windgeschwindigkeiten.

Um den Twist zu verändern, kann beim Vorsegel der Umlenkpunkt der Schot (der Holepunkt) nach vor oder nach achtern versetzt werden. Beim Groß wird der Twist über das Zusammenspiel von Schot, Traveller und Baumniederholer reguliert.

**Vorsegel** Wehen die Spione des Vorsegels in der Mitte beidseitig schön parallel aus, aber die unteren und/oder oberen nicht, kann durch Verstellung des Holepunkts das Segel über die gesamte Höhe richtig getrimmt werden. Beim Trimm links in Abbildung 10 wehen der obere Leespion und der untere Luvspion nicht parallel aus, das Segel ist oben zu dicht und unten zu offen - der Holepunkt gehört

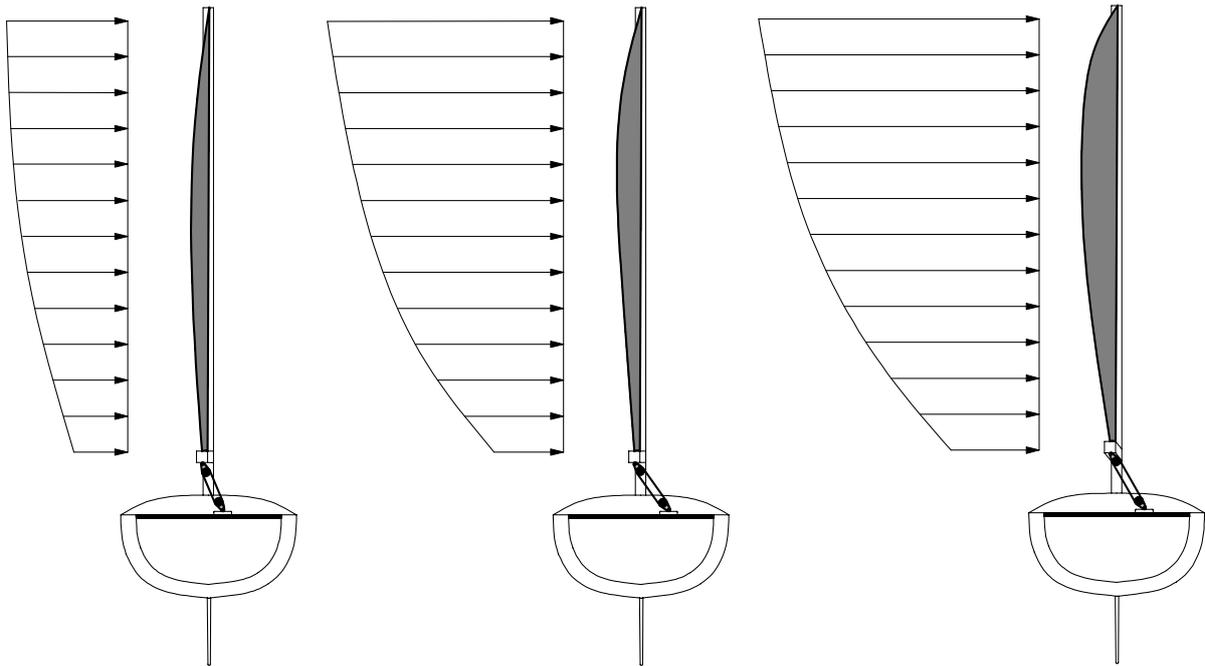


Abbildung 9: Vertikale Windprofile bei unterschiedlichen Windstärken und schematisch dargestellter Twist im Großsegel

weiter nach achtern. Beim Trimm rechts in Abbildung 10 wehen der obere Luvspion und der untere Leespion nicht parallel aus, das Segel ist oben zu offen und unten zu dicht, der Holepunkt gehört weiter nach vor.

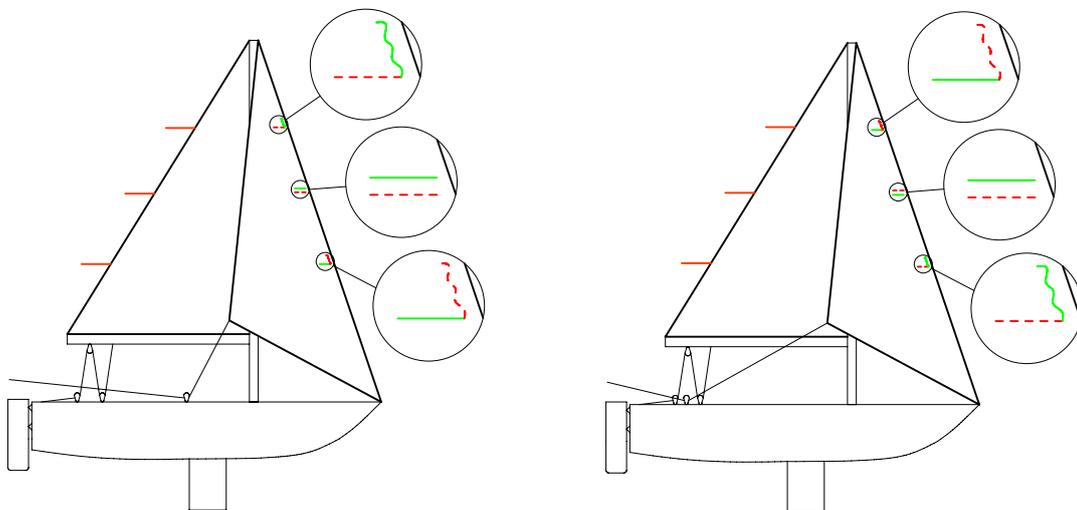


Abbildung 10: Zu wenig Twist im Vorsegel (links) und zu viel Twist im Vorsegel (rechts)

Außer dem Holepunkt haben manche Boote auch die Möglichkeit die Position der Schot zwischen dem Schothorn und dem Holepunkt quer zu Schiffslängsachse zu verändern. Diese Trimmeinrichtung wird als Inholer oder Barber Holer (wie bei den Spinnakerschoten) bezeichnet.

**Großsegel** Die Trimmöglichkeiten des Vorsegels sind, wie eben diskutiert, begrenzt und der Trimm des Vorsegels gibt den Trimm des Großsegels vor. Ist das Vorsegel schön getrimmt, wird das Groß so eingestellt, dass die Achterlieken beider Segel möglichst parallel zueinander verlaufen. Um dem Großsegel mehr Twist zu geben, wird die Schot gefiert und der Traveller nach Luv geholt. Um den Twist zu verringern, wird

die Schot dicht geholt und der Traveller nach Lee gerückt. Stehen die Segel halbwegs parallel, erfolgt der Feintrimm mit Hilfe der Spione. Der Segeltrimm ist ein iterativer Vorgang, bei dem die Segel zuerst grob und dann immer feiner eingestellt werden.

## 1.5 Profiltiefe und Faltenbildung

Für die Einstellung der Profiltiefe kann als Faustregel gelten: Je stärker der Wind und je höher der Kurs, desto flacher sollte das Segel getrimmt sein. Bei stärkeren Winden kann die Luftströmung einem gebogenen Segelprofil aufgrund der größeren Turbulenzen weniger gut folgen und droht abzulösen. Zudem erzeugt eine stärkere Umlenkung der Strömung durch eine große Profiltiefe (bauchigeres Segel) größere Kräfte. Bevor die Segel bei zunehmenden Wind gerefft bzw. gewechselt werden, ist es daher sinnvoll sie zunächst flacher zu trimmen, um die Kräfte auf Rigg und Boot zu reduzieren.

**Großsegel** Die Profiltiefe wird beim Großsegel vor allem mit Unterliekstrecker, Baumniederholer und Großschot eingestellt. Bei Booten mit Fraktionlrigg ist das Achterstag eine wesentliche Trimmeinrichtung zur Änderung der Profiltiefe - eine höhere Achterstagspannung biegt den Mast, und damit das Vorliek, nach vorne und macht das Großsegel flacher.

**Vorsegel** Die Profiltiefe eines Vorsegels kann sehr effektiv durch Dichterholen und Fieren des Achterstags (mit oder ohne Fraktionlrigg) verändert werden, wobei auch hier gilt: Höhere Achterstagspannung ergibt eine geringere Profiltiefe. Die Position des Holepunkts in Zusammenspiel mit der Vorschot haben nur bedingt Einfluss auf die Bauchigkeit. Sportliche Boote haben als ergänzende Trimmmöglichkeit manchmal einen sogenannten Inholer, der im Horn des Vorsegels eingeschoren ist und dessen Position quer zur Schiffslängsachse verändern kann.

Um turbulenter Strömung vorzubeugen bzw. zur Reduktion der Turbulenz der Strömung spielt nicht nur das richtige Segelprofil, sondern auch die Vermeidung von Faltenwurf im Segel eine Rolle. Durch unterschiedliche Leinen und Trimmeinrichtungen kann die Spannung des Segeltuchs abhängig von Kurs und Windstärke angepasst werden, um sowohl der vertikalen als auch der horizontalen Faltenbildung entgegenzuwirken. Dabei gilt: Je stärker der Wind und je höher der Kurs, desto größer ist die notwendige Lieken- und Streckerspannung.

- ✳ Vertikale Falten bilden sich durch große (relative) Vorliekspannung. Dieser kann entgegengewirkt werden durch Entlasten des Vorlieks (Fall oder Cunninghamholer fieren) oder Strecken des Unterlieks (Unterliekstrecker dichtholen).
- ✳ Horizontale Falten bilden sich durch große (relative) Unterliekspannung. Dieser kann entgegengewirkt werden durch Entlasten des Unterlieks (Unterliekstrecker fieren) oder Strecken des Vorlieks (Fall oder Cunninghamholer dichtholen).

## 2 Dynamische Kräfte durch Wind und Wasser

Die klassische Physik mit ihren Gleichungen und Modellvorstellungen basiert auf Axiomen, d.h. auf Annahmen, die aufgrund jahrtausendelanger Beobachtungen getroffen wurden und so lange gelten, bis das Gegenteil bewiesen wird. Zu den elementarsten Axiomen, auf denen die Naturwissenschaften aufgebaut sind, zählen die drei Newtonschen Gesetze.

Eine Kraft  $F$  wird mathematisch beschrieben als Masse  $m$  multipliziert mit einer Beschleunigung  $a$ .

$$F = ma \quad (1)$$

Eine Kraft kann also daran erkannt werden, dass eine Masse ihre Bewegung ändert, d.h. schneller oder langsamer wird oder ihre Bewegungsrichtung verändert. Diesen Umstand beschreibt auch Newtons erstes Gesetz:

*„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“*

Newtons zweites Gesetz besagt, dass, wenn eine Kraft auf einen Körper wirkt, der Körper in Richtung dieser Kraft seine Bewegung ändert:

*„Die Änderung der Bewegung der Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.“*

Newtons drittes Gesetz besagt, dass zu jeder wirkenden Kraft eine gleich große Gegenkraft in die genau entgegengesetzte Richtung wirken muss.

*„Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).“*

## 2.1 Schwerpunkt

Die meisten Kräfte greifen nicht nur in einem Punkt eines Körpers an, sondern wirken über einen großen Teil der Oberfläche (z.B. Segel im Wind) oder dessen Volumen (z.B. Gewichtskraft durch Erdanziehung). Der Anschaulichkeit und der leichteren Handhabung wegen, werden Flächen- und Volumenkräfte, die an einer Masse angreifen, aufsummiert und in einem Punkt angesetzt, dem Schwerpunkt, in dem der Summenvektor die gleiche Wirkung zeigt, wie die Summe der einzelnen Vektoren (die Statik und Dynamik eines Körpers betreffend, nicht dessen Festigkeit).

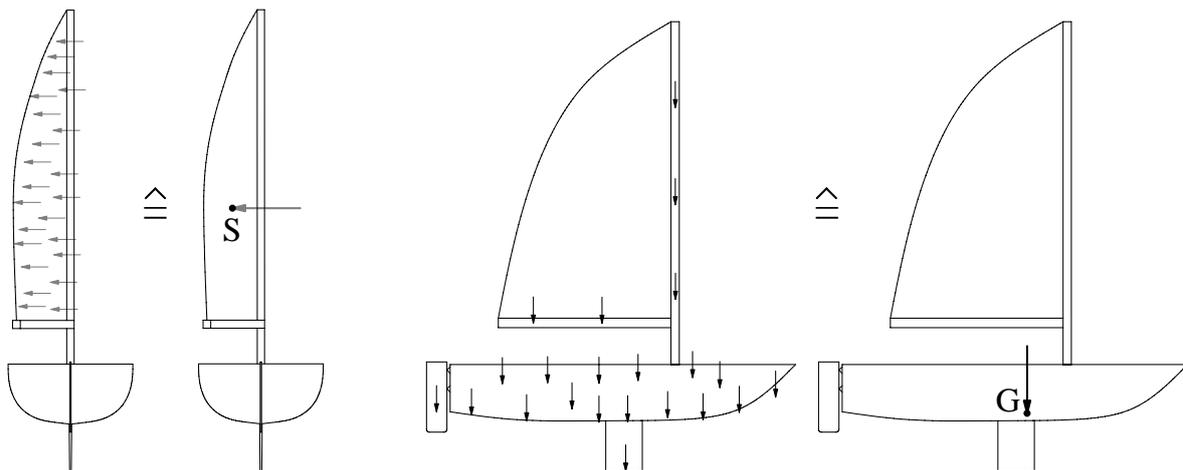


Abbildung 11: Zusammenfassen der Flächenkräfte im Segel im Segeldruckpunkt (links) und Zusammenfassen der Volumenkräfte der Bootsmasse im Gewichtsschwerpunkt (rechts)

Der Punkt, in dem der Summenvektor der Massenkräfte angreift, wird trivialerweise Massen- oder Gewichtsschwerpunkt (G) genannt. Der für die Segeltheorie wichtige Schwerpunkt der angreifenden Windkräfte im Segel wird Segeldruckpunkt (S) genannt.

## 2.2 Kräftegleichgewicht

Scheinbar kann Newtons erstes Gesetz sofort mit Hilfe der auf der Erde allgegenwärtigen Schwerkraft widerlegt werden: Jeder Körper erfährt mit der Erdbeschleunigung eine Gewichtskraft die stets in Richtung Erdmittelpunkt wirkt, die gesamte Erdenmasse inkl. Bewohner ist aber noch nicht in einem singulären Punkt zusammengequetscht. Grund dafür ist die innere Stabilität bzw. Festigkeit der Erdkugel.

In Abbildung 12 ist links ein Matrose abgebildet, seine Gewichtskraft wirkt nach unten, vom Boden wirkt aber eine (Reaktions-)Kraft auf die Fußsohlen des Matrosen. Addiert man diese Kräfte vektoriell, resultiert ein Nullvektor, in Summe wirkt also keine Kraft (bzw. heben sich alle Kräfte gegenseitig auf).

In Abbildung 12 ist rechts ein Segelboot abgebildet, das mit konstanter Geschwindigkeit segelt. Der Wellen- und Wasserwiderstand sind also genauso groß wie die Vortriebskraft erzeugt durch die Ablenkung des Windes am Segel, die Auftriebskraft durch das verdrängte Wasser genauso groß wie die Gewichtskraft der Jacht. Der Bewegungszustand des Bootes verändert sich nicht.

In vielen Fällen bedeutet eine konstante Bewegung oder eine sich in Ruhe befindliche Masse nicht die Abwesenheit jeglicher Kraft, sondern die Auslöschung mehrerer angreifender Kräfte im Kräftegleichgewicht.

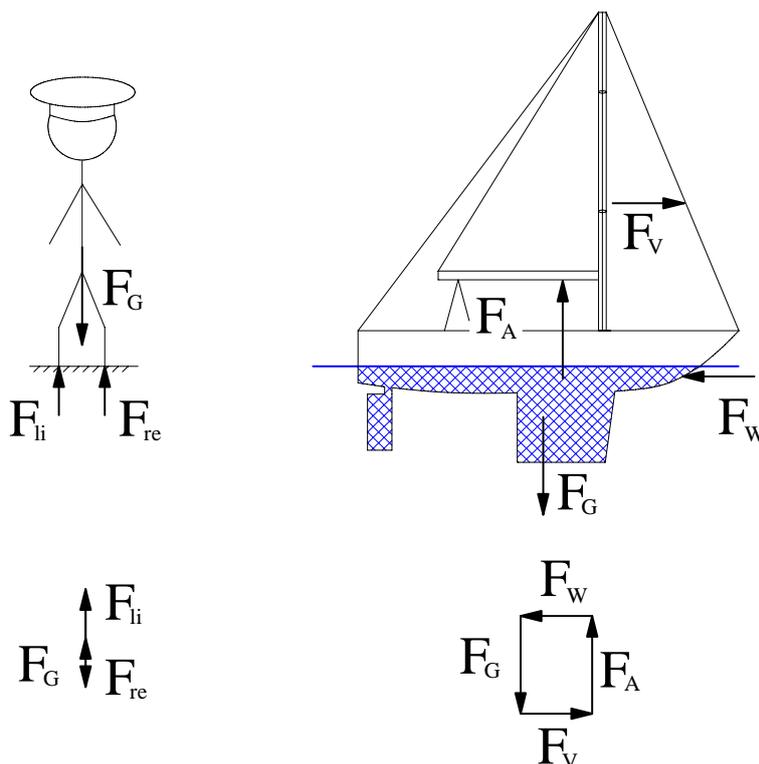


Abbildung 12: Kräfte und Reaktionskräfte im Gleichgewicht

## 2.3 Newton vs. Bernoulli

Wie in Abbildung 12 rechts angedeutet, bewegt sich ein Segelboot mithilfe einer sogenannten Vortriebskraft, erzeugt durch die Umströmung der Segel, fort. Die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Segel und der vorbeiströmenden Luft und der dadurch entstehenden Vortriebskraft erfolgt in der Regel mithilfe zweier

physikalischer Gesetzmäßigkeiten: Den Newtonschen Axiomen und dem Prinzip von Bernoulli. Es sei gleich hier vorweg genommen, dass beide Ansätze zum selben Resultat führen und zumindest im Endergebnis gleichwertig sind. In der Segelliteratur (und auch Luftfahrtliteratur) wird vor allem das Prinzip von Bernoulli häufig zur Beschreibung des Vortriebs herangezogen, in vielen Fällen sind jedoch die verwendeten Skizzen und die dazugehörigen Erklärungsversuche nicht nur fehlerhaft, sondern einfach falsch. Aus diesem Grund widmet sich dieser Lernbehelf diesem Thema ein wenig ausführlicher.

### 2.3.1 Vortrieb mit Newton

Das zweite Newtonsche Gesetz besagt, dass eine Kraft die Beschleunigung eines Körpers hervorruft und zwar proportional zu dessen Masse (siehe in Gleichung 1). Die Modellierung und Betrachtung eines Fluidstroms - z.B. Wind, der von einem Segel umgelenkt wird - als abgeschlossener Körper ist aber kompliziert. Anstatt also eine klar definierte Luftmasse auf ihrem Weg zu verfolgen, wählt man ein für das Problem geeignetes, festes Kontrollvolumen in das das Fluid ein- und aus dem es am Ende wieder auströmt. Die Wahl der Systemgrenzen dieses Kontrollvolumens ist natürlich ein maßgeblicher Faktor für die Durchführbarkeit der Berechnung, ein einfaches Beispiel so eines Kontrollvolumens wäre das Kniestück eines Rohres.

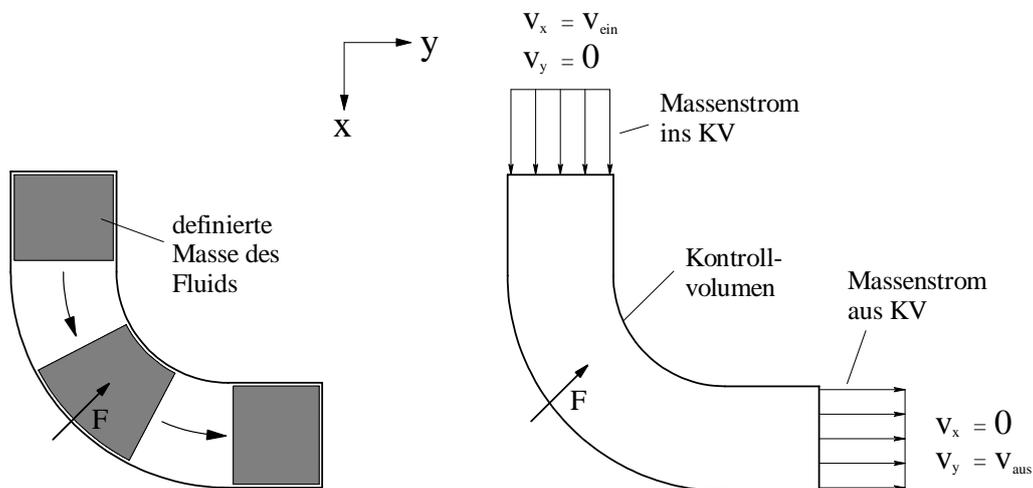


Abbildung 13: Berechnung der wirkenden Kraft auf ein Fluid durch Verfolgung einer definierten Masse (links) und durch Einführung eines Kontrollvolumens (rechts)

Die Berechnung der wirkenden Kraft der Rohrwand auf die das Rohr durchströmende Masse, wie links in der Abbildung 13 dargestellt, ist relativ aufwendig.

Rechts in der Abbildung 13 ist das Kontrollvolumen deckungsgleich mit dem des Kniestücks gewählt. Die auf das Fluid wirkende Kraft ergibt sich hierfür für die beiden Richtungen  $x$  und  $y$  des Koordinatensystems zu:

$$x\text{-Richtung: } F_x = \dot{m}(v_{x \text{ aus}} - v_{x \text{ ein}}) = (0 - v_{\text{ein}}) \quad (2)$$

$$y\text{-Richtung: } F_y = \dot{m}(v_{y \text{ aus}} - v_{y \text{ ein}}) = (v_{\text{aus}} - 0) \quad (3)$$

Durch die geeignete Wahl eines Kontrollvolumens um das Segel kann mithilfe der obenstehenden Gleichungen die Kraft zur Umlenkung des Windes am Segel einfach und relativ gut abgeschätzt werden und zwar ohne die Luftströmung während ihres gesamten Weges um das Segel zu beobachten, sondern nur durch Betrachtung der Geschwindigkeitsverhältnisse vor und hinter dem Segel.

Das dritte Newtonsche Gesetz besagt, dass es zu jeder wirkenden Kraft eine gleich große aber entgegengerichtete Gegenkraft geben muss. Diese Gegenkraft wird vom umgelenkten Fluid auf das Kniestück

ausgeübt (gut zu beobachten an den Bewegungen eines Schlauchs der bei laufendem Wasser ohne fest gehalten zu werden am Boden liegt) bzw. von der Luft auf das Segel.

Die Luftströmung um das Segel folgt dessen Form, die Teilchenbahnen, die die einzelnen Moleküle dabei beschreiben, werden auch Stromlinien genannt. Aus dem sich ergebenden Bild der Stromlinien kann auf einige Eigenschaften der Druckverteilung geschlossen werden.

### 2.3.2 Lesen des Stromlinienbildes mit Newton

Betrachten wir drei Luftmoleküle, die sich entlang gekrümmter Stromlinien (entspricht deren Flugbahnen) bewegen. Da deren Bewegung nicht geradlinig verläuft, muss eine Kraft gewirkt haben - in der Abbildung 14 von oben nach unten. Bei druckgetriebenen Strömungen, wie es der Wind zumeist ist, wird diese Kraft von unterschiedlich hohen Drücken erzeugt. Der Druck an der Außenseite  $p_a$  in der Abbildung ist also höher, als der Druck an der Innenseite  $p_i$  in der Abbildung.

Desweiteren ist auch leicht einzusehen, dass eine höhere Druckdifferenz eine größere Richtungsänderung der Teilchen bewirkt. Je kleiner der Kurvenradius der Teilchenbahnen ist bzw. je höher die Teilchengeschwindigkeit bei gleichem Kurvenradius ist, desto größer ist der treibende Druckunterschied.

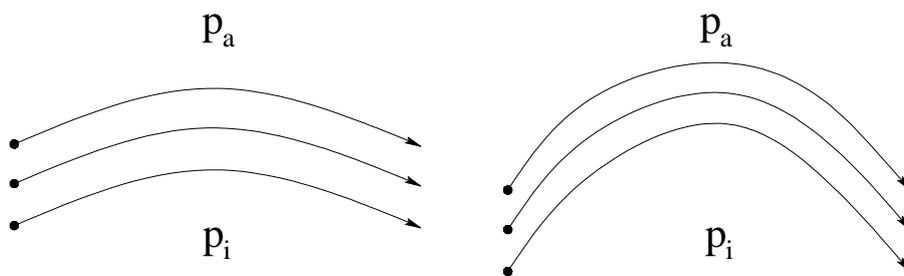


Abbildung 14: Der Druck  $p_a$  an den Außenbahnen muss höher sein, als der Druck an den Innenbahnen  $p_i$  und je enger die Kurve, desto größer diese Druckdifferenz: In der linken Abbildung ist der Druckunterschied zwischen den Außenbahnen und den Innenbahnen geringer, als in der rechten Abbildung

Ganz allgemein können also nur durch Betrachtung der Teilchenbahnen zwei Aussagen getroffen werden, um die Druckverhältnisse qualitativ zu beschreiben:

1. Der Druck auf den Außenbahnen ist höher als auf den Innenbahnen.
2. Je höher die Geschwindigkeit der Luft und je kleiner der Krümmungsradius (also je „enger die Kurve“), desto größer ist die Druckdifferenz zwischen der Strömung auf den Außenbahnen und der Strömung auf den Innenbahnen.

Dieser Zusammenhang kann auch mathematisch durch die kontinuumsmechanische Betrachtung eines „Luftwürfels“ hergeleitet werden, wie im Anhang A kurz dargestellt.

### 2.3.3 Vortrieb mit Bernoulli

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energie nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur transportiert und in andere Formen umgewandelt werden kann. Wie die Newtonschen Gesetze besitzt auch der Energieerhaltungssatz axiomatischen Charakter. Der gesamte Energieinhalt horizontaler Strömungen kann auf zwei Energiearten aufgeteilt werden.

### 1. Kinetische Energie $E_{kin}$

Dies ist die Energie, die in einem Fluid mit der Masse  $m$  steckt, das sich in Relation zu einem Körper oder zu einem Bezugssystem mit der Relativgeschwindigkeit  $v$  bewegt. Ihre Formel lautet:

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad (4)$$

Die kinetische Energie des Windes bezogen auf die Wasseroberfläche ist also eine andere, als diejenige, bezogen auf ein Segelboot mit Fahrt durchs Wasser.

### 2. Druckenergie $E_p$

Dies ist die Energie, die im Fluid aufgrund dessen statischen Drucks  $p$  steckt. Je größer der Druck und das Volumen  $V$  der betrachteten Masse, desto größer die Druckenergie.

$$E_{Vol} = pV \quad (5)$$

Unter Vernachlässigung von Reibungsverlusten - und der Energieübertragung auf ein damit angetriebenes Segelboot -, wandeln sich die zwei Arten der Energie bei veränderlicher Strömung ineinander um.

$$E_{kin} + E_p = const. \quad (6)$$

Wird Gleichung 6 durch das Volumen dividiert ergibt sich der allgemein bekannte Satz von Bernoulli:

$$\underbrace{\frac{\rho v^2}{2}}_{\text{dynamischer Druck}} + \underbrace{p}_{\text{statischer Druck}} = const. \quad (7)$$

Eine Kraft ergibt sich bei der Multiplikation einer Fläche mit dem auf ihr lastenden Druck. Herrschen an der Luv- und an der Leeseite eines Segels, die gleich groß sind, unterschiedlich hohe Drücke, so ergeben sich unterschiedlich große Kräfte. Die Differenz bzw. die vektorielle Summe dieser Kräfte ist die Kraft im Segel.

$$F = (p_{Luv} - p_{Lee})A_{Segel} \quad (8)$$

Durch die Form des Segels wird die Luftmasse also so umgelenkt, dass sich auf beiden Seiten des Segels unterschiedlich hohe Drücke ergeben. Hilfsmittel soll wieder das sich einstellende Stromlinienbild sein, das nun mithilfe des Prinzips von Bernoulli qualitativ analysiert werden soll.

#### 2.3.4 Lesen des Stromlinienbildes mit Bernoulli

Weht der Wind von See her auf die Küste und trifft dort auf große Hotelkomplexe am Strand, so wird die Luft zwischen den Wänden der Hotels hindurchströmen - damit aber nun die gesamte Luftmasse durch den schmalen Spalt passt, muss die Strömungsgeschwindigkeit erhöht werden. Da von außen keine Energie zugeführt wird, muss für die Beschleunigung Druckenergie in kinetische umgewandelt werden. Zwischen den Hotels herrscht also eine höhere Strömungsgeschwindigkeit, aber ein entsprechend niedrigerer Druck vor.

Diese Energieumwandlung erfolgt genau umgekehrt bei dem Teil der Luft, der frontal auf die Mitte eines Hotelkomplexes zuströmt. Die Luftpartikel werden verzögert, wenn diese auf die Häuserfront treffen ohne jedoch Energie nach außen abzugeben. Ein Teil der kinetischen Energie wird in Druckenergie umgewandelt und der Druck an der Hotelfront steigt.

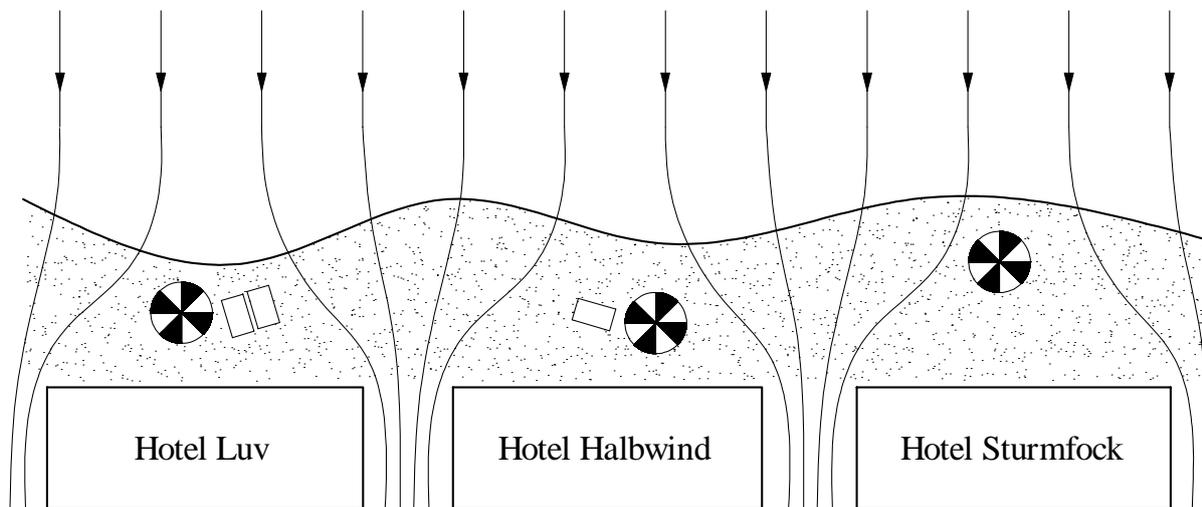


Abbildung 15: Qualitativer Stromlinienverlauf an der Häuserfront: Liegen die Stromlinien eng beieinander deutet dies auf hohe Strömungsgeschwindigkeiten und niedrige Drücke hin (und umgekehrt), die konvergierenden Stromlinien lassen auf eine Geschwindigkeitszunahme, die divergierenden auf eine Druckzunahme schließen

Die Änderungen des Luftdrucks sind gering und für einen Menschen ohne Hilfsmittel nicht wahrnehmbar. Die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten sind jedoch spürbar und die eben beschriebene Situation entspricht auch der Erfahrung.

Prinzipiell gilt:

*„Eine Änderung des Drucks bewirkt eine indirekt proportionale Änderung der Geschwindigkeit.“*

Oder etwas anschaulicher:

*„Steigt (sinkt) der Druck, wird ein strömendes Fluid verzögert (beschleunigt).“*

Dichteänderungen werden ab Strömungsgeschwindigkeiten relevant, die etwa ein Drittel der Schallgeschwindigkeit erreichen. Bei atmosphärischen Bedingungen entspräche das in etwa 100 m/s (= 360 km/h oder 215 kn), Windgeschwindigkeiten, bei denen an Segeln nicht mehr gedacht werden kann, sofern diese überhaupt erreicht werden. Die Dichte im Term des dynamischen Drucks kann also getrost als konstant angenommen werden.

Bei den soeben angestellten Überlegungen wurden sowohl die Reibung zwischen Luftteilchen, als auch zwischen der Luft und den Häusern vernachlässigt (die jedoch für die Möglichkeit ein Boot mithilfe des Windes anzutreiben von elementarer Bedeutung ist). Ebenso wenig wurde die Energieübertragung auf mit Wind angetriebene Segelboote betrachtet. Beide Phänomene führen zur Abnahme der Summe der Energien in Gl.6, wobei durch die Reibung ein Teil der Energie als nicht wieder zurückwandelbare Wärme in der Strömung verbleibt (siehe Anhang B) und durch das Antreiben eines Segelbootes ein Teil der Energie auf das Segelboot übertragen wird. Trotz Vernachlässigung dieser zwei Effekte bleibt die grundsätzliche Aussage vom Satz von Bernoulli dieselbe.

### 2.3.5 Newton & Bernoulli

Nun soll ein Segelboot auf Halbwindkurs betrachtet werden. Der (scheinbare) Wind trifft mit der Geschwindigkeit  $v_W$  normal auf die Schiffslängsachse ( $v_W = v_{\perp}$ ) auf das Segel, fließt am Segel entlang und strömt dann in Richtung des Achterlieks ab.

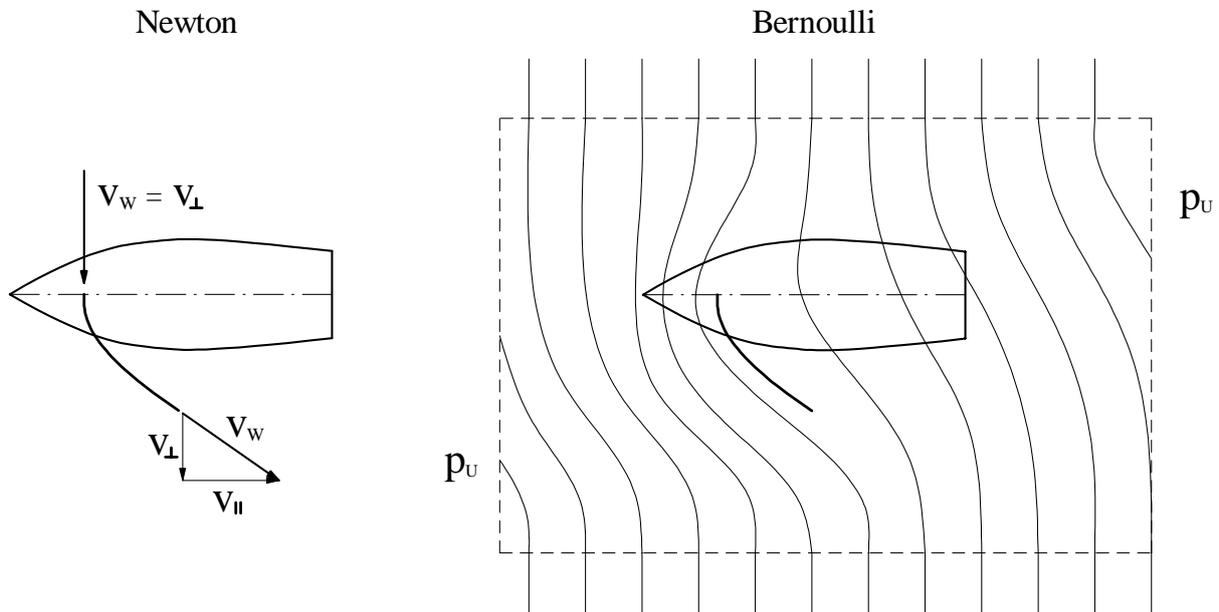


Abbildung 16: Erklärung des Vortriebs am Segel mit Newton (links) und Bernoulli (rechts)

**Newton** Vergleicht man die Geschwindigkeitsvektoren ( $v_W$ ) des Windes am Vorliek und am Achterliek, erkennt man, dass die Luft ihren Bewegungszustand geändert hat: Die Geschwindigkeitskomponente normal auf die Schiffslängsachse  $v_{\perp}$  wurde verringert, die Geschwindigkeitskomponente in Schiffslängsachsenrichtung  $v_{\parallel}$  wurde erhöht. Die Kraft, die gewirkt und die Luft nach achtern abgelenkt bzw. quer zur Kielrichtung gebremst hat, muss eine Gegenkraft hervorgerufen haben, die das Segelboot nach vorne drückt und nach Lee versetzt. Wie ein Schwimmer am Wasser stößt sich das Boot also an der Luft nach vor und wird dabei zwangsläufig nach Lee versetzt (Abdrift). Wird viel Luft (abhängig von Größe des Segels und Geschwindigkeit der Luft) stark (abhängig von Segelkrümmung) abgelenkt, wirkt eine ebenso große Gegenkraft auf das Boot und beschleunigt es.

**Bernoulli** Das Stromlinienbild und das Segelboot rechts in Abbildung 16 soll mithilfe der erarbeiteten Erkenntnisse dieses Kapitels analysiert werden. Außerhalb des Strömungsgebietes, das vom Segelboot beeinflusst wird, herrscht der einheitliche Umgebungsdruck  $p_U$  (aus Platzgründen ist das betrachtete Gebiet in der Abbildung ein wenig zu klein ausgefallen, die Grenzen müssten noch weiter nach außen verschoben werden).

1. Ausgehend vom Umgebungsdruck an der Luvseite, krümmen sich die Stromlinien weg d.h. der Druck muss nach links hin bis zum Segel zunehmen. Ausgehend vom Umgebungsdruck an der Leeseite krümmen sich die Stromlinien zu diesem hin, d.h. der Druck muss nach rechts hin bis zum Segel abnehmen. Der Druck auf der Leeseite muss also geringer sein als der Umgebungsdruck, der Druck auf der Luvseite höher (und damit  $p_{Luv} > p_{Lee}$ ).
2. In Luv liegen die Stromlinien weiter auseinander, das deutet auf höhere Drücke (und niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten) hin. In Lee liegen die Stromlinien enger beieinander, das deutet auf niedrigeren Drücken (und höheren Strömungsgeschwindigkeiten) hin.

rigere Drücke (und höhere Strömungsgeschwindigkeiten) hin. Der Druck auf der Leeseite muss also geringer sein als der Druck auf der Luvseite.

Wie im Stromlinienbild angedeutet, ändert ein Teil der Strömung kurz bevor sie auf das Vorliek des Segels trifft ihre Strömungsrichtung, um doch noch in Lee des Segels vorbeizuströmen - dieses Phänomen wird als Upwash bezeichnet und rührt daher, dass der geringere Druck an der Leeseite des Segels einen größeren Teil des Luftmassenstroms hinter das Segel „saugt“. Die Entstehung des Upwash' wird bei der Betrachtung der Auftriebskräfte am Segel bzw. an einer ebenen Platte diskutiert.

## 2.4 Viskosität und Reibung

Die aufzuwendende Arbeit zur Überwindung von Reibung rührt von der sogenannten Viskosität oder Zähigkeit der Fluide. In einem ungestörten Strömungsfeld spielt diese keine Rolle, da die Luftmoleküle sich relativ zueinander nicht bewegen. Trifft die Strömung aber auf einen Körper oder eine Oberfläche, werden die dem Körper berührenden Luftmoleküle durch Kontakt mit der relativ zu ihnen ruhenden Oberfläche abgebremst. Diese Bewegungsänderung führt zu einer viskositätsbedingten Verzögerung der benachbarten Moleküle - es entsteht eine Grenzschicht in der die Fluidgeschwindigkeit von der Maximalgeschwindigkeit der ungestörten äußeren Strömung bis hin zur Geschwindigkeit des umströmten Körpers ( $\hat{=}$  Relativgeschwindigkeit = 0 (Haftbedingung)) abnimmt. Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Molekülen in der Grenzschicht erzeugt die reibungsbedingten Druckverluste.

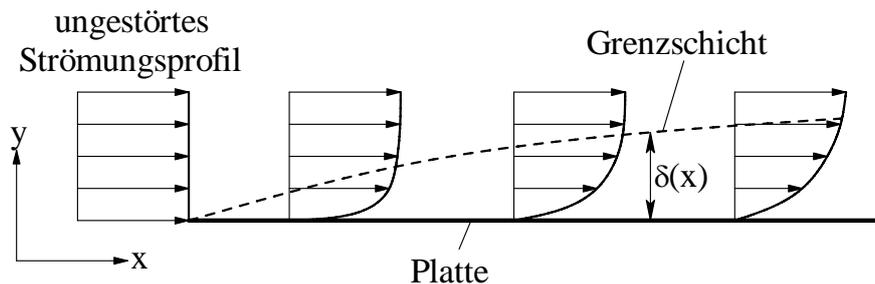


Abbildung 17: Geschwindigkeitsprofil und Grenzschicht entlang einer Oberfläche

Die Druckverluste in der Grenzschicht erlauben der Strömung nicht die gesamte kinetische Energie hinter dem umströmten Körper wieder in Druckenergie - also statischen Druck - zu verwandeln. Ohne Reibungsverluste würde sich hinter dem Körper der ursprüngliche Druck einstellen und ein Vortrieb mit Wind wäre nicht möglich.

## 2.5 Widerstands- und Auftriebskräfte

Wie bei der vektoriellen Addition zweier Größen ein resultierender Vektor ermittelt wird, der die Wirkung der einzelnen Vektoren in einer Größe zusammenfasst, kann ein Vektor aus analytischen Zwecken ebenso in mehrere vektorielle Komponenten zerlegt werden.

Jeder umströmte Körper verändert die Bewegung des umströmenden Fluids, es wirken also Kräfte auf Fluid und umströmten Körper. Ganz allgemein werden die Anteile der Kräfte, die in Strömungsrichtung wirken als Widerstandskräfte, und die Anteile der Kräfte, die quer zur Strömungsrichtung wirken, als Auftriebskräfte bezeichnet. Je nachdem wie ein Segel auf die Strömungsrichtung des Windes ausgerichtet wird, überwiegen entweder die Widerstands- oder die Auftriebskräfte.

### 2.5.1 Widerstandskräfte überwiegen (tiefe Kurse)

Die ursprünglichste und naheliegendste Möglichkeit mit Hilfe eines strömenden Fluids Vortrieb zu erzeugen funktioniert über die Ausnutzung der Widerstandskräfte. Im einfachsten Fall wird eine ebene Platte - oder ein Segel - normal zur Windrichtung in die Strömung eingebracht. Wie an den Hotels in Abbildung 58 werden die Luftmoleküle abgebremst, kinetische Energie wird in Druckenergie umgewandelt und im Luv des Segels steigt der Druck. Entlang dieses „Lufthaufens“, der auf die Platte drückt, strömen aber Teilchen relativ zueinander, die aufgrund der Viskosität Druckverluste erzeugen. Fließen diese Luftmoleküle um die Plattenkante von Luv nach Lee, fehlt diesen aber dieser Teil der Energie, um im gleichen Zustand, wie vor der Platte, weiterzuströmen - sie können den notwendigen Druck nicht aufbauen. Ein Teil des strömenden Fluids dreht entsprechend dem herrschenden Druckgradienten um und bildet in Lee der Platte ungeordnete Wirbel, in denen die kinetische Energie bzw. die Druckenergie weiter von der Reibung aufgezehrt werden. Die entstehenden Wirbel werden von der nachfolgenden Strömung verdrängt und von dieser weiter nach Lee geschoben - sie lösen sich ab.

Es bildet sich ein Gebiet niedrigen Drucks in Lee der Platte, das Totwassergebiet. Der hohe Druck in Luv der Platte und der niedrige in Lee erzeugen eine Kraft, die diese in Windrichtung bewegt. Nach diesem Prinzip wird der Kurs „platt vor dem Wind“ gesegelt. Bei vollkommen symmetrischen Verhältnissen, heben sich die an beiden Seiten der Platte erzeugten Auftriebskräfte auf - der Vortrieb wird nur von den Widerstandskräften erzeugt.

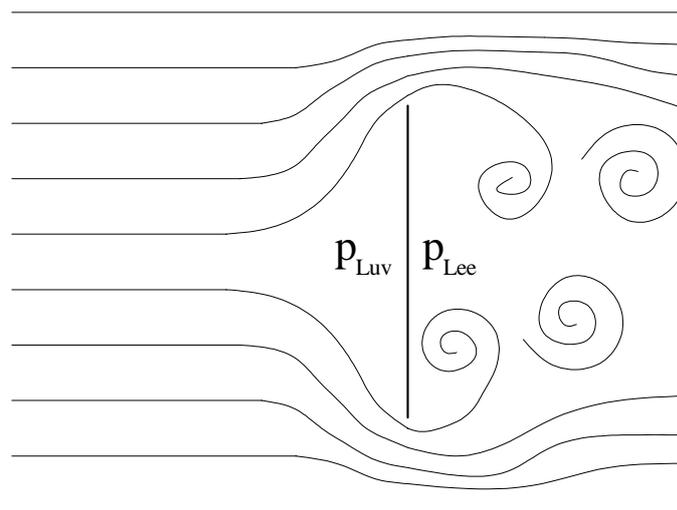


Abbildung 18: Vortrieb durch Druckwiderstand

### 2.5.2 Auftriebskräfte überwiegen (hohe Kurse)

Wird eine Platte schräg in das Strömungsfeld eingebracht, wird, abhängig von deren Anstellung, Auftrieb erzeugt. Die reibungsbedingte parallele Abströmung der Luft an der Hinterkante (Kutta-Joukowskische Abflussbedingung) erzwingt eine Bewegungsänderung des Windes quer zur ursprünglichen Anströmungsrichtung - die auf die Platte wirkende Gegenkraft ist die Auftriebskraft (Newton). Die (relativ) kleinen Widerstandskräfte bei dieser Art der Umströmung sollen bei den folgenden Überlegungen vernachlässigt werden. Um auf die für den Auftrieb wichtige Reibung nochmals hinzuweisen, soll zunächst angenommen werden, dass die Viskosität des umströmenden Fluids null sei - dass also Reibungsfreiheit herrsche. Verfolgt man ein Teilchen entlang der Bahn ① (= Stromlinie) so stellt die Platte ein Hindernis gegen die Strömungsrichtung dar. Es wird verzögert, der Druck in diesem Gebiet steigt und das Teilchen weicht entsprechend dem höheren Druck nach Luv aus.

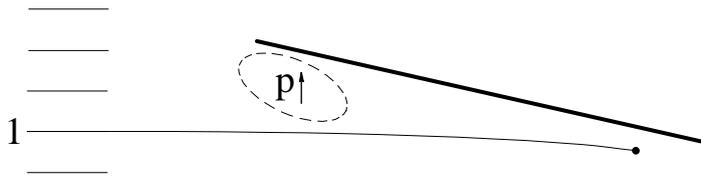


Abbildung 19: Stromlinie entlang der Luvseite

Gleichzeitig soll nun die Stromlinie ② eines Teilchens weiter oben betrachtet werden. Es trifft ebenfalls auf das Gebiet höheren Druckes, weicht aber entsprechend dem Druckgradienten einfacher nach oben hin aus und umströmt die Leeseite der Platte.

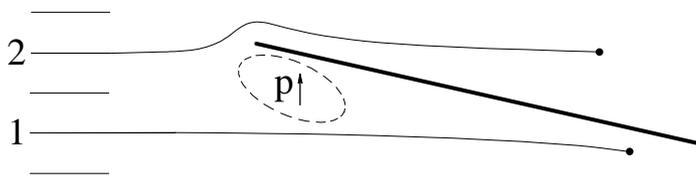


Abbildung 20: Stromlinie entlang der Leeseite

Entsprechend dieser Vorstellung muss es eine „Fluidscheide“ geben, die sogenannte Staulinie, die alle ankommenden Teilchen in eine Gruppe teilt, die dem Gebiet des höheren Druckes nach Plattenlee ausweicht und eine Gruppe, die nach Plattenluv ausweicht.

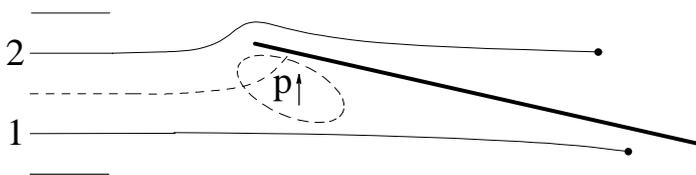


Abbildung 21: Staulinie

Die Platte drängt das Fluid also nach unten und nach oben weg. Ist die Entfernung zur Platte, normal zur Strömungsrichtung, nur ausreichend groß, so kann die Richtungsänderung eines plattennahen Moleküls die Außenströmung nicht mehr beeinflussen - sonst müsste das erste Molekül, das um die Platte strömt, sehr, sehr viele mehr mitverschieben. Für die weitere Betrachtung wird eine Systemgrenze an den Rand dieser ungestörten Außenströmung gelegt.

Mit Hilfe der Systemgrenzen erkennt man anhand des Abstands der Stromlinien voneinander, dass die Ge-

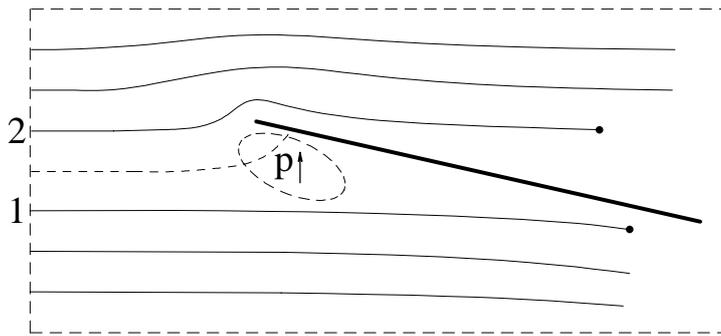


Abbildung 22: Einführung Systemgrenze

schwindigkeit in Lee größer sein muss als in Luv - und damit der Druck kleiner. Strömen die Teilchen entlang der Bahnen ① bzw. ② weiter, nimmt der Querschnitt zwischen Platte und Systemgrenze ab bzw. zu, d.h. Teilchen ① wird beschleunigt, Teilchen ② wird verzögert. Am Ende der Platte sind die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse genau umgekehrt wie zu ihrem Beginn. Das nun schnellere Teilchen ① nutzt am Ende der Platte seine kinetische Energie, um den Druck zu erzeugen, den es braucht, um die Plattenkante zu umströmen und den gleichen Strömungszustand wie vor der Platte anzunehmen. Das Teilchen ② wandelt hingegen durch den divergierenden Querschnitt zwischen Platte und Systemgrenze allmählich seine kinetische Energie in Druckenergie um und geht in den ursprünglichen Zustand über. Ohne Reibung wäre vor und hinter der Platte das Stromlinienbild identisch.

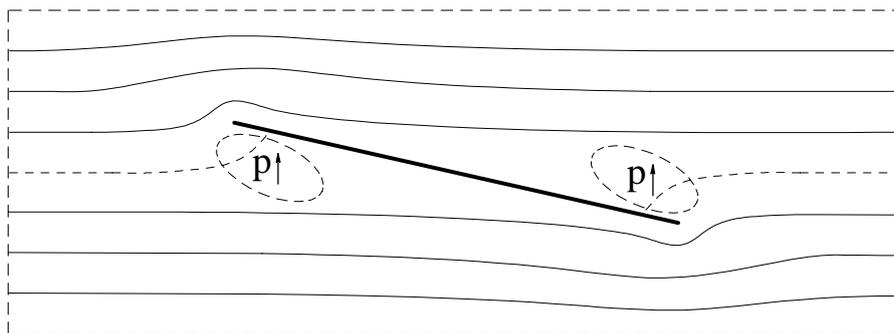


Abbildung 23: Symmetrie der reibungsfreien Umströmung

Betrachtet man das Bild der Stromlinien um die Platte, so ist es symmetrisch, die Drücke in Luv und in Lee, und damit die Kräfte, heben sich auf, die Platte erfährt keinen Auftrieb (sie würde aber in Rotation versetzt werden, da die Summe der Kräfte auf beiden Seiten zwar die gleiche, die Verteilung aber punktsymmetrisch ist).

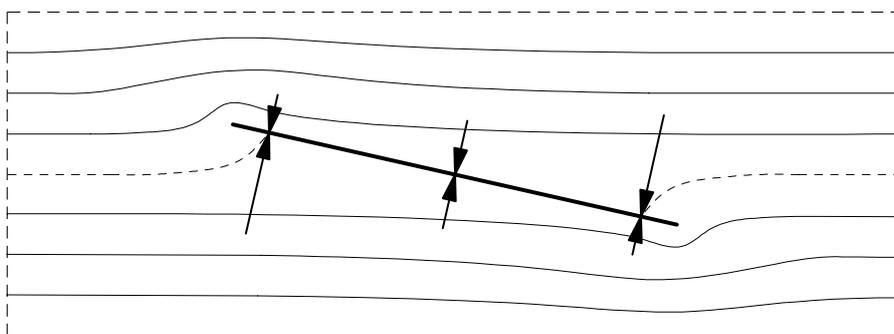


Abbildung 24: Schematische Druckverteilung der reibungsfreien Umströmung

In der folgenden Betrachtung soll die Platte von einem realen Fluid umströmt werden, dessen Viskosität nicht null ist. Auf der Vorderseite der Platte - noch ohne Einfluss der Reibung -, ergibt sich das gleich Bild wie im reibungsfreien Fall. Entlang der Platte bildet sich nun aber eine Grenzschicht, in der ein Teil der kinetischen Energie der Strömung in nicht rücktransformierbare Wärme umgewandelt wird. Am Ende der Platte verzögert das oberflächennahe Teilchen ① und wandelt dadurch einen Teil der verbleibenden kinetischen Energie in Druck um, der aber nicht ausreicht, um die Plattenkante zu umströmen: es löst sich ab und bildet den sogenannten Anfahrwirbel bei beginnender Umströmung. Durch die „Resignation“ des Teilchen ① fehlt nun der Gegendruck für das Teilchen ②, das der Platte entlang weiterströmen kann und durch den fehlenden Gegendruck nicht verzögert wird - der Druck in Lee bleibt auch an der hinteren Kante niedrig. Die Abströmung nimmt die Richtung der hinteren Plattenkante an - im Falle des Segels, des Achterlieks - und der Ursprung der Staulinie wandert an die Plattenkante.

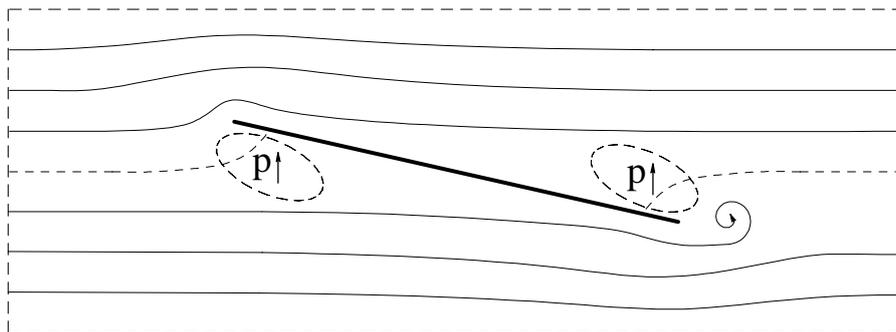


Abbildung 25: Entstehung Anfahrwirbel

Wie auf Vorwindkurs wird der Anfahrwirbel von der nachströmenden Luft nach Lee getrieben. Mit zunehmender Entfernung des Anfahrwirbels von der Platte wird die Leeseitenströmung zur Platte hin beschleunigt: Trotz divergierenden Querschnitts zwischen Platte und Systemgrenze bleibt der Druck gering.

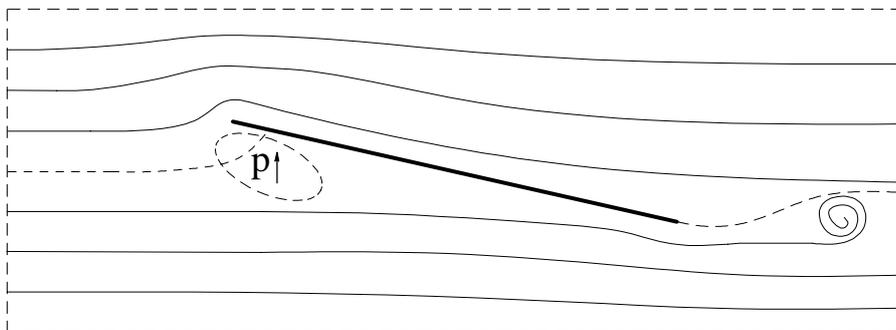


Abbildung 26: Beschleunigung der Leeseitenströmung

Unterschallströmungen kennen ihre Zukunft. Informationen über Druckverteilungen bzw. Druckschwankungen wandern mit Schallgeschwindigkeit durch das Fluid. Die nachfolgenden Teilchen wissen also, dass der Druck in Lee geringer und es damit einfacher ist an der Leeseite der Platte entlang zu strömen. An der Vorderkante ändern sie ihre Strömungsrichtung (upwash), und ein wesentlich größerer Teil des ankommenden Luftmassenstroms umströmt die Platte in Lee, was zu hohen Geschwindigkeiten (gemäß dem niedrigen Druck) an der Leeseite, vor allem an der vorderen Kante der Platte, führt. Die von Anfang an eingeführten Systemgrenzen verschieben sich, der Einfluss der veränderten Strömung ist weitreichender geworden. Am Plattenende strömt das Fluid, aufgrund der Viskosität, parallel ab, die Strömungsrichtung wurde geändert (downwash).

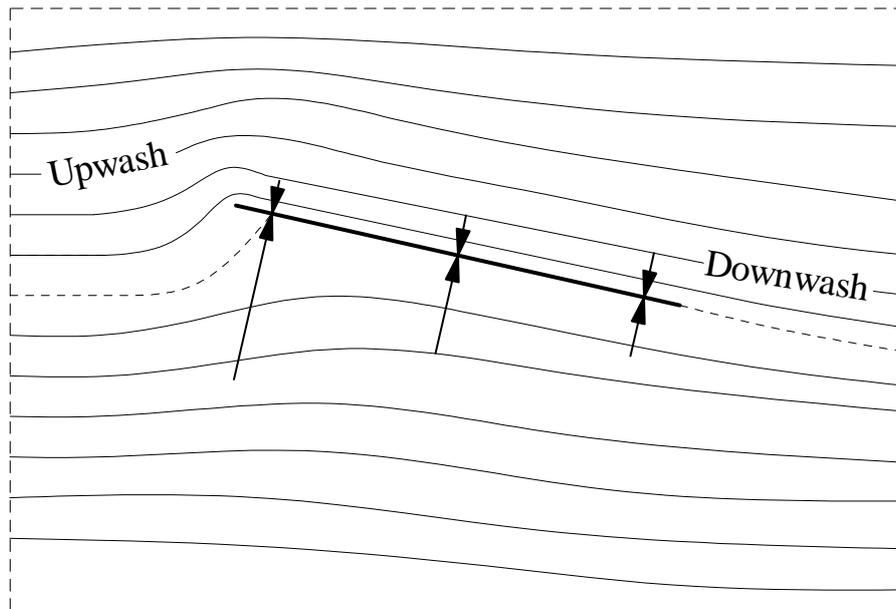


Abbildung 27: Reibungsbehaftete, stationäre Umströmung

Die Druckverteilung ist nun nicht mehr symmetrisch, aufgrund der wesentlich höheren Geschwindigkeiten an der Leeseite entsteht ein Überdruck gegenüber dem Umgebungsdruck an der Luvseite bzw. ein Unterdruck oder „Sog“ an der Leeseite - Auftrieb nach Lee wird erzeugt. Es ist möglich die Auftriebskraft über die Druckverteilung (nach Bernoulli) oder die Impulsänderung des umgeleiteten Fluids (nach Newton) zu berechnen, das Ergebnis ist das gleiche.

In der Abbildung 28 sind links ein Großsegel und eine Fock, getrimmt auf einen Hart-am-Wind-Kurs dargestellt, betrachtet aus einer Position etwas vorlicher und in Lee bzw. Steuerbord der Segel. Rechts in der Abbildung sind die Segel von Steuerbord achtern zu sehen. Die Stromlinien sind für drei unterschiedliche Höhen dargestellt.

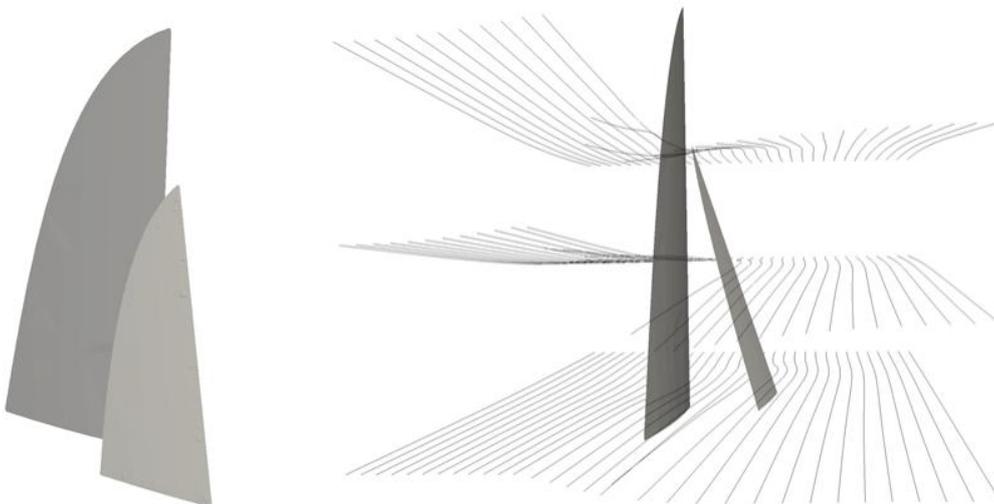


Abbildung 28: Großsegel und Fock mit Am-Wind-Trimmm von einer Position vorlicher und in Lee aus betrachtet (links in der Abbildung) und ebendiese Segel aus einer achterlichen Position mit drei Sätzen Stromlinien in drei verschiedenen Höhen (rechts in der Abbildung)

Im Anhang C sind die Stromlinien für unterschiedliche Höhen aus der Vogelperspektive dargestellt.

## 2.6 Kräfte über Wasser

In Abbildung 29 ist ein Segelboot auf Kurs Hart-am-Wind dargestellt. Im Segeldruckpunkt greifen zwei, bereits über die Segelfläche aufsummierte, Summenkräfte an: Die Auftriebskraft  $F_A$  quer zur Windrichtung und die Widerstandskraft  $F_W$  gegen die Windrichtung (diese zwei Richtungen bilden ein orthogonales Koordinatensystem (technisches Koordinatensystem, in der Abbildung 29 schwarz gefärbt)). Die Addition dieser zwei Kräfte ergibt die resultierende Kraft im Segel  $F_S$ . Eine Abschätzung der Relation zwischen Auftrieb und Widerstand ist im Anhang D zu finden.

In der Segeltheorie bzw. allgemein in der Nautik sind aber vor allem die Kräfte von Interesse, die am Boot parallel zur Schiffslängsachse und quer dazu wirken. Mit Hilfe dieser zwei Richtungen kann wieder ein orthogonales Koordinatensystem (nautisches Koordinatensystem, in der Abbildung 29 grau gefärbt) eingeführt werden, in dem die Kraft im Segel  $F_S$  in zwei Komponenten zerlegt wird: Die Vortriebskraft  $F_V$  in Schiffslängsachsenrichtung und die Querkraft  $F_Q$  quer zur Schiffslängsachsenrichtung. Das nautische Koordinatensystem ist dabei um den Winkel des einfallenden Windes auf die Schiffslängsachse gegenüber dem technischen Koordinatensystem verdreht.

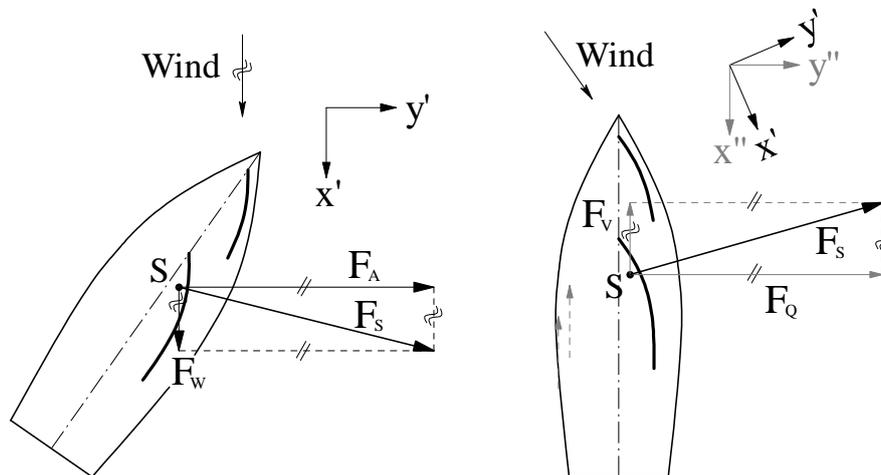


Abbildung 29: Kraftkomponenten im technischen Koordinatensystem (links) und Kraftkomponenten im nautischen Koordinatensystem (rechts)

## 2.7 Kräfte unter Wasser

Unter Annahme eines konstanten Bewegungszustands eines Bootes muss Kräftegleichgewicht herrschen; die dazu notwendigen Kräfte werden durch die Umströmung des Unterwasserschiffes erzeugt. Auf harten Kursen, wie in Abbildung 29 angedeutet, hat die Kraft im Segel eine große Komponente normal zur Schiffslängsachse (Querkraft). Die Querkraft versetzt das Boot seitlich nach Lee (Abdrift), die Umströmung des Unterwasserschiffes erfolgt in der Regel also nicht schiffslängsachsenparallel, sondern trifft leicht von (Wind-)Lee auf das Boot. Obwohl die Querkraft auf Kursen gegen den Wind wesentlich größer ist als die Vortriebskraft, bewegt sich das Boot trotzdem schneller in Kielrichtung als quer dazu. Dieser Umstand ist der Form des Unterwasserschiffes geschuldet.

### 2.7.1 Lateralplan

Die Form des Unterwasserschiffes ist so gewählt, dass Umströmungen parallel zur Schiffslängsachse möglichst kleine Widerstandskräfte, und Umströmungen quer zur Schiffslängsachse, möglichst große

Widerstands- und Auftriebskräfte am Unterwasserschiff erzeugen. Für diesen Zweck bieten sich Platten an, die parallel zur Schiffslängsachse angebracht sind: Schwert und Ruderblatt. Deren Länge und Anordnung ist für den Bootsbau und die Segeltheorie so essentiell, dass die seitliche Projektion des Unterwasserschiffes einen eigenen Namen erhalten hat, nämlich Lateralplan.



Abbildung 30: Projizierte Fläche des Unterwasserschiffes von vorne (links) und projizierte Fläche des Unterwasserschiffes von der Seite, der Lateralplan (rechts)

Wie aus der Darstellung in Abbildung 30 intuitiv ersichtlich, erzeugt eine seitliche Umströmung einen höheren Widerstand, als eine schiffsachsenparallele. Die von der Umströmung erzeugte Kraft am Unterwasserschiff kann wieder in Widerstandskräfte und Auftriebskräfte aufgespalten werden. Die Auftriebskräfte werden vor allem von Schwert und Ruderblatt erzeugt, die Höhe der Widerstandskräfte ist vor allem von der Rumpfform und der Rauhmigkeit des Unterwasserschiffes abhängig.

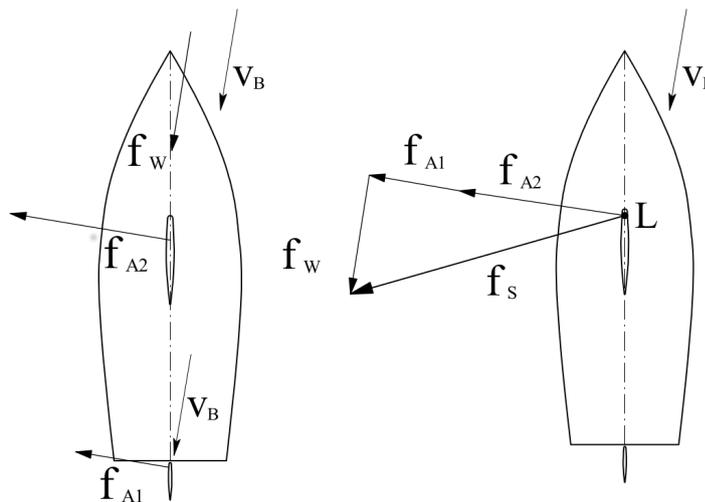


Abbildung 31: Widerstands- und Auftriebskräfte am Unterwasserschiff (links) und Summenkraft  $f_s$  aller am Unterwasserschiff angreifender Kräfte im Lateraldruckpunkt (rechts)

Je nach Bauart des Bootes (des Unterwasserschiffes) wird ein größerer Teil des Widerstands gegen die Abdrift durch Widerstand bzw. durch Auftrieb erzeugt. Traditionelle Langkieler erzeugen keine große Auftriebskraft, sie setzen der Abdrift eher Widerstand entgegen. Sie sind dafür kursstabil und auch für Anfänger leicht zu steuern. Sportliche Rennboote hingegen haben lange schmale Kielflossen (wie Flugzeugflügel), die einen sehr starken Auftrieb am Unterwasserschiff erzeugen können (und einen geringeren Widerstand gegen die Abdrift). Für einen konstanten, und damit großen, Auftrieb muss der Rudergänger aber sehr ruhig und stetig fahren – eher eine Aufgabe für geübte Rudergänger.

Die Summe  $f_s$  all dieser am Unterwasserschiff wirkenden Kräfte kann in deren Schwerpunkt, dem Lateraldruckpunkt L, angesetzt und vom technischen ins nautische Koordinatensystem transformiert

werden. Ein Boot wird vom Wind so lange beschleunigt bis die jeweiligen Kraftkomponenten in bzw. quer zur Schiffslängsachse im Kräftegleichgewicht stehen, d.h. sich vektoriell zu null addieren. Bei konstantem Wind und ruhigen Wasser hat das Boot einen stationären Bewegungszustand (Endgeschwindigkeit und Fahrtrichtung sind konstant) erreicht.

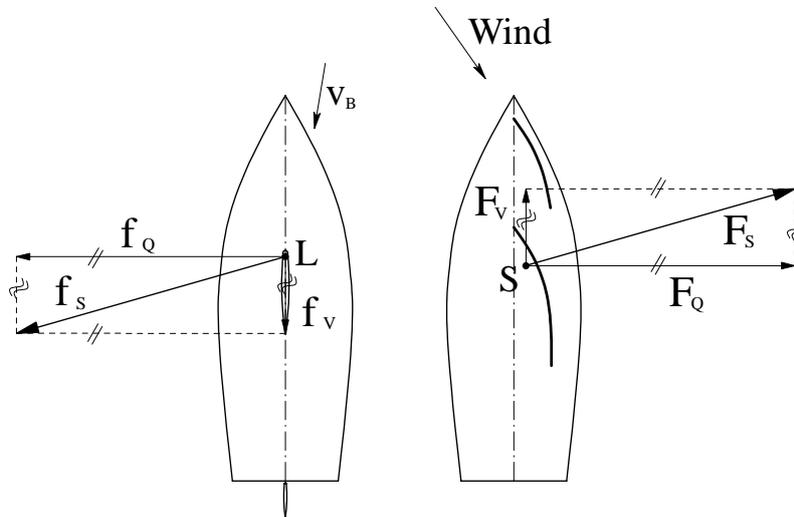


Abbildung 32: Kräfte am Unterwasserschiff im nautischen Koordinatensystem (links) und Kräfte am Rigg im nautischen Koordinatensystem (rechts)

### 2.7.2 Schwertrimm auf Jollen

Im Gegensatz zur schweren Kielflosse von Jachten, hat das Schwert auf Jollen ausschließlich die Aufgabe der Abdrift bei starken Querkräften entgegenzuwirken - auch wenn durch das Absenken des Schwertes der Gesamtschwerpunkt der Jolle nach unten verlagert und dadurch die Stabilität im Prinzip erhöht wird, ist der Effekt so gering, dass er, wenn überhaupt, nur von theoretischer Interesse ist. Trotz seiner schmalen Formgebung in Schiffslängsachsenrichtung erzeugt es natürlich auch einen unerwünschten Widerstand gegen den Vortrieb. Aus diesem Grund wird das Schwert bei achterlich einfallenden Winden, bei denen kaum Querkräfte wirken, aus dem Wasser gehoben. Auf Kursen mit vorlich einfallenden Winden, mit starken Querkräften, ist es abgesenkt.

## 2.8 Bootsbewegungen um sämtliche Achsen

Aufgrund der durch Wind, Wasser und Wellen erzeugten Kräfte und Momente wird das Boot um alle drei Achsen gedreht. Diese Drehung kann statisch, das heißt einmalig, erfolgen bis sich die Kräfte und Momente im Gleichgewicht befinden, oder aber dynamisch und damit eine mehr oder weniger periodische Drehbewegung um die jeweilige Achse erzeugen.

Tabelle 1: Statische und dynamische Bewegungen um die drei Hauptachsen eines Schiffes

	Längsachse	Querachse	Vertikalachse
statisch	Krängung	Vertrimmung	Kursänderung
dynamisch	rollen	stampfen	gieren

### 2.8.1 Grundsätzlicher Bootslagentrimm

Von wenigen Ausnahmen, vor allem im Jollenbereich, abgesehen kann der Trimm der Bootslage und des Bootsrumpfes auf einige Faustregeln reduziert werden.

**Krängung** Ein Boot sollte möglichst aufrecht gesegelt werden. Auf gewichtsstabilen Jachten ist vor allem bei stärkerem Wind ein Segeln ohne Krängung nicht möglich - es gilt daher sich für ein vernünftiges Maß an Segelfläche zu entscheiden und die Krängung durch Gewichtstrimm (Mannschaftsgewicht nach Luv) zu reduzieren. Auf rein formstabilen Jollen gilt es durch Segel- und Gewichtstrimm das Boot stets aufrecht zu fahren. Eine Ausnahme bildet das Segeln bei sehr wenig Wind, wenn der Winddruck nicht ausreicht das Profil des Segels gegen die Schwerkraft auszubilden. In diesem Fall muss mithilfe des Mannschaftsgewichts leichte Leekrängung erzeugt werden, um die Bildung des Profils durch das Gewicht des Segeltuchs zu unterstützen. Auf eine weitere Ausnahme wird im Kapitel 2.9.2 eingegangen.

**Vertrimmung** Die gewünschte Neigung des Bootes um die Querachse hängt vor allem mit der Bootsgeschwindigkeit zusammen:

- ⊗ **Wenig Wind:** Durch Versetzen des Mannschaftsgewichts nach vor sollte bei geringen Bootsgeschwindigkeiten das Heck aus dem Wasser gehoben werden. Dies verringert die benetzte Fläche des Unterwasserschiffs und damit den Strömungswiderstand.
- ⊗ **Mäßiger Wind:** Erreicht die Bootsgeschwindigkeit die Rumpfgeschwindigkeit, so wird der Reibungswiderstand aufgrund der benetzten Oberfläche des Unterwasserschiffs vernachlässigbar klein im Vergleich zum Wellenwiderstand, der von der Wasserlinienlänge abhängt. Das Mannschaftsgewicht sollte so an Bord verteilt werden, dass die Länge der Wasserlinie maximiert wird.
- ⊗ **Starker Wind:** Bei stärkeren Winden muss nun eine Unterscheidung zwischen rein formstabilen, gleitfähigen Jollen und den gewichtsstabilen Jachten getroffen werden, die, zumindest bei glattem Wasser, stets ihr Gewicht an Wasservolumen verdrängen.
  - 🔗 **Jollen:** Um mit einer Jolle in den Gleitzustand kommen, kann eine Verlagerung des Gewichts nach achtern hilfreich sein, um den Bug aus dem Wasser zu heben - während des Gleitens selbst muss das Mannschaftsgewicht dann nach achtern gebracht werden. Andernfalls tendiert der Bug der Jolle in eine vorlaufende Welle vollständig einzutauchen - das sogenannte „Unterschneiden“. Das Boot wird dabei ruckartig verzögert, was nicht nur unvorteilhaft für das Material, sondern auch zu Verlust oder Verletzung von Crewmitgliedern führen kann.
  - 🔗 **Jachten:** Bei zunehmendem Winddruck im Segel tendiert das Heck dazu tiefer ins Wasser zu tauchen - dadurch entsteht ein größeres Totwassergebiet hinter dem Boot, das den Strömungswiderstand erhöht. Das Mannschaftsgewicht sollte daher tendenziell wieder nach vorne verlagert werden, um die Eintauchtiefe des Hecks zu verringern ohne die Wasserlinie zu verkürzen. Priorität hat in dieser Situation dennoch die Reduktion der Krängung.

**Gierigkeit** Der Segel- und Gewichtstrimm sollte so erfolgen, dass das Boot ohne Ruderlage geradeaus fährt (keine Kursänderung vollführt). Dies ist abhängig von Windverhältnissen und Bootstyp nur bedingt möglich und das Thema selbst so wichtig, dass dies eine genauere Erläuterung erfordert.

## 2.9 Gierigkeit

Eine Kraft kann zu einer Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers führen, diesen beschleunigen, verzögern oder dessen Bewegungsrichtung ändern. Ein Kräftepaar kann ein Drehmoment erzeugen und dadurch einen Körper in Rotation versetzen oder ebendiese hemmen. Ausschlaggebend für die Größe des Drehmoments  $T$  sind die Größe der Kräfte  $F$  und deren Normalabstand  $l$  zueinander.

$$T = F l \quad (9)$$

2.9.1 Luv- und Leegierigkeit auf hohen Kursen ohne Krängung

Werden beide Darstellungen aus Abbildung 32 übereinander gelegt, so ist zu erkennen, dass die Bedingung für das Kräftegleichgewicht zwar erfüllt ist, die beiden Summenkräfte über und unter Wasser jedoch nicht auf der gleichen (Wirkungs-)Linie liegen - sie erzeugen ein Moment. Das Kräftepaar  $F_S$  und  $f_S$  dreht den Bug des Bootes um dessen Vertikalachse gegen den Wind, also nach Luv. Diese Phänomen wird daher als Luvgerigkeit bezeichnet.

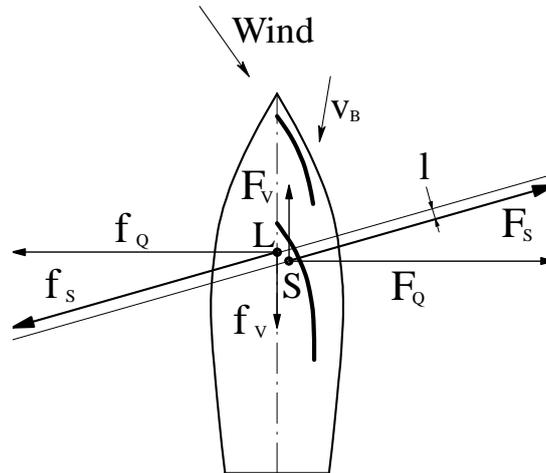


Abbildung 33: Kräftegleichgewicht ohne Momentengleichgewicht (Luvgerigkeit)

Um der Luvgerigkeit entgegenzuwirken verdreht der Rudergänger das Ruderblatt und erhöht so die wirkenden Auftriebskräfte und (ungewollter Weise) auch die Widerstandskräfte am Ruderblatt - durch die relativ größere Kraft am Heck verschiebt sich der Lateraldruckpunkt nach achtern. Die Ruderlage wird so lange verändert bis sich nicht nur ein neues Kräftegleichgewicht, sondern auch ein Momentengleichgewicht einstellt, sodass sich die Summe aller wirkenden Momente zu null ergibt.

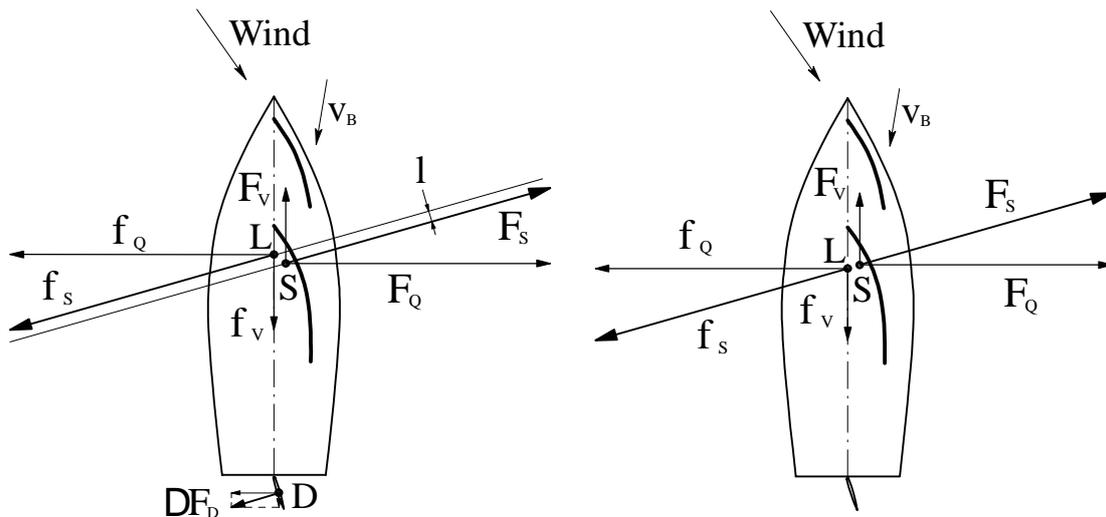


Abbildung 34: Ausgleichen der Luvgerigkeit durch verstärkte Ruderlage (links) und finale stationäre Bootsbeugung im Kräfte- und Momentengleichgewicht (rechts)

Die Luvgerigkeit sollte insgesamt so klein wie möglich gehalten werden, um (permanente) starke Ruderla-

gen zu vermeiden. Wie soeben diskutiert, kann durch die Verlagerung des Lateraldruckpunkts nach achtern die Luvgerigkeit verringert werden. Vor allem auf kleinen Booten (z.B. Jollen) kann der Lateraldruckpunkt durch die Verlagerung des Mannschaftsgewichts entlang der Längsachse verschoben werden (Vertrimmung). Um die Luvgerigkeit eines Bootes zu verringern, kann also die Crew ihr Gewicht zum Heck hin verlagern.

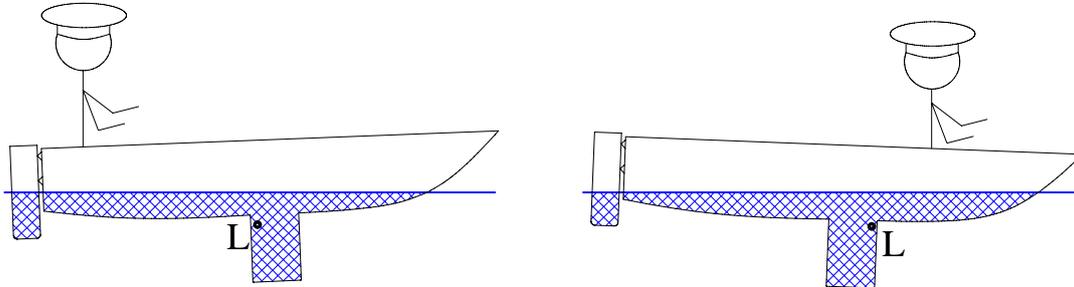


Abbildung 35: Verschiebung des Lateraldruckpunkts durch Verlagerung des Mannschaftsgewichts

Das gierende Moment ist abhängig von der Lage des Segeldruckpunkts und des Lateraldruckpunkts zueinander. Anstatt also den Lateraldruckpunkt zu verschieben um die Luvgerigkeit eines Bootes zu verringern, kann auch der Segeldruckpunkt umpositioniert werden. Eine Verringerung der Luvgerigkeit erfordert eine Verlagerung des Segeldruckpunkts nach vor, z.B. durch reffen des Großsegels.

**Luvgerigkeit** Um der Luvgerigkeit vorzubeugen, kann entweder der Segeldruckpunkt nach vor oder der Lateraldruckpunkt nach achtern verlagert werden. Folgende Maßnahmen können theoretisch zur Verringerung der Luvgerigkeit getroffen werden:

- ⊗ Reffen/Bergen des Großsegels
- ⊗ Auffieren (und killen lassen) des Großsegels
- ⊗ Mannschaftsgewicht nach achtern
- ⊗ Bei geringen Windstärken: Vergrößern der Vorsegelfläche

**Leegierigkeit** Die Leegierigkeit eines Bootes ist nur von theoretischer Bedeutung, Segelboote neigen konstruktionsbedingt zur Luvgerigkeit (wenn die Segel richtig getrimmt sind). Dies hat den Grund, dass bei Ruderbruch ein Segelboot von selbst anluvt, in den Wind schießt und damit stehen bleibt, während ein Boot mit Leegierigkeit abfällt, beschleunigt und halst. Ist ein Boot tatsächlich leegierig, so ist es meist falsch getrimmt und die Leegierigkeit kann durch die Berichtigung der Segelstellung kompensiert werden. Der Vollständigkeit halber sollen hier dennoch Maßnahmen zur Verringerung einer eventuellen Leegierigkeit aufgelistet werden.

Um der Leegierigkeit vorzubeugen, kann entweder der Segeldruckpunkt nach achtern oder der Lateraldruckpunkt nach vor verlagert werden. Folgende Maßnahmen können theoretisch zur Verringerung der Leegierigkeit getroffen werden:

- ⊗ Reffen/Bergen des Vorsegels
- ⊗ Auffieren (und killen lassen) des Vorsegels
- ⊗ Mannschaftsgewicht nach vorne
- ⊗ Bei geringen Windstärken: Vergrößern der Großsegelfläche

Die soeben beschriebenen Formen von Luv- und Leegierigkeit spielen eine untergeordnete Rolle (vor allem die eigentlich nicht existente Leegierigkeit) - bei stärkerem Wind kommen diese fast nicht zu tragen - und sind eher von theoretischem Interesse. Hilfreich (und manchmal notwendig) sind diese Überlegungen

jedoch bei Ruderbruch. In diesem Fall muss das Boot unter Umständen mit den Segeln und der Verlagerung des Mannschaftsgewichts manövriert werden und durch kurzzeitig falschen Segel- und Gewichtstrimm zum Gieren, und schlussendlich zu einer Kursänderung, gebracht werden:

- ✳ Um anzuluven wird die Schot des Vorsegels kurzzeitig stark gefiert, sodass es killt. Das Großsegel wird richtig getrimmt oder ein wenig zu dicht gefahren. Das Mannschaftsgewicht wird nach vor gebracht. Dadurch wandert der Segeldruckpunkt nach achtern, der Lateraldruckpunkt nach vor – das Boot wird luvgerig.
- ✳ Um abzufallen wird die Schot des Großsegels kurzzeitig stark gefiert, sodass es killt. Das Vorsegel wird richtig getrimmt oder ein wenig zu dicht gefahren. Das Mannschaftsgewicht wird nach achtern gebracht. Dadurch wandert der Segeldruckpunkt nach vor, der Lateraldruckpunkt nach achtern – das Boot wird leegierig.

Sobald das Boot auf dem gewünschten Kurs ist, werden die Segel und der Gewichtstrimm so eingestellt, dass die Summenkräfte im Segel und am Unterwasserschiff auf der gleichen (Wirkungs-)Linie liegen.

### 2.9.2 Luvgerigkeit auf tiefen Kursen

Segelt ein Boot vor dem Wind, so wandert der Segeldruckpunkt von der Mittschiffsachse weg. Aufgrund der geringen Querkräfte wirken die Summenkräfte beinahe schiffslängsachsenparallel und eine Verschiebung von Segel- und Lateraldruckpunkt entlang der Längsachse hat kaum Einfluss auf eine mögliche Gierigkeit. Vor allem mit katgetakelten Booten oder auch Booten deren Großsegel wesentlich größer ist als deren Vorsegel (wie auf Jollen üblich) wandert der Segeldruckpunkt weit nach Lee und erzeugt mit den am Unterwasserschiff angreifenden Kräften eine Luvgerigkeit (siehe links in Abbildung 36). Durch das notwendige Gegenruder, um den Kurs zu halten, wird eine Kraft quer zur Schiffslängsachse erzeugt, die das Boot seitlich versetzt, eine Art „Abdrift“ nach Luv. Auf Kursen „platt vor dem Wind“ kommt es erst dadurch zu einer seitlichen Umströmung und damit zu einem Widerstand gegen den Lateralplan, durch die das Gegenmoment erst ermöglicht wird.

Zur Vermeidung der Luvgerigkeit, und damit des bremsenden Gegenruders, werden katgetakelte Jollen durch Verlagerung des Mannschaftsgewichts nach Luv gekrängt. Wandert durch diese Krängung der Segeldruckpunkt direkt über den Lateraldruckpunkt, verschwindet der Hebelarm und damit das gierende Moment, wie in Abbildung 36 rechts schematisch dargestellt.

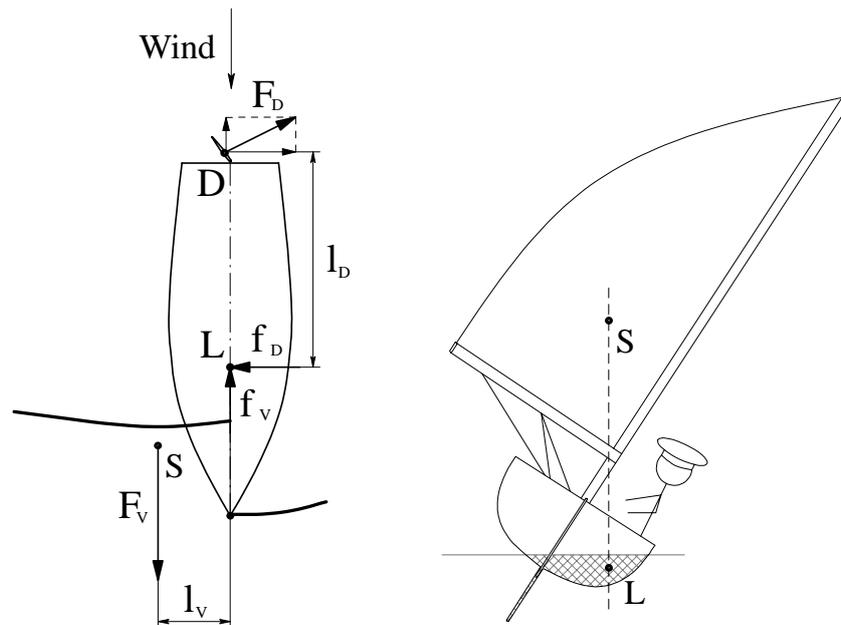


Abbildung 36: Luvgerigkeit auf tiefen Kursen einer Slup mit Fock (links) und Luvkrängung durch Verlagerung des Mannschaftsgewichts zur Vermeidung der Luvgerigkeit (rechts)

### 2.9.3 Luvgerigkeit bei Krängung

Die wirkenden Kräfte am Unterwasserschiff und im Rigg erzeugen auch ein Moment um die Längsachse. Links in Abbildung 37 ist ein Boot mit Blick auf das Heck abgebildet und die jeweiligen Kraftkomponenten normal auf die Schiffslängsachse über und unter Wasser. Die Querkraft und ihre unterseeische Gegenspielerin erzeugen ein Moment, das das Segelboot um die Längsachse dreht - es krängt. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit und je höher der zum Wind gefahrene Kurs ist, desto stärker das krängende Moment.

Rechts in Abbildung 37 ist die Situation aus der Vogelperspektive dargestellt und der Anschaulichkeit halber nur die Kraftkomponenten, die über und unter Wasser parallel zur Schiffslängsachse wirken. Ohne Krängung befinden sich Lateral- und Segeldruckpunkt beinahe direkt übereinander. Mit zunehmender Krängung wandern Segeldruckpunkt und Lateraldruckpunkt voneinander weg, es entsteht ein Hebelarm und die Vortriebskraft und ihre unterseeische Gegenspielerin versuchen das Boot in den Wind zu drehen - es ist luvgerig.

Eine Verlagerung der Druckpunkte entlang der Schiffslängsachse verändert den Hebelarm nicht, der Abstand kann nur durch eine Verringerung der Krängung verkleinert werden. Auf kleinen Booten (z.B. Jollen) kann der Krängung bis zu einem gewissen Maße mit der Verlagerung des Mannschaftsgewichts nach Luv vorgebeugt werden. Auf Yachten und bei starken Winden muss jedoch das krängende Moment durch Verringerung der wirkenden Kräfte reduziert werden. Durch das Verkleinern der Segelfläche werden nicht nur die Luvgerigkeit erzeugenden Kräfte, sondern auch die Krängung selbst und damit der Hebelarm verringert - eine Verkleinerung der Segelfläche wirkt also doppelt.

Bei viel Wind und starker Krängung ist es oft nicht mehr möglich, durch Einschlagen des Ruders das Boot auf Kurs zu halten. Es luvt dann stark an und schießt in den Wind, was vor allem gefährlich ist, wenn sich in Luv ein Objekt befindet. Aus diesem Grund muss bei solchen Bedingungen die Großschot stets bereit sein, losgeworfen zu werden. Das rechtzeitige Einstecken eines Reffs oder Wechseln auf kleinere Segel ist in der Regel die material- und mannschaftsschonendere Variante.

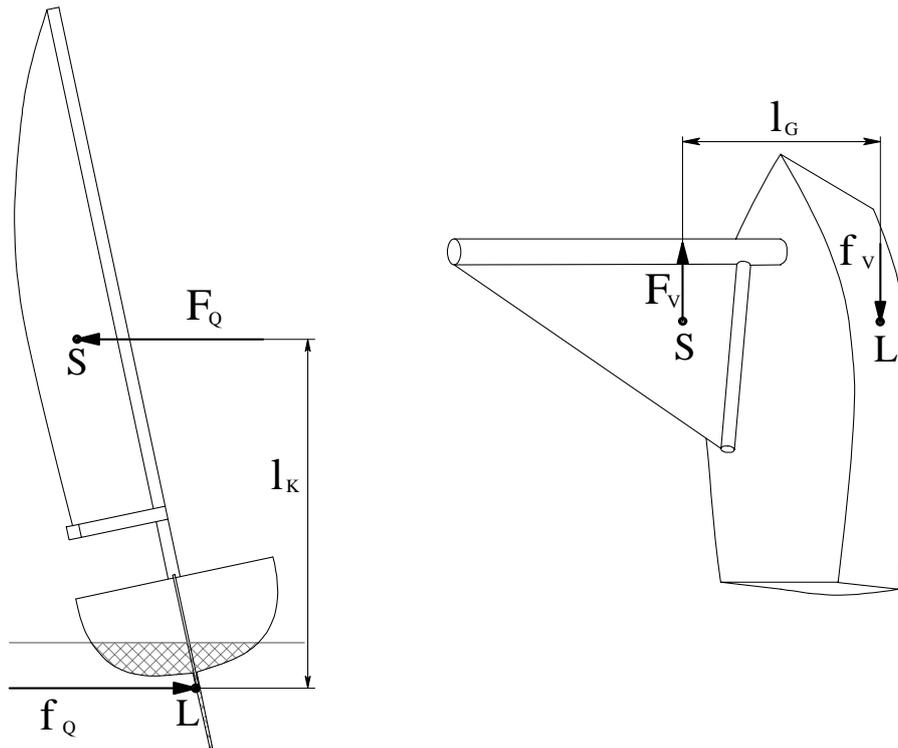


Abbildung 37: Krängendes Moment durch Kraftkomponenten quer zur Schiffslängsachse (links) und Luvgerigkeit erzeugt durch die Kraftkomponenten in Schiffslängsachsenrichtung (rechts)

Auf Jollen ist das Reffen bzw. der Segelwechsel häufig nicht möglich. Starke krängende Moment auf Am-Wind-Kursen können nicht nur dazu führen, dass nicht mehr aufrecht gesegelt werden kann, sondern bergen die Gefahr einer Kenterung. Durch das Anheben des Schwerts kann die Krängung auf grund des verringerten Hebelarms reduziert werden. Da die Querkraft aber gleich bleibt, muss die Widerstandskraft gegen die Abdrift durch eine schnellere Umströmung des Wassers um das Unterwasserschiff erzeugt werden, damit sich wieder ein Kräftegleichgewicht einstellt - die Abdrift selbst nimmt also zu.

Die soeben beschriebene Art der (Luv-)Gierigkeit ist die „spürbarste“, weil sie mit zunehmendem Wind ebenfalls stärker wird und gegebenenfalls als einzige nicht durch (wenig) Ruderlage ausgeglichen werden kann – sie ist in der Praxis eine ständige Begleiterin, während die anderen beschriebenen Formen hauptsächlich von theoretischem Interesse sind.

Sollte es, wie im Kapitel 2.9.1 beschrieben, notwendig sein bei Ruderbruch das Segelboot mit den Segeln zu steuern, so kommen mit den hier beschriebenen Mechanismen zusätzliche Möglichkeiten ergänzend hinzu, die Luvgerigkeit des Bootes zu verringern bzw. zu erhöhen:

- ✳ Um die Luvgerigkeit eines Bootes zu erhöhen, kann das Boot weiter nach Lee gekrängt werden (z.B. durch Verlagerung des Mannschaftsgewichts nach Lee).
- ✳ Um die Luvgerigkeit eines Bootes zu reduzieren, kann die Leekrängung verringert oder das Boot sogar nach Luv gekrängt werden (z.B. durch Verlagerung des Mannschaftsgewichts nach Luv).

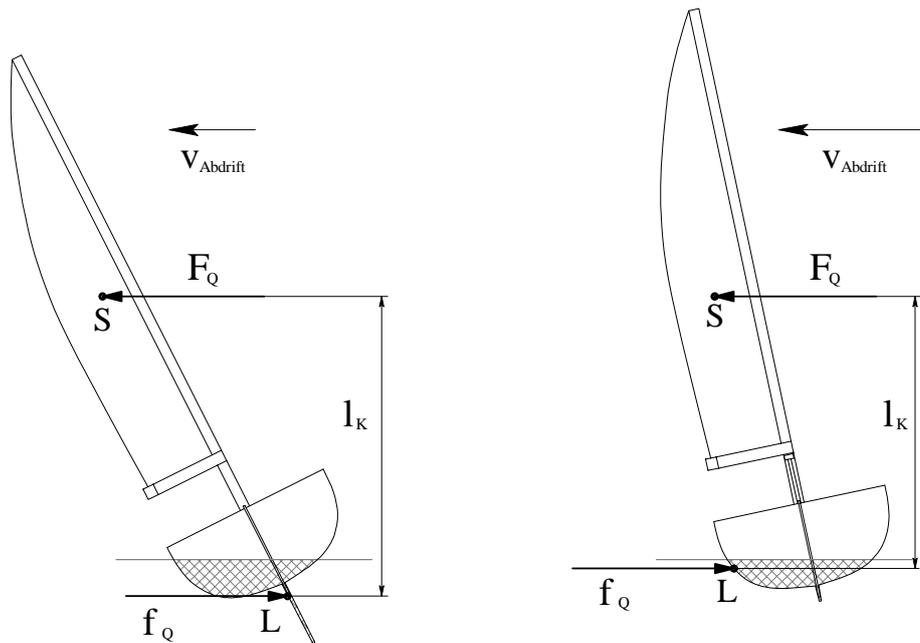


Abbildung 38: Unterschiedlich starke Krängung bei gleicher Widerstandskraft gegen die Abdrift, aber unterschiedlichen Hebelarmen: Starke Krängung und wenig Abdrift (links) und schwache Krängung und viel Abdrift (rechts)

### 3 Stabilität

Die (Quer-)Stabilität eines Bootes ist dessen Tendenz sich bei Krängung von selbst wieder aufzurichten. Bei der Formstabilität, die jeder Schwimmkörper mehr oder weniger besitzt, bildet das Kräftepaar Gewichtskraft und (statische) Auftriebskraft bei entstehender Krängung ein aufrichtendes Moment.

#### 3.1 Statischer Auftrieb

Auch an einem Boot greift eine Gewichtskraft an und obwohl es keinen festen Boden unter dem Kiel hat, schwimmt es. Es muss also eine gleich große Kraft in entgegen gesetzter Richtung wirken, damit die Summe aller Kräfte null ergibt: die Auftriebskraft  $F_A$ . Für das Kräftegleichgewicht muss diese der Gewichtskraft des Bootes  $G_B$  entsprechen. Beide Kräfte können gemäß (1) als Produkt aus Masse und Beschleunigung beschrieben werden. Gewichtskräfte werden mit der Erdbeschleunigung  $g$  berechnet; die Erdbeschleunigung entspricht der von einem Körper im freien Fall im Gravitationsfeld der Erde erfahrenen Beschleunigung. Die (statische) Auftriebskraft wirkt auf jeden Körper der ein flüssiges oder gasförmiges Medium verdrängt und entspricht der Masse des verdrängten Mediums multipliziert mit der Erdbeschleunigung. Im Kräftegleichgewicht eines im Wasser schwimmenden Bootes stehen sich also die Masse des Bootes  $m_B$  und die vom Schiffskörper verdrängten Luft- und Wassermassen,  $m_L$  und  $m_W$ , gegenüber.

$$(m_W + m_L) g = F_A \stackrel{!}{=} G_B = m_B g \quad (10)$$

Ein schwimmender Körper taucht so tief in das Wasser ein, bis die Summe der Massen aus verdrängter Luft und verdrängten Wassers der Bootsmasse entspricht. Die Masse ist das Produkt aus deren eingenommenen Volumen  $V$  und deren mittlerer Dichte. Die Dichten der Medien Wasser  $\rho_W$  und Luft  $\rho_L$  sind, zumindest in der kleinräumigen Betrachtung, homogen, wobei  $\rho_W \approx 1000 \text{ kg/m}^3$  und  $\rho_L \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$  - die Dichte des Wassers ist mehr als 800 mal höher als die der Luft (auf Meeresspiegelniveau). Die Masse der verdrängten Luft ist aufgrund deren geringen Dichte meist vernachlässigbar.

$$\rho_W V_W + \underbrace{\rho_L V_L}_{\ll} = m_B \quad (11)$$

Zur Berechnung der mittleren Dichte eines heterogenen Körpers, wie ein Boot einer ist, muss auch die vom Bootkörper umschlossene Luft miteinbezogen werden. Damit ein Boot schwimmt und nicht untergeht, also dessen gesamtes Volumen an Wasser verdrängt wird, muss die mittlere Dichte des Bootes  $\rho_B$  kleiner sein, als die des Wassers.

$$\frac{V_W}{V_B} = \frac{\rho_B}{\rho_W} < 1 \quad (12)$$

Hat das Boot ein Leck, verdrängt das eindringende Wasser die Luft aus dem Bootkörper und die mittlere Dichte des Boots nimmt zu - übersteigt diese die Dichte des Wassers sinkt das Boot, auch wenn das Leck abgedichtet wird.

Unter oder im Wasser wiegt der Körper um die Masse des von ihm verdrängten Wassers weniger (und um die Masse der dadurch weniger verdrängten Luft mehr). Der Schwerpunkt der Summe aller angreifenden Auftriebskräfte greift im Massenschwerpunkt des jeweiligen verdrängten Mediums an.

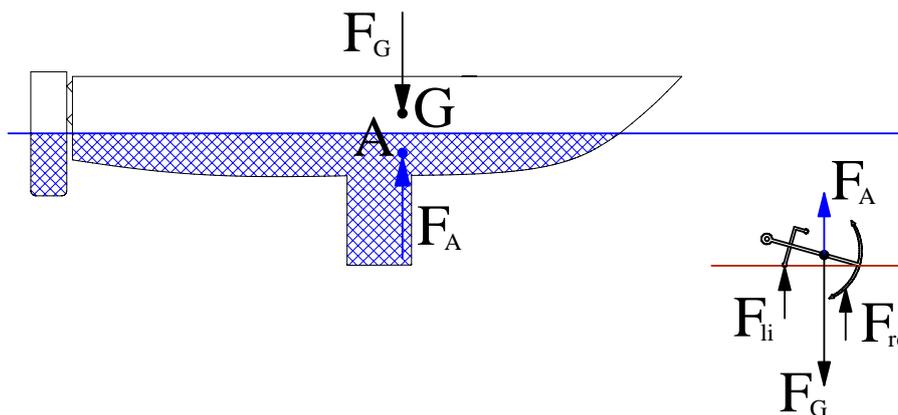


Abbildung 39: Kräfte an einem schwimmenden und einem versunkenen Körper

### 3.2 Formstabilität

Jedes Boot, praktisch jeder Gegenstand (mit Ausnahme von Kugeln und Zylindern) besitzt eine Formstabilität. Schwertboote ohne Gewichtskiel, aber auch große Frachter und Passagierschiffe sind REIN formstabile Boote, sie erhalten ihre Stabilität also ausschließlich aus der Form ihres Rumpfes. Aus Gründen der Anschaulichkeit ist das krängende Kräftepaar, Querkraft  $F_Q$  und ihr Gegenkraft unter Wasser  $f_Q$ , in den folgenden Abbildungen nicht eingezeichnet.

Krängt ein Boot verändert sich die Position des verdrängten Wassers und die Auftriebskraft, die im Schwerpunkt des verdrängten Wassers angreift, wandert nach Lee. Die Gewichtskraft des Bootes bleibt jedoch in Mittschiffsachse und befindet sich bei anfänglicher Krängung leicht in Luv der Auftriebskraft - das Kräftepaar erzeugt ein der Krängung entgegen wirkendes aufrichtendes Moment. Mit zunehmender Krängung nimmt der Hebelarm zwischen den Kräften zunächst zu und das Boot wird „stabiler“. Erreicht die Krängung den sogenannten statischen Kenterwinkel  $\alpha_{Ks}$ , ist die maximale Länge des Hebelarms erreicht und damit das aufrichtende Moment am größten. Nimmt die Krängung weiter zu, verliert das Boot wieder

an Stabilität und bleiben die Kräfteverhältnisse unverändert droht das Boot umzufallen. Der Hebelarm wird verkürzt bis die Gewichtskraft über die Auftriebskraft wandert - dieser Krängungswinkel wird als dynamischer Kenterwinkel  $\alpha_{Kd}$  bezeichnet. Die Stabilität ist null und das Boot kentert. Ist der dynamische Kenterwinkel überschritten ist das Boot, zumindest laut technischer Definition, gekentert.

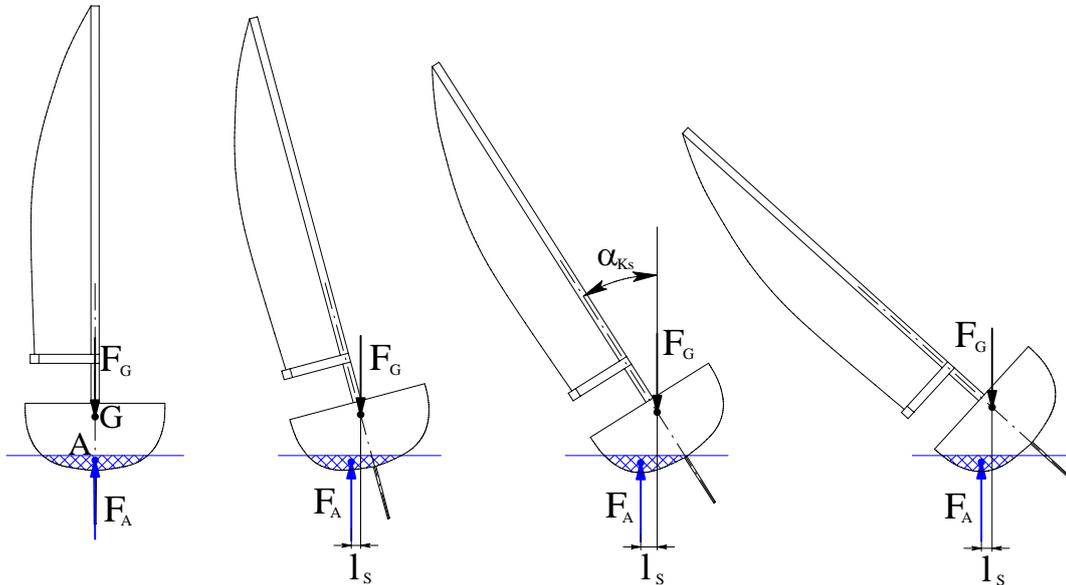


Abbildung 40: Aufrichtendes Moment durch Formstabilität abhängig von der Krängung

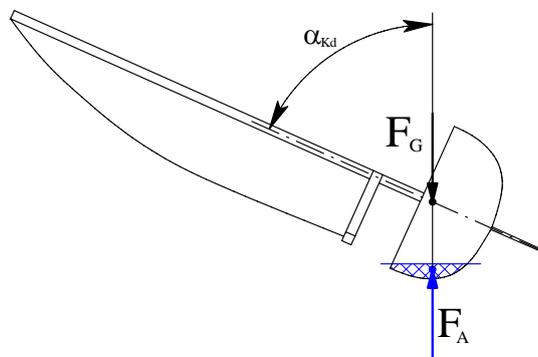


Abbildung 41: Bevorstehende Kenterung bei Erreichen des dynamischen Kenterwinkels

Das Stabilitätsdiagramm in Abbildung 42 zeigt die Momenten- bzw. Hebelarmkurve einer formstabilen Jolle. Auf der Abszisse ist der Krängungswinkel aufgetragen. Der statische Kenterwinkel befindet sich unter dem globalen Maximum der Kurve, der dynamische unter dem Schnittpunkt der Kurve und der Horizontalen bei  $T = 0$ .

Bei Schwertbooten befindet sich der Gewichtsschwerpunkt „weit“ über dem Auftriebsschwerpunkt. Abhängig von der Form des Unterwasserschiffes und der Lage von Gewichts- und Auftriebsschwerpunkt zeigt ein Boot unterschiedliches Verhalten bezüglich seiner Stabilität.

- ✳ **Rumpfform:** Je breiter und flacher der Bootsrumpf konzipiert ist, desto höher ist dessen Stabilität - bei Krängung wandert die Auftriebskraft verhältnismäßig weit nach Lee (siehe links in Abbildung 43).

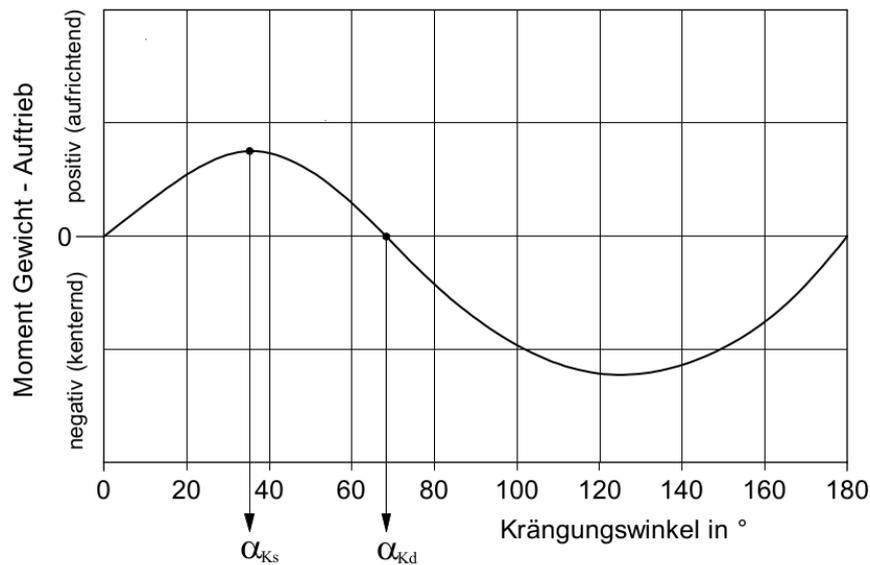


Abbildung 42: Stabilitätsdiagramm eines formstabilen Bootes

Breite Boote zeichnen sich auch durch eine hohe Anfangsstabilität aus, sie erzeugen schon bei wenig Krängung ein großes aufrichtendes Moment und der statische Kenterwinkel wird bei kleineren Krängungen erreicht, als bei ranken Booten - dennoch ist das aufrichtende Moment breiter Boote größer (wie rechts in Abbildung 43 angedeutet). Das Paradebeispiel für Formstabilität ist der Katamaran - aufgrund seiner Breite sehr stabil, ist der statische Kenterwinkel jedoch schon bei geringen Inklinationen erreicht; sobald der Rumpf in Luv kein Wasser mehr verdrängt. Das Stabilitätsdiagramm in Abbildung 44 zeigt die Momenten- bzw. Hebelarmkurve eines Katamarans.

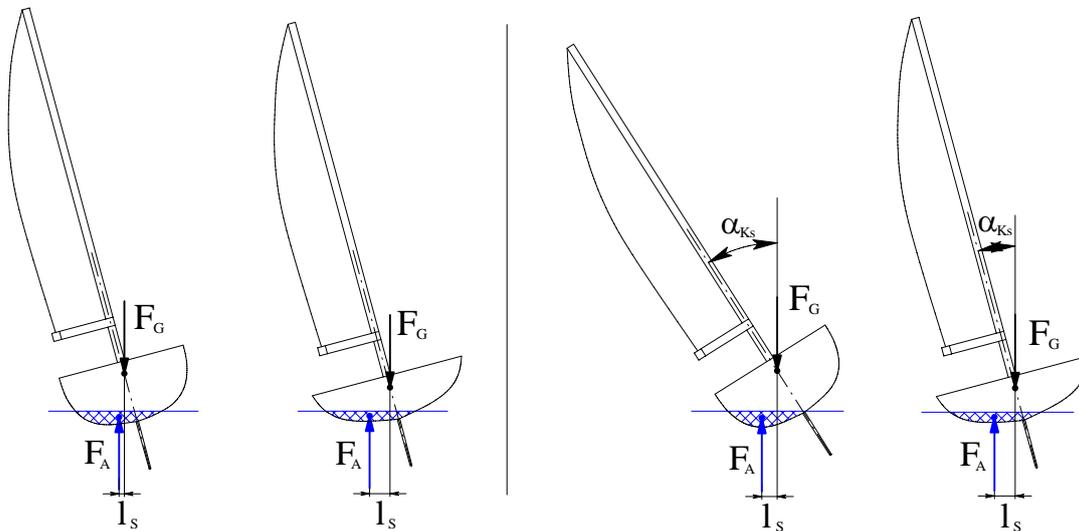


Abbildung 43: Unterschiedliche Stabilität abhängig von der Rumpfform bei gleicher Krängung (links) und unterschiedlicher statischer Kenterwinkel abhängig von der Rumpfform (rechts)

☼ **Lage des Schwerpunkts:** Je tiefer der Gewichtsschwerpunkt liegt, desto größer ist das aufrichtende Moment (siehe links in Abbildung 45). Aus diesem Grund werden Frachter so beladen, dass der Schwerpunkt der Ladung möglichst tief liegt. Auch eine Verlegung des Gewichtsschwerpunkts nach Luv erhöht den Hebelarm und damit das aufrichtende Moment. Bei Schwertbooten macht das Mannschaftsgewicht häufig den größten Teil des gesamten Bootsgewichts aus. Durch die Verlagerung des Mannschaftsgewichts nach Luv kann der Schwerpunkt der Summe der Gewichtskräfte von Boot und

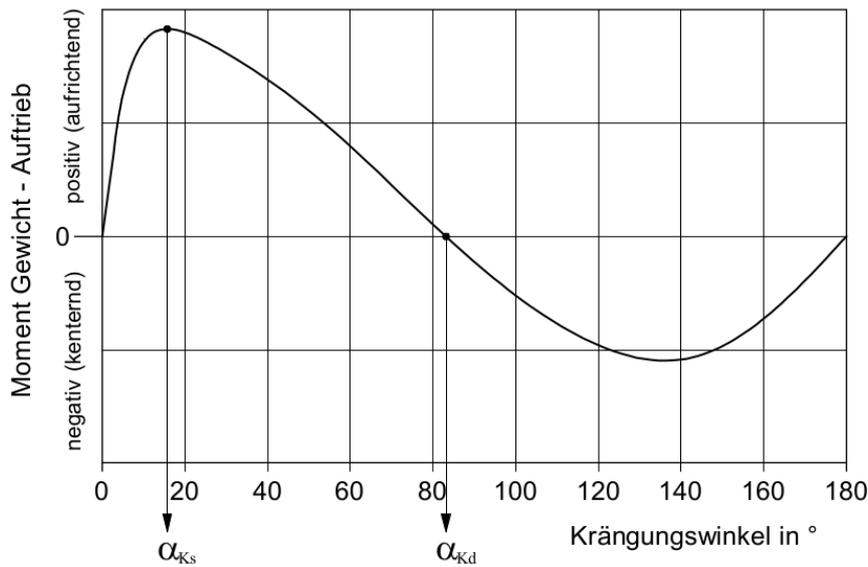


Abbildung 44: Stabilitätsdiagramm eines Katamarans

Mannschaft  $F_{G+M}$  nach Luv verschoben und der Hebelarm vergrößert werden (siehe rechts in Abbildung 45). Dieses „Hinauslehnen“ über die Bordkante zur Vergrößerung des aufrichtenden Moments wird ausreiten genannt.

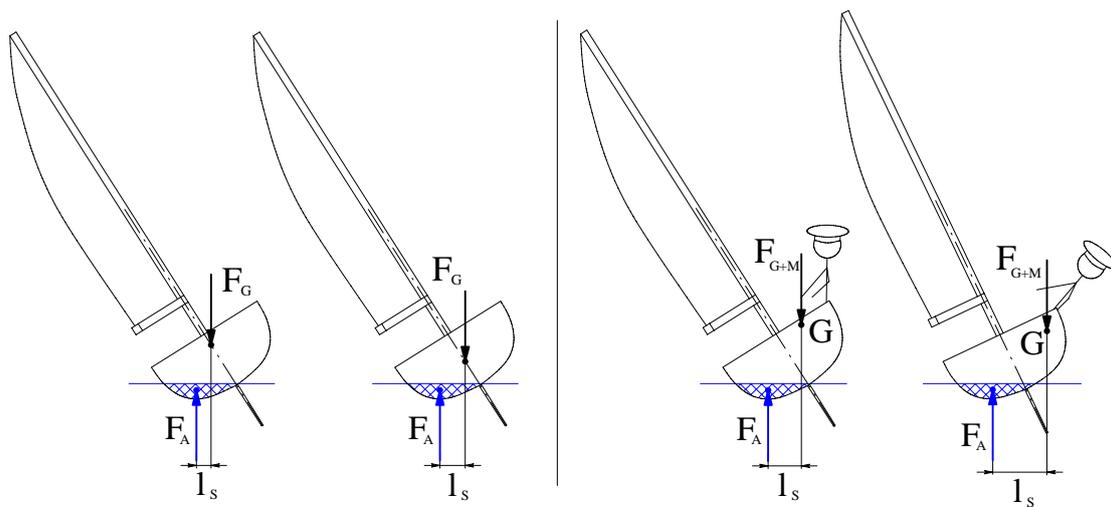


Abbildung 45: Höhere Stabilität durch tiefere Lage des Gewichtsschwerpunkts (links) und Erhöhung der Stabilität durch ausreiten (rechts)

Ist das aufrichtende Moment durch die Stabilität des Bootes gleich groß wie das Moment erzeugt durch das Kräftepaar Querkraft und Widerstand gegen den Lateralplan, segelt das Boot mit konstanter Krängung. Bei zunehmendem Wind wird auch die Querkraft und damit die Krängung mehr. Wenn durch das Mannschaftsgewicht das Momentengleichgewicht nicht mehr erzeugt werden kann, kentern Schwertboote. REIN formstabile, also kenterbare, Boote müssen so konstruiert sein, dass sie im Falle einer Kenterung nicht sinken. Hierfür dienen wasserdichte Auftriebskörper im bzw. am Rumpf.

### 3.3 Gewichtsstabilität

Im Gegensatz zum Schwert dient der umgangssprachliche Kiel (gemeint ist die Kielflosse eines Gewichtskiels) nicht nur als Widerstand gegen die Abdrift, er macht einen großen Teil der gesamten Bootsmasse aus.

Durch einen schweren Kiel wandert der Gewichtsschwerpunkt des Bootes nach unten, bei sehr sportlichen Jachten sogar unter den Auftriebsschwerpunkt. Dies ist der Spezialfall der Gewichtsstabilität in der Nautik. Befindet sich der Gewichtsschwerpunkt sehr tief in Bezug auf die Jacht, wandert auch bei großer Krängung die Gewichtskraft ins Lee des Auftriebsschwerpunkt. Der Hebelarm, und damit das aufrichtende Moment, ist auch bei einer Krängung von  $90^\circ$  noch positiv (aufrichtend). Gewichtsstabile Boote (Kielboote) gelten als unkenterbar - zumindest alleine durch den Wind. Sie sind daher nicht mit wasserdichten Auftriebskörper ausgestattet und sinken in der Regel nach erfolgter Kenterung. Das Stabilitätsdiagramm in Abbildung 44 zeigt die Momenten- bzw. Hebelarmkurve einer ranken Jacht (durchgezogene Linien) und einer Jacht deren Gewichtsschwerpunkt unter dem Auftriebsschwerpunkt liegt (strichlierte Linien).

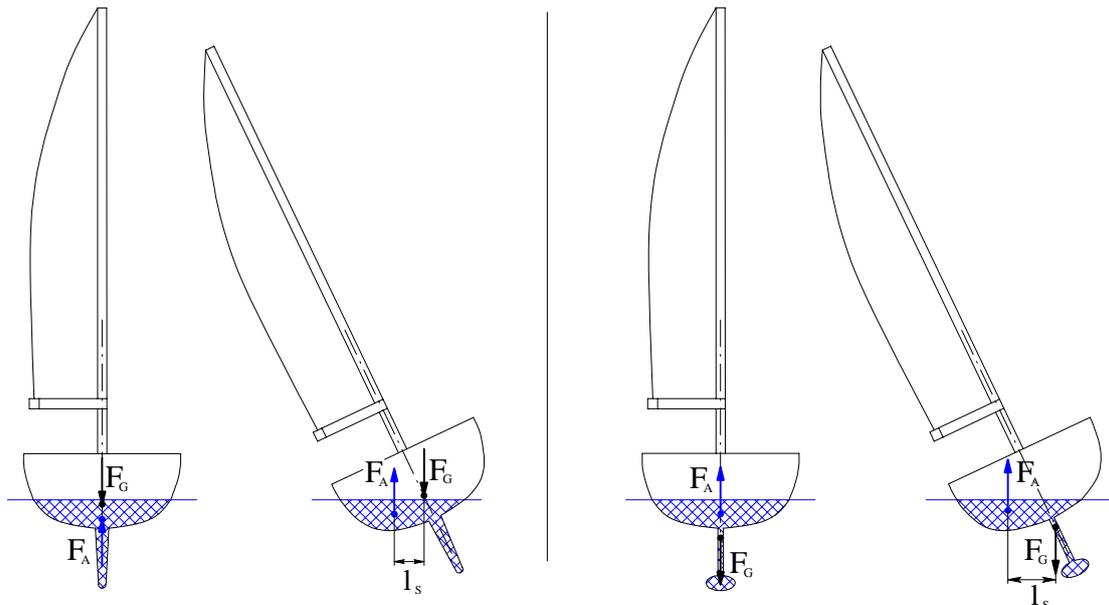


Abbildung 46: Gewichtsstabilität einer ranken Jacht (links) und einer sehr sportlichen Jacht (rechts)

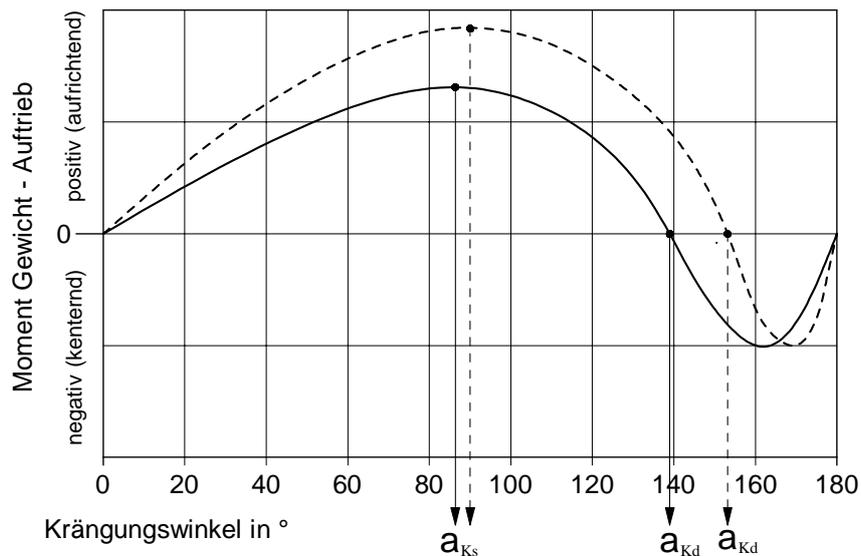


Abbildung 47: Stabilitätsdiagramm eines gewichtsstabilen ranken Bootes (durchgezogene Linien) und einer gewichtsstabilen sehr sportlichen Jacht (strichlierte Linien)

### 3.4 Metazentrum

Das Metazentrum ist ein wesentliches Konstruktionsmerkmal im Schiffsbau. Man unterscheidet zwischen scheinbarem und wahrem Metazentrum, wobei ersteres anschaulicher dessen Wesen darstellt, die Lage des zweiten aber das tatsächlich wesentliche Kriterium für den Schiffsbau ist.

Das scheinbare Metazentrum befindet sich im Schnittpunkt zwischen Wirkungslinie der Auftriebskraft und der Mittschiffsebene. Die Distanz zwischen Gewichtsschwerpunkt und Metazentrum ergibt die metazentrische Höhe, die ein Maß für die Stabilität des Bootes ist. Die Position des wahren Metazentrums, eigentlich der wahren metazentrischen Höhe  $h_M$ , berechnet sich aus der Addition der Strecke zwischen Kiel  $K$  und Auftriebsschwerpunkt  $A$  und dem Flächenträgheitsmoment der Schnittfläche zwischen Wasseroberfläche und Bootsrumpf um die Längsachse  $I_x$  dividiert durch das Volumen des verdrängten Wassers  $V_W$ .

$$h_M = \overline{KA} + \frac{I_x}{A} \quad (13)$$

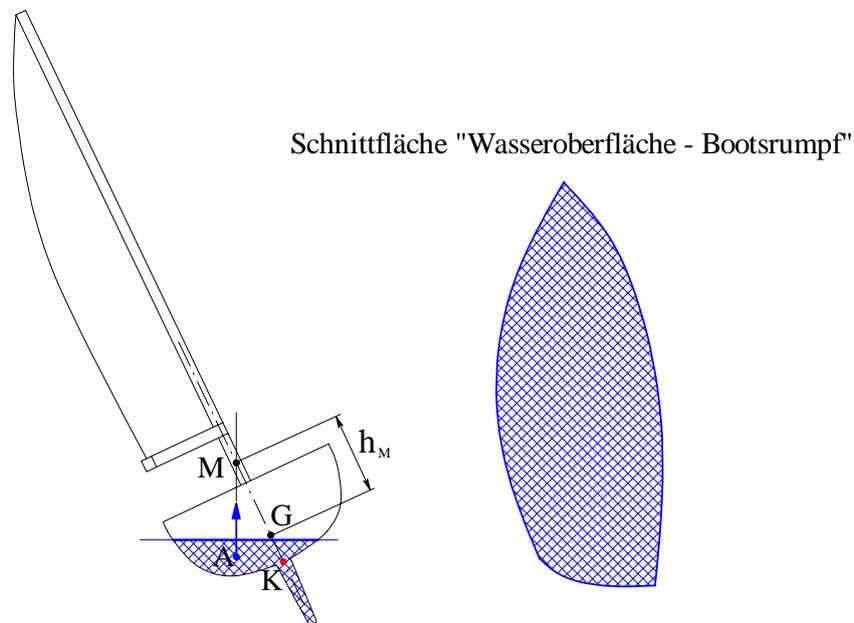


Abbildung 48: Scheinbares Metazentrum und metazentrische Höhe (links) und Schnittfläche aus Wasseroberfläche und Bootsrumpf (links)

## Anhang

### A Herleitung der qualitativen Aussagen an gekrümmten Stromlinien

Der Druck  $p$  ist eine flächenspezifische Kraft, eine Druckdifferenz multipliziert mit einer Fläche  $A$  entspricht also einer Kräfteffferenz, die die Beschleunigung einer Masse bewirken kann.

$$p = \frac{F}{A} \quad (14)$$

**Beschleunigung in Bewegungsrichtung** Es soll nun ein „Luftwürfel“ (dies gilt natürlich ebenso für das Medium Wasser) betrachtet werden, der sich, getrieben von einer Druckdifferenz, entlang einer gekrümmten Bahn bewegt (siehe Abbildung 49).

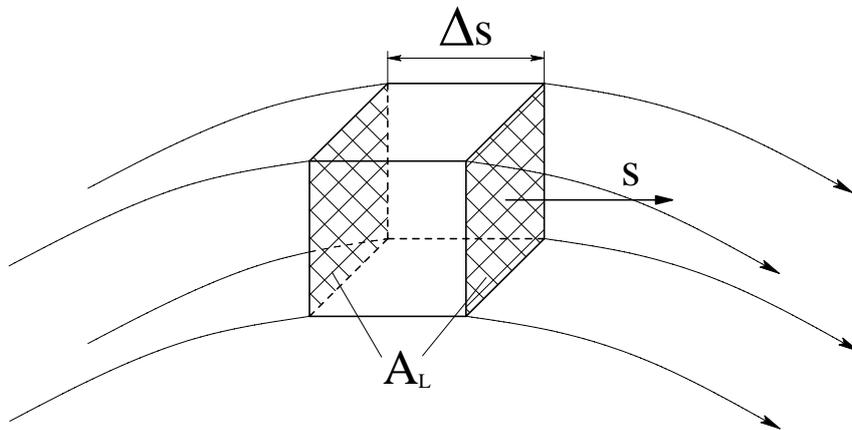


Abbildung 49: Kräftebilanz am Luftwürfel in Tangentialrichtung

Die Geschwindigkeit und Beschleunigung in tangentialer Richtung ist durch die Wegkoordinate  $s$  dargestellt. Mit der Kantenlänge  $\Delta s$  des Würfels ergibt sich dessen Masse  $\Delta m$ .

$$\Delta m = A_L \Delta s \rho_L \quad (15)$$

Damit der Luftwürfel, wie angedeutet, nach rechts beschleunigt, muss der Druck an der linken Seitenfläche ( $p_l$ ) größer sein, als an der rechten ( $p_r$ ). Nach dem dritten Newtonschen Gesetz muss nun die Kraft die durch die Druckdifferenz hervorgerufen wird, gleich groß sein wie die Kraft die am Luftwürfel wirkt - diese Kraft beschleunigt den Luftwürfel mit der Beschleunigung  $\ddot{s}$  entlang der Koordinate  $s$ . Einsetzen von (15) in (16) ergibt (17).

$$\Delta m \ddot{s} = A_L (p_l - p_r) \quad (16)$$

$$\Delta s \rho_L \ddot{s} = p_l - p_r \quad (17)$$

Mit dem Übergang zu differentiellen Größen ( $\Delta \rightarrow d$ ) kann der gegen die rechte Seite wirkende Druck  $p_r$  als Druckänderung zu  $p_l$  mit dem Druckgradienten  $\frac{\partial p}{\partial s}$  beschrieben werden. In einem weiteren Schritt wird die Beschleunigung  $\ddot{s}$  durch die Ableitung der Geschwindigkeit in  $s$ -Richtung  $v_s$  nach der Zeit  $t$  ersetzt.

$$ds \rho_L \ddot{s} = p_l - \left( p_l + \frac{\partial p}{\partial s} \Delta s \right) = -\frac{\partial p}{\partial s} ds \quad (18)$$

$$\rho_L \frac{dv_s}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial s} \quad (19)$$

Auf der rechten Seite von (19) ist der Druck partiell nach der Wegkoordinate  $s$  abgeleitet, weil der Druck sich in jede andere Richtung ja ebenfalls ändern kann. Da in dieser Betrachtung ausschließlich die Geschwindigkeit  $v_s$  entlang der  $s$ -Koordinatenrichtung von Interesse ist, ist auch nur die Druckänderung in  $s$ -Richtung relevant. Druckänderungen in andere Raumrichtungen werden ignoriert - das partielle Differential kann durch das totale Differential ersetzt und (19) kann umgestellt werden.

$$\rho_L \frac{dv_s}{dt} = -\frac{dp}{ds} \quad \rightarrow \quad \rho_L \frac{ds}{dt} dv_s = -dp \quad (20)$$

(20) kann nun integriert werden, um statt der Änderungen, die absoluten Differenzen der Größen zu erhalten.

$$\rho_L \int_1^2 \frac{ds}{dt} dv_s = - \int_1^2 dp \quad (21)$$

$$\rho_L \int_1^2 v_s dv_s = - \int_1^2 dp \quad (22)$$

$$\rho_L \left( \frac{v_{s2}^2}{2} - \frac{v_{s1}^2}{2} \right) = p_1 - p_2 \quad (23)$$

Der so erhaltene Zusammenhang ist bekannt als Prinzip von Bernoulli. Es besagt, dass die Luft beschleunigt wird, wenn der Druck abnimmt bzw. dass die Luft verzögert wird, wenn der Druck steigt, es beschreibt also den Zusammenhang von Druck und Geschwindigkeit in druckgetriebenen Strömungen. Ganz allgemein geschrieben gilt

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = const. \quad (24)$$

(24) entspricht der klassischen Schreibweise des Bernoullischen Prinzips, vereinfacht besagt es:

*„Eine Änderung des Drucks bewirkt eine indirekt proportionale Änderung der Geschwindigkeit.“*

Oder etwas anschaulicher:

*„Steigt (sinkt) der Druck, wird ein strömendes Fluid verzögert (beschleunigt).“*

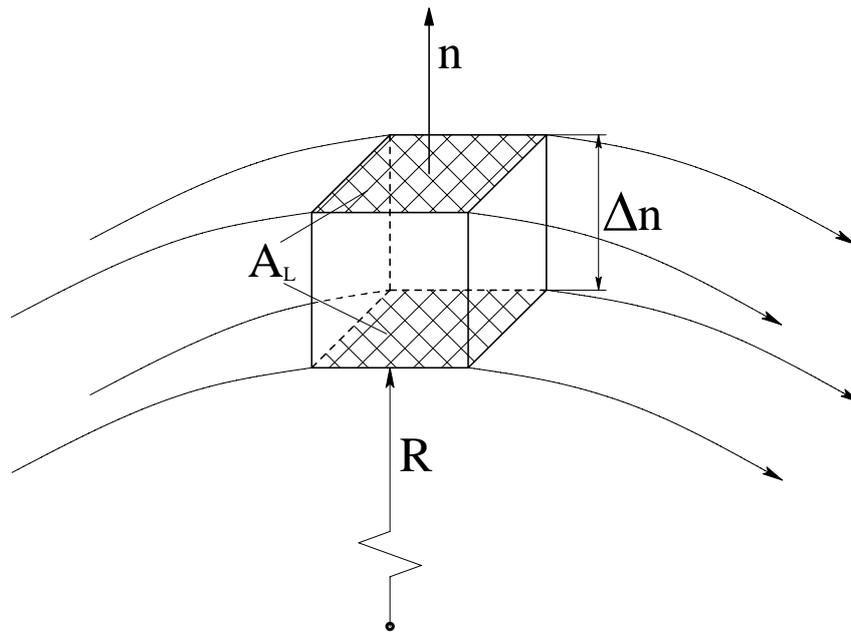


Abbildung 50: Kräftebilanz am Luftwürfel in Radialrichtung

**Beschleunigung normal zur Bewegungsrichtung** Auf der gekrümmten Bahn wird der Luftwürfel nicht nur in  $s$ -Richtung beschleunigt, sondern auch normal dazu, in  $n$ -Richtung.

Laut zweitem Newtonschem Gesetz wird ein Körper, auf den eine Kraft wirkt, immer in Richtung der Kraft beschleunigt. Der Druck auf der Oberseite des Luftwürfels, dargestellt in Abbildung 50, muss also höher sein, als auf der Unterseite. Analog zu (18) kann die Kräftebilanz in  $n$ -Richtung aufgestellt werden, wobei  $\ddot{n}$  die Beschleunigung und  $\frac{\partial p}{\partial n}$  den Druckgradient in  $n$ -Richtung darstellen.

$$\Delta n \rho_L \ddot{n} = - \frac{\partial p}{\partial n} \Delta n \quad (25)$$

Der Luftwürfel erfährt eine (Zentripetal-)Beschleunigung zum Krümmungsmittelpunkt hin, also in negativer  $n$ -Richtung. Die Zentripetalbeschleunigung kann beschrieben werden durch die Tangentialgeschwindigkeit  $v_s$  und den Krümmungsradius  $R$  der Bahn. (26) in (25) eingesetzt ergibt (27).

$$\ddot{n} = - \frac{v_s^2}{R} \quad (26)$$

$$\rho_L \frac{v_s^2}{R} = \frac{\partial p}{\partial n} \quad (27)$$

Der Druckgradient in  $n$ -Richtung ist nicht nur von Größen entlang der  $n$ -Koordinate abhängig, die partielle Ableitung kann nicht durch die totale ersetzt und (27) nicht mehr ohne weiteres integriert werden. Dennoch stellt sie einen qualitativen Zusammenhang zwischen dem radialen Druckverlauf von Strömungen auf gekrümmten Bahnen her:

1. Der Druck auf den Außenbahnen ist höher als auf den Innenbahnen.
2. Je höher die Geschwindigkeit der Luft und je kleiner der Krümmungsradius (also je „enger die Kurve“), desto größer ist die Druckdifferenz zwischen der Strömung auf den Außenbahnen und der Strömung auf den Innenbahnen.

Wie ein Ball an einer Schnur der nach außen strebt, wenn er in Rotation versetzt wird, streben die Luftmoleküle nach außen, wenn sie einer gekrümmten Bahn entlang strömen. Dadurch stoßen sie gegen die äußeren Moleküle und erhöhen den Druck. Anhand der Form der Stromlinien kann also auf die Druckverteilung in der Strömung geschlossen werden.

## B Umwandelbarkeit von Energie

Gemäß (5) bleibt die Druckenergie eines Fluids dieselbe, wenn der Druck halbiert und das Volumen verdoppelt wird. Der Teil der Energie, der in andere Formen umgewandelt werden kann, verringert sich jedoch mit abnehmendem Druck: Im Grenzfall ist der Druck derselbe, wie der der Umgebung; bei wesentlich größerem Volumen und gleicher Druckenergie wird dennoch kein Windhauch entstehen. Je nach Zustand bei dem die Energie gespeichert ist, kann mehr oder weniger von dieser in andere Formen umgewandelt werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird der Teil der enthaltenen Energie, der für weitere Umwandlungen zur Verfügung steht, als Exergie bezeichnet. Der Teil, der nicht in andere Energieformen überführt werden kann, wird Anergie genannt. Eng verbunden mit diesen Definitionen ist die Zustandsgröße Entropie mit deren Zunahme die Umwandlung von Exergie in Anergie beschrieben wird.

In jedem realen System in dem sich Körper oder Fluide relativ zueinander bewegen, tritt Reibung auf (Windmoleküle streichen über die Wasseroberfläche (Wellenbildung) oder über das Segel). Bei der Überwindung der Reibungskräfte wird ein Teil der kinetischen bzw. Druckenergie in nicht reversible Wärme umgewandelt - dies äußert sich in Druckverlusten, die eine Umwandlung von Exergie in Anergie bedingen. Obwohl die Energie im Fluid nicht abnimmt, sinkt dessen Umwandelbarkeit und damit dessen Arbeitsfähigkeit. Im Satz vom Bernoulli werden daher häufig nur Energien betrachtet, die zumindest teilweise umgewandelt werden können, also einen exergetischen Anteil besitzen.

## C Berechnete Stromlinienverläufe für eine Sluptakelung auf Hart-am-Wind-Kurs

Der Segelsatz aus Abbildung 28 ist in den folgenden Abbildungen aus der Vogelperspektive und aus Lee bzw. Steuerbord achtern dargestellt. Die Stromlinienverläufe wurden mit einem Simulationsprogramm für eine Anströmgeschwindigkeit von knapp 10 kn (5 m/s) berechnet und sind für sechs unterschiedliche Höhen dargestellt. In den Abbildungen aus der Vogelperspektive kommt der Wind von rechts.

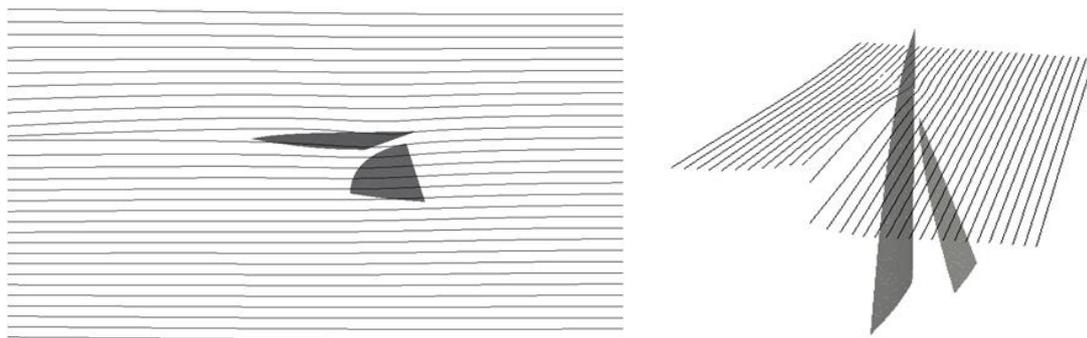


Abbildung 51: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 5.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

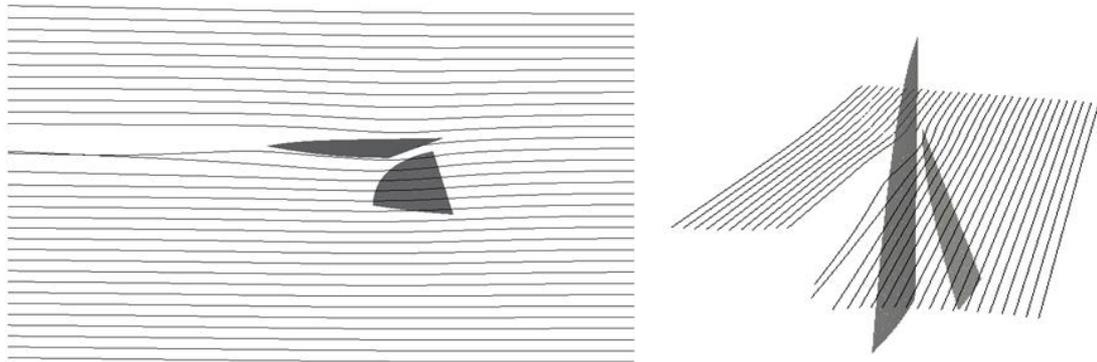


Abbildung 52: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 4.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

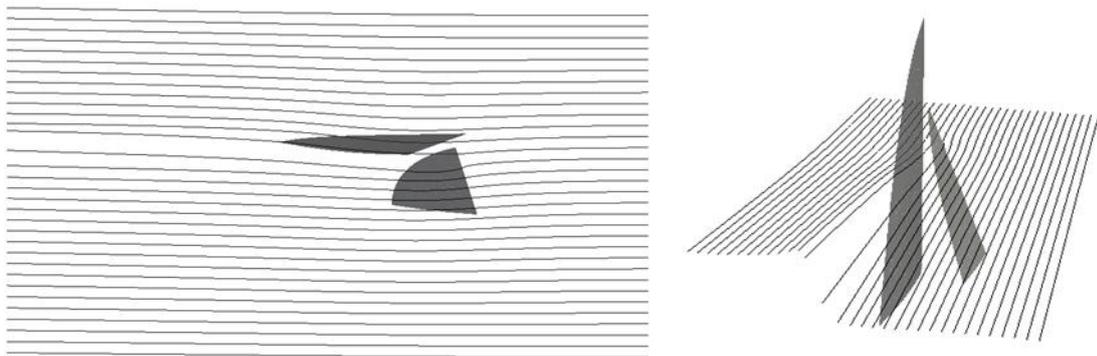


Abbildung 53: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 3.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

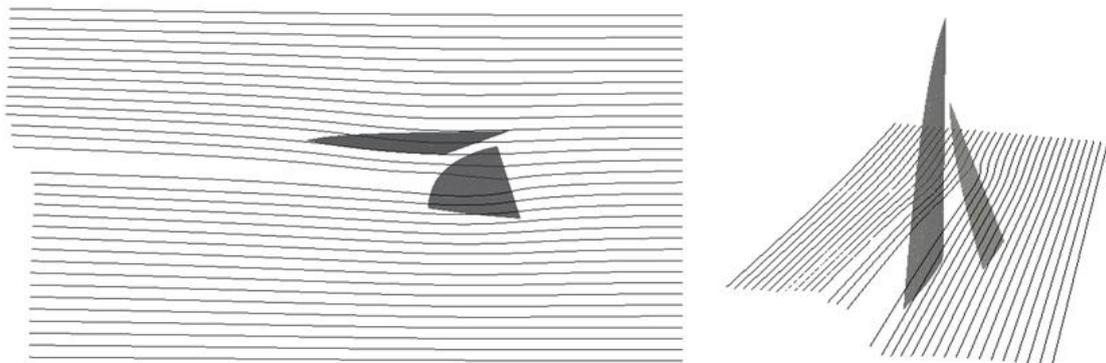


Abbildung 54: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 2.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

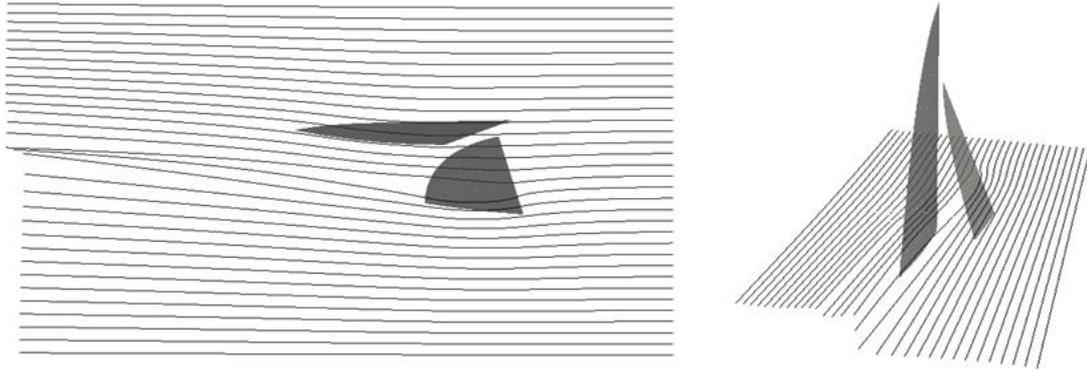


Abbildung 55: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 1.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

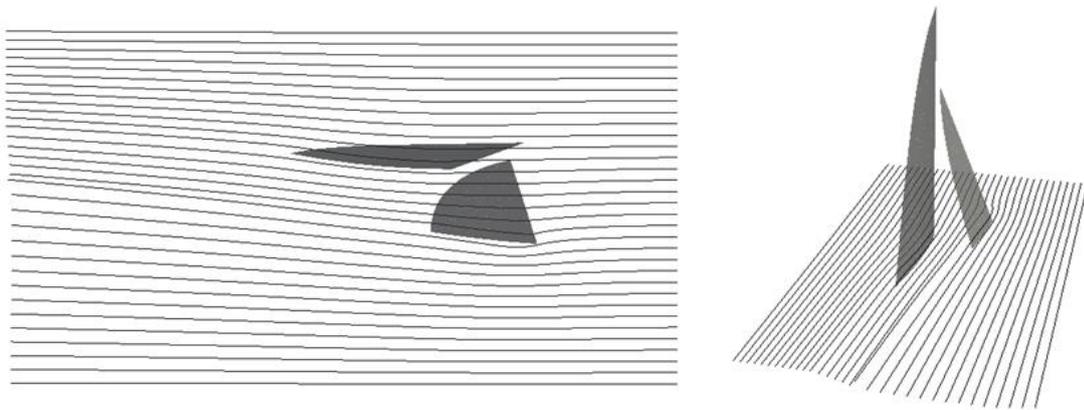


Abbildung 56: Stromlinienverläufe in einer Höhe von 0.5 m für ein slupgetakeltes Boot auf Hart-am-Wind-Kurs

## D Abschätzung von $F_A/F_W$ auf einem Hart-am-Wind-Kurs

Zur Abschätzung des Verhältnisses zwischen den erzeugten Auftriebskräften und Widerstandskräften am Segel auf einem Hart-am-Wind-Kurs sollen eine Anströmung parallel zur Vorliek und eine Abströmung parallel zum Achterliek angenommen werden. Der Winkel  $\alpha$  zwischen den Tangenten an das Vorliek und das Unterliek entspricht der Richtungsänderung der Luftmasse. Die Windgeschwindigkeit wird näherungsweise als konstant angenommen ( $v_1 = v_2 = v$ ). Das Verhältnis der Geschwindigkeitsänderungen quer zur ursprünglichen Anströmungsrichtung  $\Delta v_A$  und parallel dazu  $\Delta v_W$  entspricht dem Kräfteverhältnis von Auftriebskraft zur Widerstandskraft.

$$\frac{\Delta v_A}{\Delta v_W} = \frac{F_A}{F_W} \quad (28)$$

Die Geschwindigkeitsänderungen quer zur ursprünglichen Anströmungsrichtung  $\Delta v_A$  und parallel dazu  $\Delta v_W$  können unter den getroffenen Vereinfachungen mit dem Winkel  $\alpha$  berechnet werden.

$$\Delta v_A = v \sin \alpha \quad (29)$$

$$\Delta v_W = v (1 - \cos \alpha) \quad (30)$$

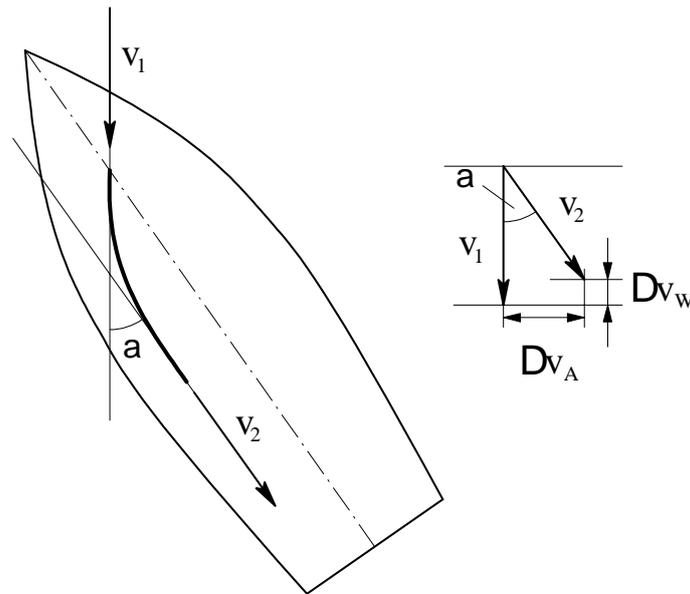


Abbildung 57: Idealisierte An- und Abströmung am Segel auf Hart-am-Wind-Kurs

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_A &= v \sin \alpha \\ \Delta v_W &= v (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \right\} \frac{\Delta v_A}{\Delta v_W} = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{F_A}{F_W} \quad (31)$$

Dieser einfache geometrische Zusammenhang ist im folgenden Diagramm dargestellt. Auf Hart-am-Wind-Kursen beträgt die erzeugte Auftriebskraft ein Vielfaches von der Widerstandskraft.

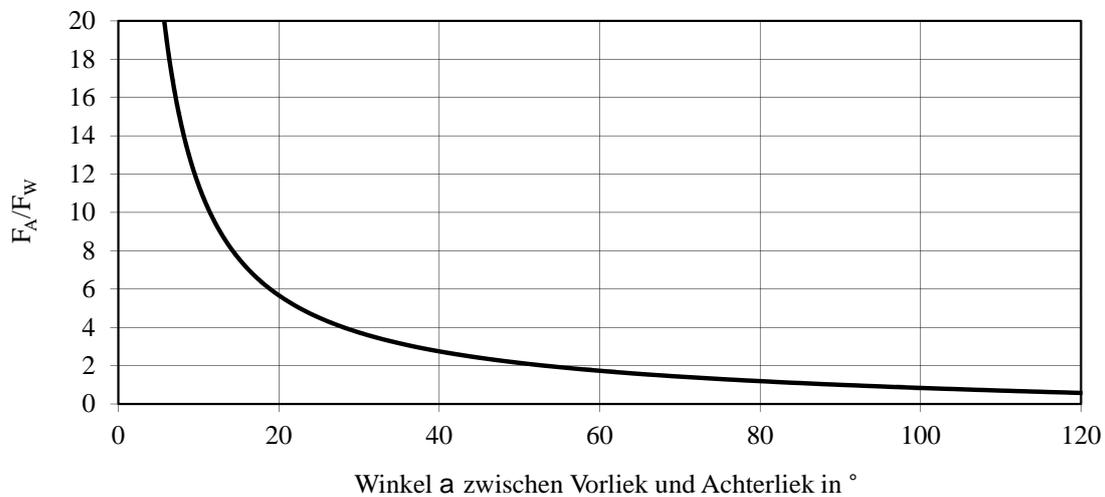


Abbildung 58: Verhältnis von Auftriebs- und Widerstandskräften als Funktion des Winkels alpha zwischen Vorliek und Achterliek

## Literatur

Püschl W 2012 *Die Physik des Segelns*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (ISBN 978-3-527-41106-1)

Whidden T, Levitt M 1992 *Das Segel*. Delius Klasing & Co, Bielefeld (ISBN 3-7688-0766-5)

Dedekam I 2001 *Sail & Rig Tuning*. Fernhurst Books, Arundel (ISBN 1 898660 67 0)

Scharping HD 1994 *Konstruktion und Bau von Yachten*. Delius Klasing & Co, Bielefeld (ISBN 3-7688-0781-9)