ALBERT-EINSTEIN-GYMNASIUM
Knabenburg 2
31785 Hameln

Facharbeit

im Leistungskurs Physik

Thema: Die Entstehung der Vortriebskraft beim Segelschiff – Zusammenhänge von Windrichtung, Segelstellung und Segelform theoretisch und am Experiment

Verfasser: Martin Möller

Fachlehrer: Herr Becker

ALBERT-EINSTEIN-GYMNASIUM
Knabenburg 2
31785 Hameln

Facharbeit

Leistungskurs Physik **Schuljahr 2001/2002**

Thema: Die Entstehung der Vortriebskraft beim Segelschiff – Zusammenhänge von Windrichtung, Segelstellung und Segelform theoretisch und am Experiment

Verfasser:	Martin Möller
Fachlehrer:	Herr Becker
Ausgabetermin:	9. Januar 2002
Abgabetermin:	21. Februar 2002

Unterschrift des Verfassers: _____

Bewertung der Facharbeit: ____ Punkte Hameln, den ____ . ___ . 2002

Unterschrift des Fachlehrers: _____

Inhaltsverzeichnis

Übersicht **1**

Theorie – Literaturrecherche **1**

Einführung 1

Kurse zum Wind – Unterschiedliche Entstehung des Vortriebs 2

Vor dem Wind 2

Halber Wind 3

Raumschots 4

Am Wind 5

Die Stärke des Vortriebs auf den Kursen 7

Segelformen 8

Groß- und Vorsegel und ihr Zusammenwirken 8

Segeltrimm 8

Spezielle Segelformen: Rahsegel und Spinnaker 9

Praxis **11**

Ziele des Versuchs 11

Versuchsaufbau 11

Zeichnung 11

Beschreibung 12

Durchführung 12

Auswertung – Literatur 12

Verbesserungsvorschläge 14

Literatur **16**

Versicherung/Einverständniserklärung **17**

Übersicht

Die von mir geschriebene Facharbeit beschäftigt sich mit der Entstehung des Vortriebs beim Segeln. Sie ist in zwei Hauptteile gegliedert – Theorie und Praxis. Im Theorieteil schildere ich nach einer kurzen Einführung die Vortriebsentstehung an einem Segel, wie ich sie in der Literatur (s. Literaturverzeichnis) fand. Ein weiterer Abschnitt widmet sich der Segelform. Im Mittelpunkt des praktischen Teils steht ein von mir durchgeführter Versuch zum Thema. Es folgt eine Auswertung mit Bezug zum Theorieteil.

Theorie – Literaturrecherche

Einführung

Das Segelschiff zählt zu den ältesten Fortbewegungsmitteln des Menschen. Da es sich dadurch auszeichnet, eine hohe Last über große Strecken transportieren zu können, wurde es schon früh dazu benutzt, Fracht über Meere und Ozeane zu bringen. Nach einem großen Boom im Zeitalter der Industrialisierung wurden diese Schiffe, meist *Klipper*[1], die zwischen Europa und Süd- oder Nordamerika verkehrten, etwa um die 1950er Jahre von motorgetriebenen Frachtern verdrängt. Mittlerweile wird Segeln fast nur noch als sportlicher Wettkampf in *Regatten*[2] oder als Vergnügung betrieben.

Doch wer weiß, vielleicht kommen wegen des begrenzten Ölvorrats und der daraus resultierenden Nachfrage nach Möglichkeiten der Fortbewegung mit Hilfe regenerativer Energie bald erneut goldene Zeiten für Großsegler auf, in denen die Reedereien wieder um die schnellste Ozeanüberquerung wetteifern?

Im Laufe der Zeit haben sich die Rumpfform und die *Takelage*, also der aus Masten, Segeln und Tauen bestehende Teil des Schiffes, der zur Erzeugung des Vortriebes dient, ständig weiterentwickelt. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts vertrauten die Schiffbauer dabei auf ihre Intuition. Mittlerweile haben aber auch im Schiffbau moderne Forschungsmethoden Einzug gehalten – mit erstaunlichen Ergebnissen: Spezielle Schiffe erreichen (nur von Segeln angetrieben!) Geschwindigkeiten von 80 km/h.

[1] schnelle, lange Schiffe; vor allem dazu benutzt, Rohstoffe aus Südamerika nach Europa zu bringen.

[2] Wettrennen für Segelschiffe, nach bestimmten Größen und Segelflächen in Klassen eingeteilt.

Kurse zum Wind – Unterschiedliche Entstehung des Vortriebs

Im Verhältnis zum Wind lässt sich die Fahrtrichtung eines Schiffes grob in 7 verschiedene Kurse einteilen, auf denen der Vortrieb immer auf etwas unterschiedliche Weise entsteht.

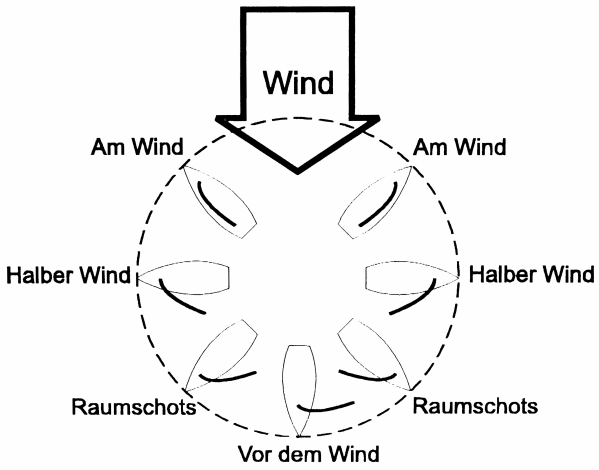


Abbildung 1: Die 7 Hauptrichtungen beim Segeln im Verhältnis zum Wind. Die Kurse „Am Wind“, „Halber Wind“ und „Raumschots“ kommen je zwei Mal spiegelbildlich vor.

Vor dem Wind

Der Vorwind-Kurs ist der, an dem man bei „segeln“ sofort denkt: Die Segel stehen genau rechtwinklig zum gefahrenen Kurs. Der Wind kommt für das Segelschiff genau von hinten, wodurch auch die Ursache für die Vorwärtsbewegung relativ zum Wasser leicht ersichtlich ist: Der Wind trifft auf das Schiff, und damit, natürlich insbesondere an den Segeln, auf einen Widerstand. Dieser Widerstand wird dadurch erzeugt, dass sich der Wind nicht mehr geradlinig in seiner ursprünglichen Richtung weiterbewegen kann sondern an den Segeln verwirbelt wird. Dadurch entsteht eine Kraft in Windrichtung, die das Segelschiff nach vorn treibt.

Halber Wind

Beim Segeln mit „halbem Wind“ fährt das Schiff in einem 90-Winkel zum Wind (genauer gesagt zum *wahren Wind*[3]). Das Segel (womit die Sehne des Segels, also die gedachte Linie, die nur die Vorder- und die Hinterkante berührt, gemeint ist), steht in einem Winkel von etwa 45 zum Wind. Dieser Winkel ist allerdings von der Form, besonders der Wölbung des Segels, abhängig.

Allgemein muss hier gesagt sein, dass es sehr schwierig ist, Literatur mit einer physikalisch exakten Erklärung zur Entstehung des Vortriebs zu finden. Das betrifft insbesondere den Vorwind-Kurs, aber auch den Kurs „mit halbem Wind “. Die Vielzahl der zum Thema Segeln erschienenen Bücher ist hauptsächlich praxisorientiert. Es ist meist ihr Anliegen, (hauptsächlich Hobby-)Seglern eine Anleitung zu geben und weniger, die physikalischen Vorgänge zu erläutern. So findet man in verschiedenen Büchern auch verschiedene, mir unterschiedlich zutreffend erscheinende Erklärungen. Wahrscheinlich entspricht eine Mischung daraus am ehesten der Wirklichkeit.

Am einfachsten und trotzdem am plausibelsten scheint mir die Erklärung Juan Baaders, der auch sonst das wissenschaftlichste der mir vorliegenden Bücher geschrieben hat [3], zu sein. Er reduziert das gewölbte Segel zunächst auf eine gerade Platte. Wenn man sich diese in einem 45°-Winkel in eine (Luft-)Strömung gehalten denkt, kann man sich vorstellen, wie der Vortrieb „auf halbem Wind“ zum Großteil entsteht. Die Platte wird nämlich vom Wind aufgrund ihres Windwiderstandes in eine Richtung gedrückt, ähnlich einem Segelschiff auf Vorwind-Kurs. Dass das Schiff nun aber nicht in diese Richtung fährt, hängt mit der Form des Bootsrumpfes zusammen: Ein langer Kiel verhindert, dass das Boot abgetrieben wird und sorgt dafür, dass tatsächlich der erwünschte Kurs rechtwinklig zum Wind gefahren wird. Allerdings ist es nicht ganz möglich, ein geringes Abkommen vom Kurs zu verhindern. Diese sogenannte *Abtrift* ist aber wiederum so groß dass sie bei der Navigation einberechnet werden muss, Juan Baader spricht von einem Winkel von etwa 4°.

Eine weitere den Vortrieb vergößernde Wirkung wird durch die Krümmung des Segels erzeugt. Zum Einen wird durch die Krümmung der Druck am Ende des Segels (in der Seglersprache

[3] Unterschied zwischen wahrem und scheinbarem Wind: Der Begriff „wahrer Wind“ beschreibt die tatsächliche Windrichtung, der scheinbare Wind ist der auf dem Schiff gefühlte. Aufgrund des Fahrtwindes ist der scheinbare Wind gegenüber dem wahren Wind leicht in Fahrtrichtung verschoben. Am größten ist der Unterscheid auf dem Amwind-Kurs, vor dem Wind unterscheiden sich scheinbarer und wahrer Wind nur durch die Geschwindigkeit.

Achterliek genannt) erhöht, was sich positiv auf den Vortrieb auswirkt. Ferner wird dem Wind durch die Krümmung eine andere Richtung gegeben. Er trifft die Spitze des Segels in seiner ursprünglichen Richtung und verlässt es in einem je nach Segelkrümmung um etwa 45° veränderten Winkel. So entsteht ein Rückstoß der die Geschwindigkeit des Schiffes noch etwas zu erhöhen vermag.

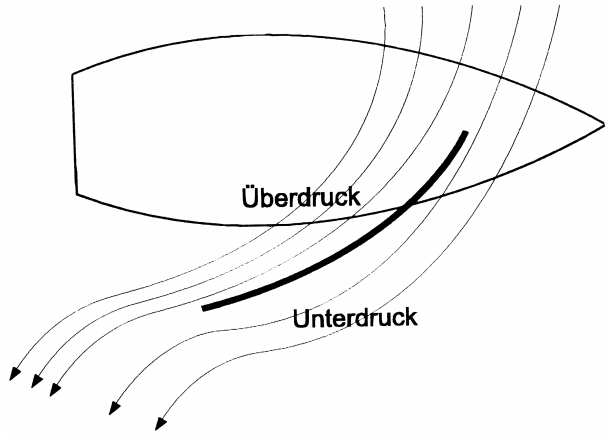


Abbildung 2: Die Entstehung des Vortriebs nach Baader mit eingezeichneten Stromlinien. An der *Luvseite* (dem Wind zugewandten Seite) sind die Stromlinien enger zusammen; es herrscht höherer Druck, wogegen an der *Leeseite* (der windabgewandten Seite) ein Unterdruck auftritt.

Raumschots

„Raumschots“ beschreibt einen Kurs von etwa 135° zum wahren Wind; er liegt also genau zwischen dem Vorwind- und dem Halbwind-Kurs. So verhält es sich auch mit dem Vortrieb: Er entsteht zum einen Teil durch das unter „Vorwind“ genannte Prinzip, wobei auch hier der Kiel dazu dient, das Schiff in die gewünschte Richtung zu steuern. Zum anderen, kleineren Teil wird der Vortrieb so wie mit halbem Wind erzeugt.

Mit sogenannten *Schnellseglern*[4], kleinen Jollen auf Gleitfahrt und auch Surfboards ist es laut [3] durch *kreuzen*[5] auf Raumschotkursen möglich, besdeutend schneller als der Wind zu segeln, was auf den ersten Blick paradox erscheint.

[4] beispielsweise Strandseglern und Eisyachten

[5] zickzackfahren

Am Wind

Der Amwindkurs verleiht dem Segelschiff eine seiner erstaunlichsten Fähigkeiten. Schließlich wird es so möglich, mit einem vom Wind angetriebenen Fortbewegungsmittel gegen diesen anzukommen. Da Segelschiffe nur mit einem Winkel von etwa 45° gegen den wahren Wind fahren können, muss ein Zickzack-Kurs gefahren werden (*kreuzen*), um ein direkt in Windrichtung gelegenes Ziel zu erreichen.

Abhängig von der Rumpfform können laut [4] auch Amwindkurse in Winkeln <45° gesegelt werden. Allerdings stellt sich dabei die Frage der Effizienz: Wobei es beim Kreuzen ankommt, ist die tatsächlich erreichte Geschwindigkeit gegen den Wind. Je höher ein Schiff an den Wind geht, desto geringer wird seine Fahrt, wofür es aber direkter gegen den Wind ankommt. Würde es dagegen *abfallen*[6], wäre es schneller. Das aber nur in der aktuellen Fahrtrichtung und nicht unbedingt „gegen den Wind“, wo das eigentliche Ziel liegt. Juan Baader schreibt in [4], S.50f., dass es mit Yachten mit guten Am-Wind-Eigenschaften vorteilhaft sei, möglichst hoch an den Wind zu gehen. „Gute Amwind-Eigenschaften einer Yacht“ sind ein Kiel, der möglichst wenig Abtrift zulässt und besonders auf Amwind-Kursen stark wirkende Segel.

Die Entstehung des Vortriebs „am Wind“ ist, da sie das komplizierteste und am wenigsten ersichtlichste Phänomen darstellt, auch von allen Kursen am meisten untersucht worden. Das hat aber nur sehr bedingt zu einem besseren Verständnis beigetragen.

Auf dem Amwind-Kurs kann die vortreibende Kraft logischerweise nicht so erzeugt werden, wie auf dem Vorwind-Kurs, da ja der Wind nicht in die zu fahrende Richtung weht. Also muss es eine andere Möglichkeit der Vortriebserzeugung geben. Es sei hier nur gesagt, dass die Wölbung des Segels eine wichtige Rolle einnimmt und dass deren Wirkung dem Auftrieb bei einer Flugzeugtragfläche sehr ähnlich ist. Nun finden sich dafür schon verschiedene Erklärungen, was für die Klärung der Verhältnisse bei einem Schiff nicht gerade zuträglich ist. Oft liest man für die Entstehung des Auftriebs an einer Flugzeugtragfläche die folgende Erklärung, hier aus [5]:

> Es gibt sie [die Tragflächen] in den unterschiedlichsten Bauformen; doch allen ist gemeinsam, dass sie Auftrieb erzeugen, indem sie die anströmende Luft, den sogenannten Fahrtwind, in zwei Komponenten aufteilen. Bei diesem Vorgang bleibt der Druck im Luftstrom auf der Flügelunterseite konstant - hier herrscht also der Umgebungsdruck. Die über die gewölbte Flügeloberseite strömende Luft dagegen wird beschleunigt, so dass hier der Druck nach dem Prinzip von Bernoulli sinken muss. Die Differenz zwischen dem relativ hohen Druck auf der

[6] mit dem Bug aus dem Wind herausfahren

Unterseite und dem relativ niedrigen Druck auf der Oberseite eines Tragflügels erzeugt eine Kraft, die man Auftrieb nennt.

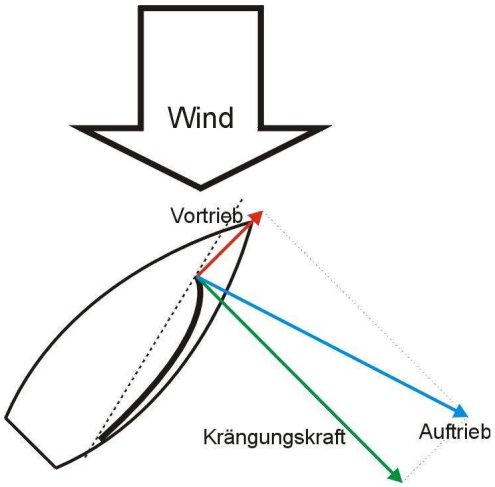


Abbildung 3: Die Aufteilung des am Segel entstehenden Auftriebs in Vortrieb und Krängung. Die eingezeichneten Pfeile sind von mir maßstabsgetreu nach von Juan Baader in [3] berechneten Werten gezeichnet. In Wirklichkeit ergibt sich an jedem Punkt des Segels eine Teilkraft, die zusammenfassende Kraft greift in der Zeichnung am Masten an.

Sehr ähnlich wird der Sachverhalt von Steve Sleight in [1], S.31, dargestellt. Der einzige Unterschied ist, dass Sleight den Sachverhalt auf ein gewölbtes Segel bezieht.
Andere Quellen stellen diese Theorie allerdings als falsch dar, was auch mir ersichtlich scheint. Schließlich ist bei dieser Erklärung kein Grund vorhanden, aus dem die Luft, die um die gewölbte Fläche strömt, beschleunigt wird.
Dazu geben [6] und [7] eine nähere Auskunft. Beide Quellen schreiben übereinstimmend, dass sich an einer Tragfläche beim Start eines Flugzeuges am hinteren Ende der Tragfläche ein Wirbel bildet – „wegen Verzögerung der Strömung und des damit verbundenen Druckanstiegs löst sich die Grenzschicht an der Hinterkante vom Flügel ab und wickelt sich zum Anfahrtwirbel auf“ [7], S. 582.
Da Wirbel aber immer nur paarweise auftreten könnten, müsse sich als Ausgleich ein entgegengesetzter Wirbel bilden. Dieser entsteht laut [6] und [7] auch, und zwar rund um die Tragfläche. Das sei nun die wahre Ursache für den Geschwindigkeitsunterschied der Luftmassen ober- und unterhalb der Tragflächen. Der Gleichung von Bernoulli zufolge entstehe nun wegen der höheren Geschwindigkeit über der Tragfläche dort ein Unterdruck, der bei einem

Flugzeug dieses nach oben saugen soll.

Ob dieses nun den Sachverhaltes wirklich einwandfrei darstellt, ist fraglich. Auf jeden Fall entsteht nun auch beim Segelschiff Auftrieb. Die Richtung, in die die Kraft wirkt, ist, wie bei einer Tragfläche rechtwinklig zur Sehne des Segels. Da das Segel in einem bestimmten Winkel zum Schiffsrumpf steht, lässt sich diese Kraft nun mit Hilfe eines Kräfetparallelogramms in die Komponenten **Vortrieb** und **Krängung** aufteilen (s. Abb. 3). Die Krängung ist die Kraft, die senkrecht zur Schiffsachse wirkt und das Segelschiff *krängt*, also „schräglegt". Dass sich dadurch die Angriffsfläche für den Wind verringert, erschwert eine exakte Berechnung zusätzlich.

Die Stärke des Vortriebs auf den Kursen

Der Vortrieb ist nicht auf allen Kursen gleich groß. Anfangs klingt es erstaunlich, dass ein Segel seine maximale Kraft nicht vor dem Wind erreicht, sondern in Wirklichkeit auf halbem Wind.

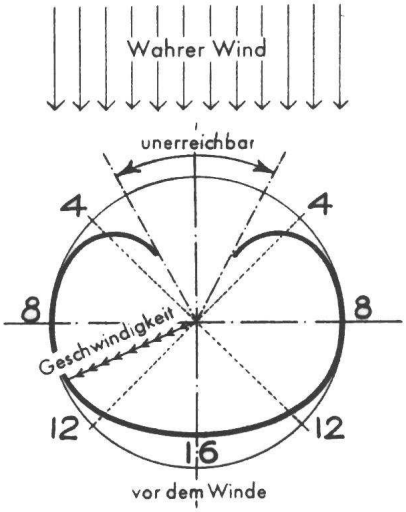


Abbildung 4: Die dicke Kurve stellt die erreichbare Geschwindigkeit einer Segelyacht gegen die Kurse aufgetragen dar. Im Kreismittlepunkt ist die Geschwindigkeit gleich null, sie nimmt nach außen zu. Der äußere Kreis zeigt die Maximalgeschwindigkeit, die auf halbem Wind erricht wird.

In [3], S.133 findet sich ein Diagramm, das die erreichbare Geschwindigkeit eines Drachenbootes[7] auf allen Kursen darstellt. Zwar ist Vortrieb nicht mit Geschwindigkeit gleichzusetzen,

[7] kleines, halb überdachtes Kielboot, Länge ü.a.: 8,90 m

aber der Zusammenhang ist sehr eng.

Segelformen

Groß- und Vorsegel und ihr Zusammenwirken

Die heute auf Fahrten- und Rennyachten bliche Form besteht meist aus einem Groß- und einem Vorsegel. Das Großsegel ist hinter dem Masten angebracht und wird an seiner Unterkante vom *Baum*, einer Stange, gehalten und in den Wind gestellt. Das Vorsegel befindet sich vor dem Masten und ist nur durch Seile gespannt.
Diese beiden Segel sind nicht nur so angebracht, um die Segelfläche und damit den Vortrieb und die Geschwindigkeit des Bootes zu erhöhen, sie können sich auch gegenseitig unterstützen. Das geschieht durch einen „Düse“ genannten Effekt, der von Steve Sleight [1] wie folgt dargestellt wird:
Die bei einer Überlappung zwischen den beiden Segeln hindurchströmende Luft wird, wenn der Zwischenraum kleiner wird, beschleunigt. Nach dem Gesetz von Bernoulli nimmt dadurch der Druck an der Außenseite des Großsegels ab, wodurch sich der Vortrieb vergrößert.
Allerdings scheint mir das nicht unbegrenzt möglich, da ja der Unterdruck auch auf die Rückseite des Vorsegels wirkt. Baader spricht auch mehr von einem Hinleiten der Luft vom Achterliek des Vorsegels zum Großsegel, wodurch dort die Luft beschleunigt und der Unterdruck vergrößert wird.

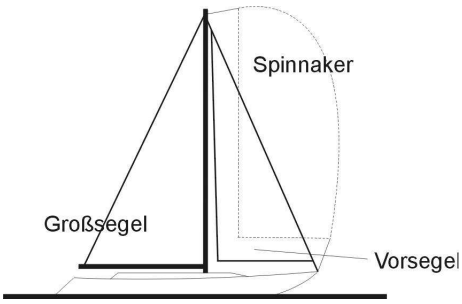


Abbildung 5: Die Besegelung einer typischen modernen Yacht.

Segeltrimm

Unter *Segeltrimm* versteht man das Beeinflussen der Form eines Segels mit Hilfe der auf einem Boot speziell dazu vorhandenen Vorrichtungen. Der Zweck ist es, einen höheren Vortrieb

und damit mehr Geschwindigkeit zu erreichen. Getrimmt wird meist durch Seile, möglich ist aber auch, eine andere Biegung des Masten zu erzeugen und vieles andere mehr. Um alle Möglichkeiten im Einzelnen vorzustellen ist hier kein Platz, es interessiert mehr, welche durch Trimm geschaffene Segelform zu welchem Zweck eingesetzt wird.
Am meisten zu beeinflussen ist die Wölbung des Segels. BAADER schreibt dazu in [3], S.84:

> Die Segelwölbung muss so gewählt werden, dass die Stromfäden über die ganze Segelbreite hin in gleichmäßiger Beschleunigung abgelenkt werden. Diese Ablenkung soll am Mast unmerklich, d.h. tangential beginnen und am Achterliek ihren größten Wert erreichen, wobei die Segelform dort aber niemals bis parallel zur Schiffsachse kommen darf.

Außerdem sei die Segelwölbung besonders günstig, wenn die größte Segeltiefe vom Vorliek aus gemessen bei 2/5 der Sehnenlänge des Segels liegt. Ihre Stärke muss nach zwei Faktoren gewählt werden: Sie hängt von der Windstärke und vom gefahrenen Kurs ab.
Für die Windstärke gilt: Je stärker der Wind, desto flacher ist das Segel zu halten, und natürlich umgekehrt. In Bezug auf den Kurs muss dem Segel vor dem Wind die größte Wölbung gegeben werden, mit zunehmender Höhe am Wind soll es flacher getrimmt werden, so die in der Literatur zu findende Empfehlung. Damit ein Segler erkennt, wenn er die richtige Segelwölbung und -stellung erzielt hat, sind an einem Segel häufig kleine Windfäden angebracht. Bei dieser nützlichen Vorrichtung handelt es um kurze Bänder, von denen mehrere auf beiden Seiten am Vor- und am Achterliek, manchmal auch in der Segelmitte, angenäht sind. Sie können sich frei bewegen und zeigen die gerade vorherrschende Luftströmung an. Optimaler Trimm herrscht, wenn alle Fäden waagerecht anliegen.

Spezielle Segelformen: Rahsegel und Spinnaker

Für das Segeln vor dem Wind haben sich zwei spezielle Segelformen entwickelt: Zum Einen das *Rahsegel*. Es ist an sich das ursprünglichste Segel. Dieses hängt unter einer Holzstange („*Rah*“, daher der Name), die an ihrer Mitte am Masten befestigt ist. Von ihren Enden und den unteren Ecken des Segels gehen Seile zum Deck, mit deren Hilfe das Segel in den Wind gestellt und dort gehalten wird. Meist sind mehrere Rahen an einem Masten aufgehängt.
Rahsegel haben aber zwei entscheidende Nachteile. Zum Einen wird eine große Mannschaft benötigt, um die Segel zu setzen und zu bergen, was eine gefährliche und anstrengende Arbeit ist; die Matrosen müssen immer hoch in die Masten und dann an den Rahen entlangklettern (und das bei Wind und Wetter, in 20 m Höhe auf einem schwankenden Schiff). Zum Anderen

aber ist mit dieser Segelform nur ein begrenzter Winkel von Kursen in der Nähe des Vorwind-Kurses möglich, es kann nicht am Wind gesegelt werden. Das liegt daran, dass die vordere Kante mit Hilfe des nach hinten und unten gehenden Seils nicht in den Wind gestellt werden kann. Wenn mit Rahsegeln zu hoch am Wind gesegelt wird, fangen diese an zu *killen*[8].
Das andere Segel, was nur auf Vorwind- und Raumschotkursen Verwendung findet, ist der *Spinnaker*. Es handelt sich dabei um ein sehr bauchiges Segel in dreieckiger Form. Die obere Ecke wird am Masten hochgezogen, die andere über ein Seil mit dem Schiffsrumpf verbunden. Die dritte Ecke schließlich wird, bei Raumschotskursen auf der Luvseite, mit einem *Spinnakerbaum* am Masten festgemacht.

Abbildung 6: Eine Yacht auf dem „Volvo Ocean Race“ mit gesetztem Spinnaker. Der Spinnakerbaum ist hier auf der *Backbord*-Seite, also in Fahrtrichtung links, zu sehen. Quelle: http://www.volvooceanrace.org.

Vor dem Wind soll ein Spinnaker möglichst gewölbt sein. Die optimale Spinnakerform wäre eine Halbkugel, da diese den größten Luftwiderstandskoeffizienten überhaupt liefert. Allerdings muss hier auf anderen Kursen ein Kompromiss eingegangen werden, da dort die Luft auf der Leeseite aus dem Segel herausfließt. Eine zu starke Wölbung würde hier bremsen. In der Praxis werden dann asymmetrische Spinnaker gefahren, auf der Luvseite stärker gewölbt als auf der Leeseite. Auf dem Halbwindkurs kann mit Spinnaker nur selten gesegelt werden, die krängende Kraft wäre einfach zu groß. Am Wind schließlich würde der Spinnaker, genauso wie Rahsegel, killen und nicht zum Stehen gebracht werden können.

[8] auswehen, „flattern“

Praxis

Ziele des Versuchs

Mit Hilfe meines Modellversuch wollte ich die von den Autoren in ihren Büchern getroffenen Aussagen überprüfen. Die von mir ermittelten Zahlenwerte sollten zueinander in ein Verhältnis gesetzt werden und so die Angaben aus der Literatur unterstützen oder gegebenenfalls widerlegen.

Besonders interessierten mich dabei die folgenden Fragestellungen:

- Wie unterscheidet sich die Stärke des Vortriebs auf den verschiedenen Kursen?
- Welches ist auf jedem Kurs die günstigste Segelstellung?
- Wie wirkt sich die Segelform, insbesondere die Segelwölbung, auf die vortreibende Kraft aus?

Versuchsaufbau

Zeichnung

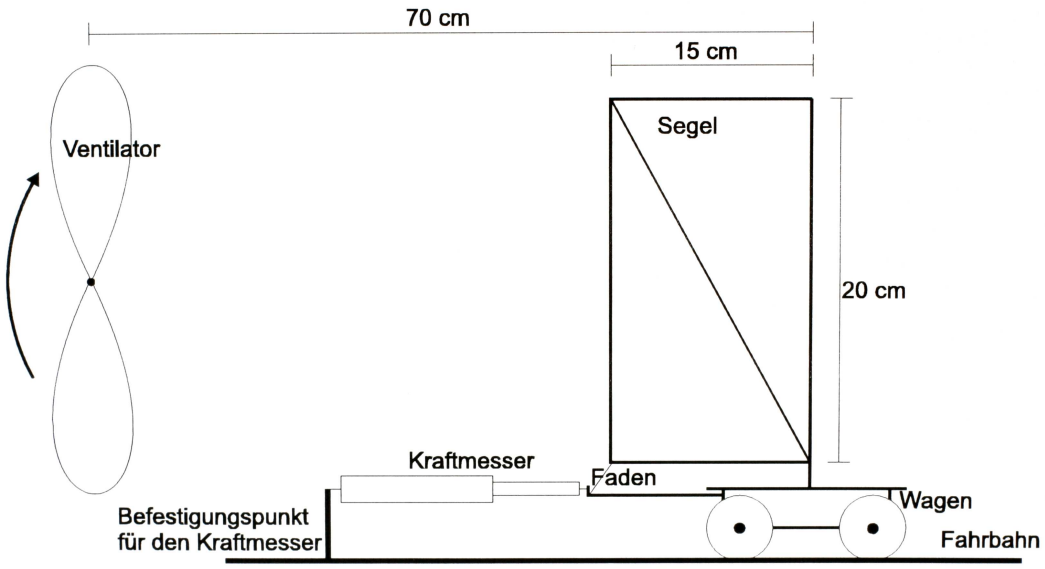


Abbildung 7: Zeichnung des Versuchsaufbaus

Beschreibung

Auf einer Metallfahrbahn steht ein Wagen, darauf ein an einem Holzrahmen besfestigtes Segel. Ein Faden, der Segler würde ihn *Schot* nennen, ermöglicht es, dessen Anstellwinkel zu verändern. Der Rahmen ist 20 cm hoch und 15 cm breit. Die Bahn lässt sich zum Nachstellen verschiedener Kurse in einem zum Ventilator frei wählbaren Winkel aufstellen. Sie wirkt so, wie der Kiel eines Segelschiffes: Der Wagen kann nur in zwei Richtungen rollen, wobei allerdings auch keine Abtrift möglich ist. Mit Hilfe eines Ventilators wird ein Luftstrom erzeugt: der „Wind“, der über das Segel den Wagen antreibt. Dieser ist über einen Kraftmesser mit einem festen Punkt verbunden und kann so den entstehenden Vortrieb anzeigen.
Als „Segel“ werden Papierstücke mit Seitenlängen von 16 cm · 20 cm (im Folgenden Segel 1 genannt) und 20 cm · 20 cm (Segel 2) eingesetzt. Sie sind also, da sie auf dem Rahmen mit 15 cm Breite kleben, in der Waagerechten unterschiedlich gewölbt. Segel 1 hat an der tiefsten Stelle 2,5 cm Wölbung, Segel 2 6,8 cm.

Durchführung

Mit jedem der beiden Segel führte ich je eine Messreihe durch, um die Auswirkungen unterschiedlicher Segelwölbungen zu klären. Innerhalb dieser beiden Messreihen stellte ich mein Versuchssegelschiff so auf, dass es den Kursen „vor dem Wind“, „Raumschots“, „mit halbem Wind“ und „am Wind“ entsprach. Auf jedem Kurs versuchte ich nun, die optimale, also die den meisten Vortrieb erzeugende Segelstellung herauszufinden, indem ich mit Hilfe des Fadens den Anstellwinkel veränderte und die Vortriebskraft am Kraftmesser ablas. Der Anstellwinkel ist der Winkel zwischen Segelsehne und „Fahrt“-Richtung, also Fahrbahn. Die Messwerte finden sich, zusammen mit dazu erstellten Diagrammen, im Anhang.

Auswertung – Vergleich mit der Literatur

Da es nur einen günstigsten Anstelllwinkel geben kann, waren als Ergebnis bei jedem Experiment der beiden Messreihen Vortriebswerte mit genau einem Maximum zu erwarten; alle anderen Anstellwinkel müssten sich also als ungünstiger erweisen. Die sich daraus ergebenden Diagramme sollten folglich einer in x-Achsen-Richtung gespiegelten Parabel ähneln. Ein „Paradebeispiel“ dafür ist Diagramm 5. Aber auch alle anderen Messungen weisen ähnliche Ergebnisse auf, die der Optimalform unterschiedlich nahe kommen. Gründe für die Abweichungen

sind meist Messfehler, die sich auch in den Messkurven wiederfinden. Eigentlich darf das nicht der Fall sein. In besseren Diagrammen (von Hand oder mit einem besseren Programm erstellt) dürften zu stark abweichende Werte beim Zeichnen der Kurve nicht berücksichtigt werden. Sehr deutlich zu sehen sind solche Punkte in Diagramm 3 (15 - 0,04 N) und in Diagramm 4 (42 - 0,07 N). Allgemein kann aber gesagt werden, dass alle Diagramme so zu erwarten waren, besonders wenn man sich die Kurven etwas besser gezeichnet vorstellt.
Als günstigste Winkel ergeben sich dabei für beide Segel:

Kurs	**Anstellwinkel des Segels** φ
Vor dem Wind	90°
Raumschots	45°
Halber Wind	42°
Am Wind	10°

Die Winkel sind für beide Versuchsreihen gleich, sie hängen also, wenigstens bei den von mir durchgeführten Experimenten, nicht von der Segelwölbung ab.
Ferner fällt auf, dass die Segelstellungen nicht gleichmäßig verteilt sind. Es gibt vielmehr zwei Sprünge, und zwar zwischen dem Vorwind- und dem Raumschots-Kurs ($\Delta\varphi = 45°$) sowie zwischen „Halber Wind“ und „Am Wind“ ($\Delta\varphi = 32°$). Dagegen liegen die Winkel von „Raumschots“ und „Halber Wind“ erstaunlich dicht zusammen ($\Delta\varphi = 3°$). Dass die Segelstellungen auf den beiden mittleren Kursen so eng zusammenliegen, muss mit der unterschiedlichen Entstehung des Vortriebs zusammenhängen. Raumschots entsteht ja der Vortrieb zum Großteil durch einfachen Luftwiderstand, und dieser ist am größten, wenn das Segel rechtwinklig zum Wind steht. Auf dem Halbwindkurs dagegen ist ein etwas kleinerer Winkel günstiger. Die Versuchsergebnisse können also in diesem Fall die Literaturangaben bestätigen.
In den Diagrammen 7 und 8 habe ich nur die besten Vortriebswerte aller Kurse in einem Graphen dargestellt. In beiden Fällen nimmt der Vortrieb über die Kurse ab, am größten ist er „Vor dem Wind“, am kleinsten „Am Wind“. Bei Segel 1 ist die Abnahme annähernd linear. Auf Diagramm 8 fällt der Wert für den Raumschots-Kurs sofort ins Auge, da er sich nicht, wie in Diagramm 7, einpasst sondern anscheinend zu niedrig ist. Möglich ist einerseits, dass es sich erneut um einen Messfehler handelt. Doch möchte ich hier keine voreiligen Schlüsse ziehen. Es ist eigentlich möglich, dass sich die stärkere Wölbung des Segels gerade besonders ungünstig auf dem Raumschots-Kurs auswirkt. Das allerdings scheint deshalb unwahrscheinlich, da auf den Kursen „Vor dem Wind“ und „Raumschots“, wie schon mehrfach erwähnt, der Vortrieb

hauptsächlich auf die gleiche Art entsteht. Deswegen müsste eine Segelform, die für den Vorwind-Kurs günstig ist, eigentlich auch „Raumschots“ höhreren Vortrieb erzielen. Schließlich ist es auch möglich, dass die benachbarten Werte ungenau sind.

Auffällig ist bei beiden Segeln die starke Abnahme des Vortriebs über die Kurse. Bei Segel 1 ist der Wert des Vorwindkurses knapp 4 mal[9] so groß wie der des Amwind-Kurses. Noch größer ist der Unterschied bei Segel 2. Hier beträgt das Verhältnis der Vortriebe von Vorwind- und Amwindkurs 6,4:1.

Leider liegen mir zu diesem Verhältnis keine Literaturwerte vor, so dass ich mich auf einen Vergleich mit Abbildung 4 beschränken muss. Dazu ist erneut darauf hinweisen, dass sich die Abbildung mit der Geschwindigkeit und nicht mit dem Vortrieb beschäftigt. Aus der Grafik geht hervor, dass die Geschwindigkeit auf dem Halbwindkurs am größten ist. Auf dem Raumschotskurs nimmt sie bis zum Vorwindkurs weiter ab. Am kleinsten ist sie am Wind. Zu Diagramm 7 lassen sich, abgesehen davon, dass der Amwind-Kurs die kleinsten Werte liefert, keine Gemeinsamkeiten finden. Diagramm 8 zeigt, dass bei Segel 2 sowohl Raumschots- als auch Amwind-Kurs weniger Vortrieb erzeugen, als der Halbwind-Kurs. Der Wert für den Vorwindkurs ist im Vergleich zu Abbildung 4 aber wieder sehr groß. Diese Abweichungen liegen eventuell an Messfehlern. Mit Sicherheit aber auch an der Einfachheit meiner „Segel“. Ich habe eben in einer Richtung gewölbte Papierstücke verwendet und nicht Kunstfasertücher mit auf dem Computer speziell berechneter Wölbung, die auch am Wind für optimalen Vortrieb sorgt.

In Bezug auf die Segelwölbung lässt sich durch meinen Versuch nachweisen, dass ein bauchiges Segel, also insbesondere der Spinnaker, vor dem Wind besonders günstig ist. Segel 2 liefert nämlich auf dem Vorwindkurs etwa 45% mehr Vortrieb als Segel 1.

Verbesserungsvoschläge

Um durch den von mir durchgeführten Versuch weitergehende Erkenntnisse erhalten zu können, hätte ich vor allem zwei Sachen gebraucht: Genauere Messwerte und bessere Literaturangaben. Letztere sind, selbst in [3], dem wissenschaftlichsten der mir vorliegenden Bücher, recht ungenau und relativ. Zahlenwerte und Rechnungen sind kaum zu finden, in anderen Büchern noch weniger.

Für genauere Messwerte hätte der Versuch präziser müssen. Dazu wäre vor allem eine andere

[9] genau: $3,\overline{6}$

Fahrbahn nötig gewesen. Es handelte sich bei der von mir eingsetzten zwar schon um eine leichtgängige, speziell für Schulversuche gedachte Stahlbahn mit einem dazugehörigen Wagen. Trotzdem halte ich den Rollwiderstand des Wagens bei einem Versuch mit so kleinen Kräften wie bei meinem für zu hoch. Bei einigen Teilversuchen konnte ich den Wagen beim Ablesen des Messwertes von Hand noch einige Millimeter hin- und herschieben, ohne dass er wieder in seine alte Position zurückrollte, was oft schon mehrere Hunderstel-Newton ausmachte. Optimal wäre eine Luftkissenbahn fast ohne Reibung gewesen. Leider konnte ich die der Schule nicht benutzen, da der passende Gleiter durch die quer wirkende Luftwiderstandskraft (besonders auf dem Halbwind-Kurs) gegen die Bahn gedrückt und gebremst worden wäre. Außerdem wäre der Gleiter sicherlich wegen des Hebels des Segels umgekippt.
Der Ventilator stellte einen weiteren Ungenauigkeitsfaktor dar. Sein Durchmesser war so gering, dass ich auch das Segel, wenn es ganz im Luftstrom stehen sollte, so klein wählen mußte. Dadurch traten natürlich auch nur sehr geringe, schwer messbare Kräfte auf. Zusätzlich war der von Ventilator erzeugte Luftstrom ungleichmäßig und verwirbelt, was das Segel meines „Schiffes“ stark zittern ließ und die Messungen weiter verfälschte.

Literatur

[1] Steve Sleight. Segeln – Das Praxishandbuch. Titel der englischen Originalausgabe: Complete Sailing Manual. Übersetzt aus dem Englischen von Andrea Busch, Franca Fritz und Heinrich Koop, Anneliese Halle, Claudia-Ade-Team: Michael Sticker. Verlag Dorling Kindersley: London, New York, München, Sydney, 2000 (engl.: 1999)

[2] Christoph Schuhmann. Das ist Segeln. Fotos: Hans-Günter Kiesel. Delius Klasing: Bielefeld, 1996

[3] Juan Baader. Segelsport – Segeltechnik – Segelyachten. 2. Auflage. Verlag Delius, Klasing & Co: Bielefeld und Berlin, 1963

[4] Joachim Schult. Segler-Lexikon. 8., überarb. Auflage. Verlag Delius Klasing: Bielefeld, 1992

[5] Hilfedatei des „Microsoft Flightsimulator für Windows 95“ (siehe CD), unter „Flugschule - Bodenschule - Aerodynamik - Funktionsweise von Tragflächen“. Datei erstellt am 10.10.1996. © 1983-1996 Microsoft Corporation.

[6] Gert Steidle. Blauer Max - Wie fliegt ein Flugzeug?, (siehe CD), Internetseite: http://www.blauermax.de/flugtech.html . © 1997-2001

[7] Wie funktioniert das? Herausgegeben von der Fachredaktion Technik des Bibliographischen Instituts. Redaktionelle Leitung: Jürgen Dessaules. Bibliographisches Institut AG: Mannheim, 1971

Versicherung/Einverständniserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.
Verwendete Informationen aus elektronischen Medien (Sofware, Internet, E-Mail, CD-ROM, Fax-Abruf usw.) sind der Lehrkraft vollständig auf einer CD-ROM zur Verfügung gestellt worden.

Hameln, den 21.2.2002
Martin Möller _____

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Hameln, den 21.2.2002
Martin Möller _____

Anhang

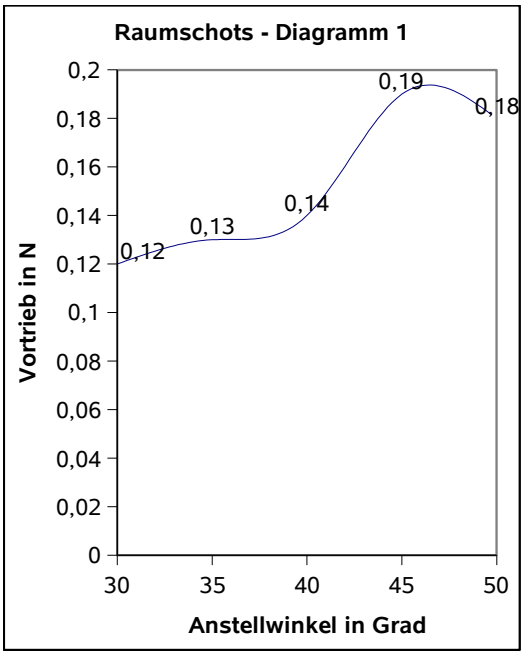
Messwerte und Diagramme

Segel 1: 20 cm · 16 cm

Vor dem Wind: 0,22 N

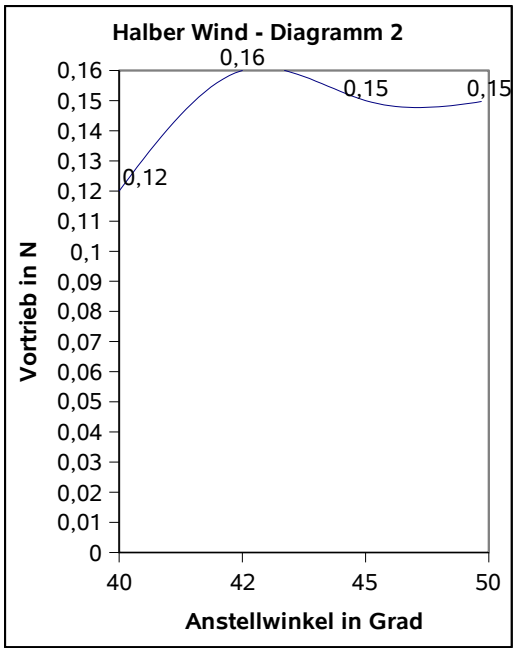
Raumschots:

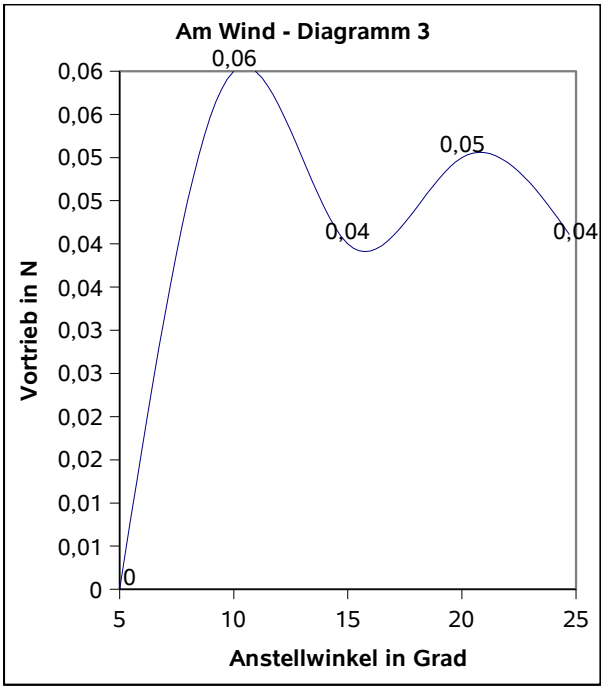
Winkel in Grad	Kraft in Newton
30	0,12
35	0,13
40	0,14
45	**0,19**
50	0,18



Halber Wind:

Winkel in Grad	Kraft in Newton
40	0,12
42	**0,16**
45	0,15
50	0,15





Am Wind:

Winkel in Grad	Kraft in Newton
5	0
10	**0,06**
15	0,04
20	0,05
25	0,04

Segel 2: 20 cm · 20 cm

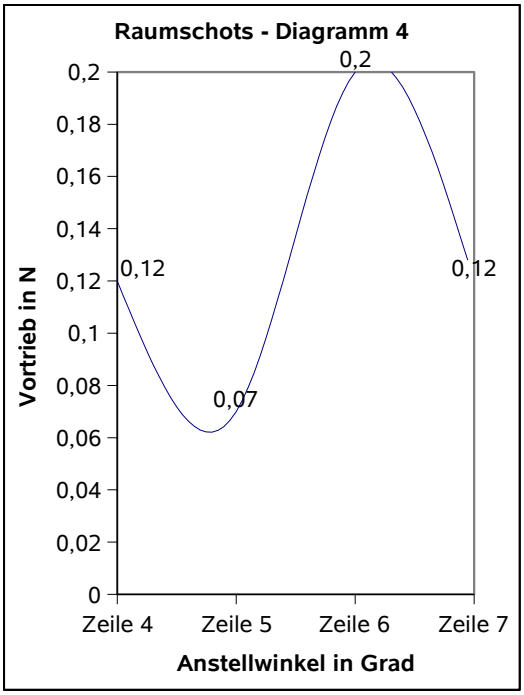
Vor dem Wind: 0,32 N

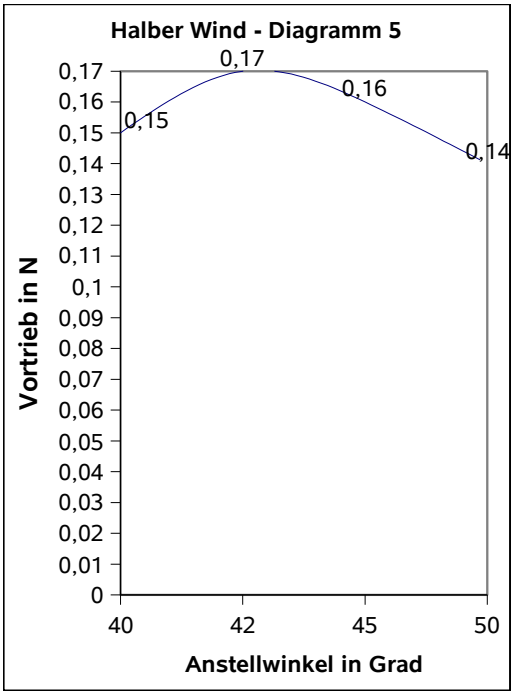
Raumschots:

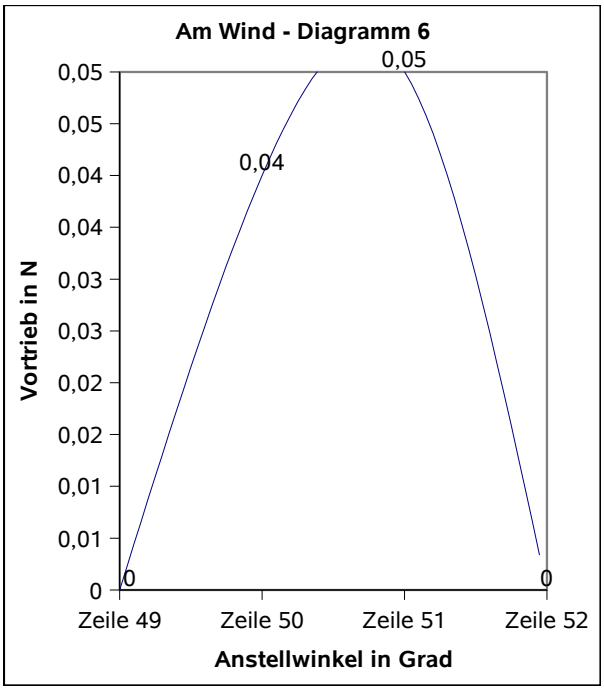
Winkel in Grad	Kraft in Newton
40	0,12
42	0,07
45	**0,20**
50	0,12

Halber Wind:

Winkel in Grad	Kraft in Newton
40	0,15
42	**0,17**
45	0,16
50	0,14



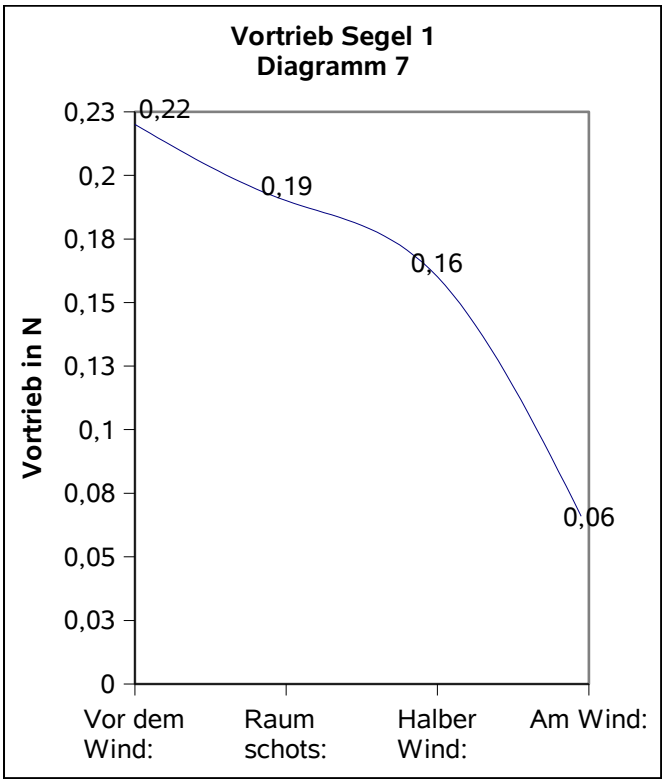




Am Wind:

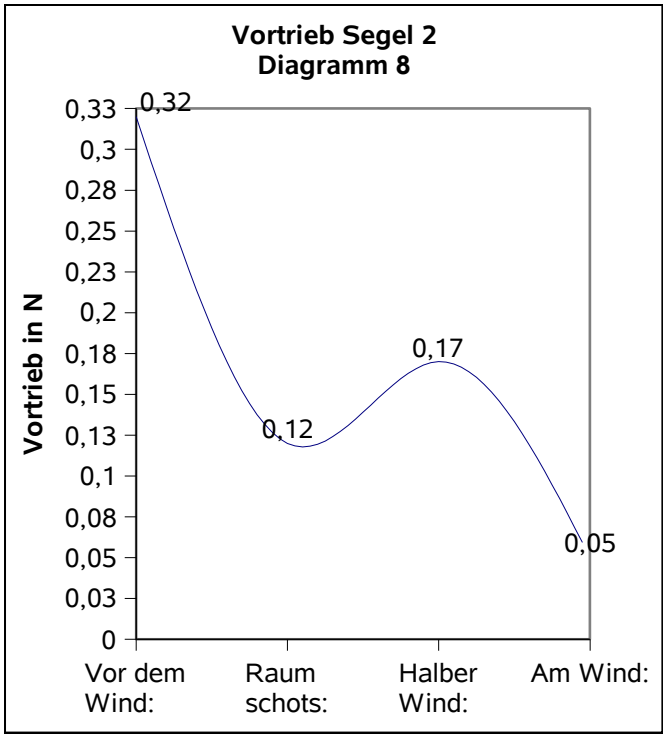
Winkel in Grad	Kraft in Newton
5	0
7,5	0,04
10	**0,05**
15	0

Optimaler Vortrieb



Segel 1: 20 cm x 16 cm

Vor dem Wind:	0,22 N
Raumschots:	0,19 N
Halber Wind:	0,16 N
Am Wind:	0,06 N



Segel 2: 20 cm x 20 cm

Vor dem Wind:	0,32 N
Raumschots:	0,12 N
Halber Wind:	0,17 N
Am Wind:	0,05 N