

Wie Segeln (wirklich) funktioniert - Themen, Aufgaben und Fragestellungen

1. Geometrie des Winddreiecks – Segeln schneller als der Wind

Für die folgenden Fragen ist graphische Lösung oder Dreiecksberechnung möglich. (PDS¹ Abb.2.3 und Gln. 7.2 und 7.3)

a) Gegeben ist ein Wahrer Wind mit der Stärke $v_W = 5 \text{ kn}$, der in einem Winkel von $\gamma_W = 60^\circ$ zum Kurs eines Segelschiffes weht, das sich mit $v_S = 3 \text{ kn}$ bewegt. Wie stark ist der Scheinbare Wind und welchen Winkel γ mit dem Kurs schließt er ein?

b) Lösen sie das gleiche Beispiel mit den Werten $v_W = 10 \text{ kn}$, $\gamma_W = 150^\circ$ und $v_S = 25 \text{ kn}$ und diskutieren sie die Bedeutung des Ergebnisses.

c) Betrachten und diskutieren sie das unter folgendem Link zu sehende Video eines Segelwagens mit Luftschraube:

http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=EEuAqq8FINw#t=172s

Hinweise: Der Wahre Wind kommt von rechts (also von hinten), und die Luftschraube ist über einen Keilriemen mit den Hinterrädern des Fahrzeuges verbunden. Beachten sie bitte die Richtung der Windfähnchen, die den Scheinbaren Wind anzeigen, im Zuge der Beschleunigungsphase. Wie ist so etwas möglich?

2. Querstabilität eines Bootsrumpfes

Die experimentelle Anordnung stellt ein vereinfachtes Modell eines Katamarans dar. Der Abstand der beiden Rumpfe ist verstellbar. Messen sie mithilfe der beigegebenen Gewichte für verschiedene Abstände der beiden Rumpfe (symmetrische Anordnung) die horizontale Kraft, die an der „Mastspitze“ (Geo-Dreieck) angreifen muss, um einen vorgegebenen Krängungswinkel (Empfehlung: 5 Grad) zu erreichen, und berechnen sie das daraus resultierende krängende Drehmoment. Der krängende Hebelarm beträgt 11,4 cm. Wie hängt das Drehmoment vom Abstand der beiden Schwimmer ab?

Versuchen sie andererseits, rechnerisch durch Ermittlung der Metazentrischen Höhe aus dem Flächenträgheitsmoment der Schwimmwasserlinie das ebenso große aufrichtende Drehmoment zu ermitteln. (PDS Abb. 2.9, Gln. 2.2, 2.5-2.7)

Aus den entsprechenden Formeln in PDS ergibt sich für das aufrichtende Drehmoment M_a

$$M_a = \left(\frac{I_y}{\nabla} - \overline{B_0G} \right) \Delta \sin \varphi .$$

Dabei bedeutet I_y das Flächenträgheitsmoment der Schwimmwasserlinie, $\overline{B_0G}$ den Abstand des Gewichtsschwerpunktes vom Auftriebsschwerpunkt in aufrechter Schwimmlage, Δ die Wasserverdrängung (das Gewicht des „Katamarans“) und φ den Krängungswinkel. In erster Näherung wird man $\overline{B_0G}$ gegenüber dem anderen Term in der Klammer vernachlässigen können. Somit wäre das aufrichtende Moment dem Flächenträgheitsmoment I_y proportional. Dieses wiederum kann in erster Näherung durch die Grundfläche der beiden Schwimmkörper mal dem halben Abstandsquadrat berechnet werden. Es sollte sich grob eine etwa quadratische Abhängigkeit des aufrichtenden Drehmoments vom Abstand der beiden

¹ Referenzliteratur: W. Püschl, Physik des Segelns, Wiley-VCH, Weinheim 2012.

Schwimmkörper ergeben, was die große Wirksamkeit von Katamaran-Konstruktionen zur Erhöhung der Querstabilität erklärt.

Benötigte Daten: Abmessungen der beiden Schwimmkörper (Styropor): Länge $l = 22$ cm, Breite $b = 5$ cm, Vertikalabstand des Gewichtsschwerpunkts vom Auftriebsschwerpunkt in aufrechter Schwimmlage: $\overline{B_0G} = 6,25$ cm. Das Flächenträgheitsmoment der Schwimmwasserlinie beträgt nach dem Steiner'schen Satz

$I_y = 2Fa^2 + 2\frac{Fb^2}{12}$, wobei a der halbe Abstand der Schwimmkörper ist (bis zur Mitte

gerechnet!), $F = a l$ die Fläche eines Schwimmkörpers. Im Allgemeinen wird man jedoch den zweiten Term gegenüber dem ersten vernachlässigen können.

3. Qualitative Beurteilung laminarer bzw. turbulenter Umströmung von Körpern

Durch Beobachtung der Strömungsbilder in den beiden aufgebauten Versuchseinrichtungen sollen wesentliche Unterschiede zwischen laminarer und turbulenter Strömung qualitativ erkannt werden.

Versuchseinrichtung laminare Strömung: Aus einem oben liegenden Behälter strömt Wasser durch die Schwerkraft angetrieben zwischen zwei Glasplatten nach unten. Dabei werden verschiedene flache Körper umströmt. Die Stromlinien der stationären Strömung werden durch Tinte sichtbar gemacht, die durch mehrere Öffnungen aus einem zum Wasserbehälter parallelen Behälter ebenfalls zwischen die Glasplatten austritt. Das entstehende laminare Strömungsbild ähnelt stark dem einer *Potenzialströmung* (wirbelfreie Strömung einer idealen, also reibungsfreien Flüssigkeit), ist z.B. für einen zylindrischen Körper annähernd symmetrisch bezüglich vorne/hinten. (Für eine ideale Flüssigkeit gilt das *d'Alembert'sche Paradoxon*: Jeder Körper wird so umströmt, dass auf ihn keine Nettokraft ausgeübt wird.) Insbesondere wird die Hinterkante eines in die Strömung gestellten Tragflächenprofils so umströmt, dass dahinter ein Staupunkt auftritt (ein Punkt an der Körperoberfläche, an dem die Strömungsgeschwindigkeit 0 ist). Dieser ist das Gegenstück zu dem an der Vorderseite (Anströmungsseite) des Profils liegenden Staupunkt.

Versuchseinrichtung turbulente Strömung: In einem Strömungskanal wird Wasser waagrecht durch eine Pumpe in einer geschlossenen Bahn bewegt. Die Beobachtungsstrecke liegt wieder zwischen Glasplatten. Die Strömung wird mittels kleiner bräunlicher Schwebeteilchen insbesondere unter Lampenbeleuchtung sichtbar. Hinter umströmten Körpern löst sich die Strömung je nach Geschwindigkeit an bestimmten Punkten ab. Dahinter kommt es alternierend auf beiden Seiten zur Entstehung von Wirbeln mit entgegengesetztem Umdrehungssinn (*Kármán'sche Wirbelstraße*). Ein Tragflächenprofil wird so umströmt, dass an der Hinterkante die von der Oberseite des Profils kommenden Stromlinien parallel zu den von der Unterseite kommenden Stromlinien verlaufen (*Kutta'sche Abflussbedingung*). Dies ist nur durch eine gebundene Zirkulation um die Tragfläche möglich, die wiederum über das Bernoulli-Theorem für den Auftrieb sorgt. Diese Zirkulation entsteht zu Beginn der Strömung, indem sich an der Hinterkante der sog. Anfahrwirbel ablöst. Dieser hat entgegengesetzte Umdrehungsrichtung zur gebundenen Zirkulation.

4. Windkanal: Aerodynamischer Auftrieb und Widerstand eines Tragflügelprofils

Messen sie im Windkanal (auf dem Gang aufgebaut) für eine feste Windgeschwindigkeit Auftrieb und Widerstand eines Tragflügelprofils in Abhängigkeit vom Anstellwinkel. Wie

hängt der Auftrieb vom Anstellwinkel ab? Lässt sich das Auftriebsverhalten gemäß PDS Gln. 4.2 und 4.3 reproduzieren?

Experimenteller Hinweis: Die Messeinrichtungen für Auftrieb und Widerstand weisen erhebliche Haftreibung auf, die man durch wiederholtes leichtes Anstoßen zum Teil überwinden kann. Dies und auch der Parallaxenfehler bei der Ablesung sorgen für einen vergleichsweise großen Messfehler.

5. Wellenbild im tiefen Wasser, Froude-Zahl

Suchen sie im Internet mittels Google Earth geeignete Wellenbilder von fahrenden Schiffen (hier empfehlen sich Hafeneinfahrten), messen sie die Wellenlänge des Querwellensystems und bestimmen sie daraus die Phasengeschwindigkeit = Schiffsgeschwindigkeit. Nicht vergessen, den Maßstab einzublenden! Lässt sich die Länge des Schiffes aus dem Google-Earth-Bild ebenfalls messen, berechnen sie die Froude-Zahl. (PDS Gln. 6.18 und 6.23). Ist diese plausibel?

6. Optimale Geschwindigkeit

Die vorliegenden Polardiagramme stellen die aerodynamischen Eigenschaften einer Besegelung dar. Entlang der x-Achse ist der Widerstand (incl. „parasitärer“ Widerstände wie Mast und stehendes Gut), entlang der y-Achse der Auftrieb des Segelprofils aufgetragen. Die markierten Punkte entlang der Kurve stellen die jeweiligen aerodynamischen Anstellwinkel dar. Wählen sie einen zu segelnden Kurs und zeichnen sie die Richtung des Bootes relativ zum Scheinbaren Wind (= x-Achse) ein. Wählen sie auf dem Polardiagramm jenen „Betriebspunkt“ = Anstellwinkel aus, der die größtmögliche Kraftkomponente in Richtung des gesegelten Kurses liefert. Gehen sie weiters davon aus, dass eine plötzliche Erhöhung der Windstärke die Begrenzung der Seitenkraft (Komponente normal zum gesegelten Kurs) auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes erfordert. Welcher Anstellwinkel und welche Vortriebskomponente ergeben sich nun? Welche seglerische Maßnahme führt zu dieser Veränderung? Wie hätte man den Anstellwinkel noch verändern können. (PDS Abb. 7.1 bis 7.4, Gl .7.1). Versuchen sie das Verfahren für unterschiedliche Kurse.

7. Günstigste Kreuzstrategie

Die vorliegenden Diagramme stellen die lokalen Windrichtungen in einem Regattagebiet dar. Von einem Startpunkt S ist ein Ziel Z durch Aufkreuzen gegen den Wind zu erreichen. Bestimmen sie einen möglichst schnellen Kreuzkurs mit folgendem vereinfachten graphischen Verfahren: 1) Der Kurs wird auf Steuerbord- oder Backbordbug jeweils unter 45° zu der am Anfang des Kurssegmentes herrschenden Windrichtung eingezeichnet. 2) Jedes Kurssegment ist 2 cm lang (gleichbedeutend der stark vereinfachenden Annahme, dass die Bootsgeschwindigkeit stets gleich groß sei), danach kann entschieden werden, ob auf dem gleichen Bug weitergefahren oder gewendet wird. 3) Die bis zum Ziel benötigte Zeit wird durch Abzählen der durchlaufenen Segmente ermittelt. Vergleichen und diskutieren sie die Ergebnisse. Diskutieren sie die hier gemachten Vereinfachungen und vergleichen sie diese mit einem realistischen Szenario.