

Mechanischer Kurs-Geschwindigkeitsregler für Windselbststeuerungsanlagen auf Multihull-Segelyachten

Dr. Joern Heinrich 05.05.2009

Zusammenfassung

Der folgende Artikel beschreibt das Prinzip eines mechanischen Kurs-Geschwindigkeitsreglers für Servo-Pendelruder-Windselbststeuerungsanlagen (WSA) auf Mehrumpfsegelyachten. Der Regler hat die Aufgabe, die Kursvorgabe einer Servo-Pendelruder-Windselbststeuerungsanlage so zu beeinflussen, dass die Abnahme des Einfallswinkels des scheinbaren Windes bei Beschleunigung der Yacht ausgeglichen wird, so dass sich die Kursvorgabe der WSA selbstständig der Geschwindigkeitszu- oder -Abnahme anpasst.

Voraussetzungen:

Bisher besteht für den Einsatz von WSA auf Mehrumpfsegelyachten mit hohem Geschwindigkeitspotential die Limitierung, dass der scheinbare Wind mit Beschleunigung des Boots immer vorlicher einfällt. Eine übliche WSA kann darauf nicht reagieren, und wird bei fest eingestellter Kursvorgabe dabei das Boot so steuern, dass es immer weiter vom Wind abfällt. Das führt dann dazu, dass der eigentlich gewünschte Kurs über Grund (und damit zum wahren Wind) bei Beschleunigung nur unter permanenter Nachjustage des Sollkurses an der WSA eingehalten werden kann. Solche Beschleunigung beim Absurfen einer See beispielsweise kann dazu führen, dass das Boot weit über die Windgeschwindigkeit kommt, und damit die Windfahne ein "falsches" Richtungssignal bekommt, der Multihull immer weiter vom Wind abfällt und möglicherweise sogar halst.

Bisherige empirische Ansätze zur Lösung des Problems sind in (1) gesammelt, und stellen sich wie folgt dar: Bill Howell schlug vor, die gesamte Windselbststeueranlage kippbar zu lagern, so dass diese bei hoher Bootsgeschwindigkeit nach vorne kippt, das Servoruder aus dem Wasser hebt und damit dem Ruder kein Steuersignal nach Lee liefern kann, sondern unabhängig von der Stellung der Windfahne geradeaussteuert. Dieses Prinzip wurde vom Hersteller der Hasler-Anlage (M.S.Gibb Ltd, Southampton) übernommen und mit dem Typ 1FQH mit kippbarer Halterung umgesetzt. Weitere Ansätze (John Hogg 1967, Jock Burrough) zogen nachgeschleppte Widerstandskörper in Betracht, die ab einer bestimmten Geschwindigkeit direkt auf die Windfahne oder das Ruder einwirken, wurden jedoch meines Wissens technisch bisher nie umgesetzt, ebensowenig wie der Ansatz von Nat Barnardiston, die Änderung der Windgeschwindigkeit direkt an der Windfahne über einen Trim-Tab als Richtungssignal auszunutzen, der den Nachteil hat, dass die Windgeschwindigkeit sich im Vergleich zur Bootsgeschwindigkeit im Surf nur wenig ändert. Allen bisherigen Ansätzen fehlt bislang eine technisch machbare und kontrollierte Umsetzung der Bootsgeschwindigkeit auf den erforderlichen Kurskorrekturwinkel - und das einstellbar für die verschiedenen Kurse zum Wind, die eine jeweils unterschiedliche Größenordnung der geschwindigkeitsabhängigen WSA-Sollkursvorgabe erfordern.

Eine ähnliche Technik wie im folgenden vorgestellt wird jedoch für die Höhenregulierung von Tragflächentrimaranen eingesetzt (z.Bsp. Windrider "Rave").

Scheinbarer Wind

Der scheinbare Wind (Richtung, Geschwindigkeit) auf einer Segelyacht ergibt sich aus der Vektoraddition von wahrem Wind und Bootsbewegung. Die Richtung des scheinbaren Windes wird üblicherweise in Bezug auf die Bootslängsachse angegeben. Dabei entspricht beispielsweise ein seitlicher Einfall des scheinbaren Windes 90° und ein achterlicher Einfall 180° . Normalerweise wird eine WSA auf den scheinbaren Wind justiert, und steuert dann den Kurs des Bootes so, dass es die einmal eingestellte Richtung zum scheinbaren Wind beibehält. Nach Vektoraddition ergibt sich die Richtung des scheinbaren Windes als Funktion aus Schiffsgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und -Richtung wie folgt:

$$a^\circ = \arccos\left(\frac{(w \cdot \cos(b^\circ) + v)}{\sqrt{(w \cdot \cos(b^\circ) + v)^2 + (w \cdot \sin(b^\circ))^2}}\right) \quad [1]$$

wobei:

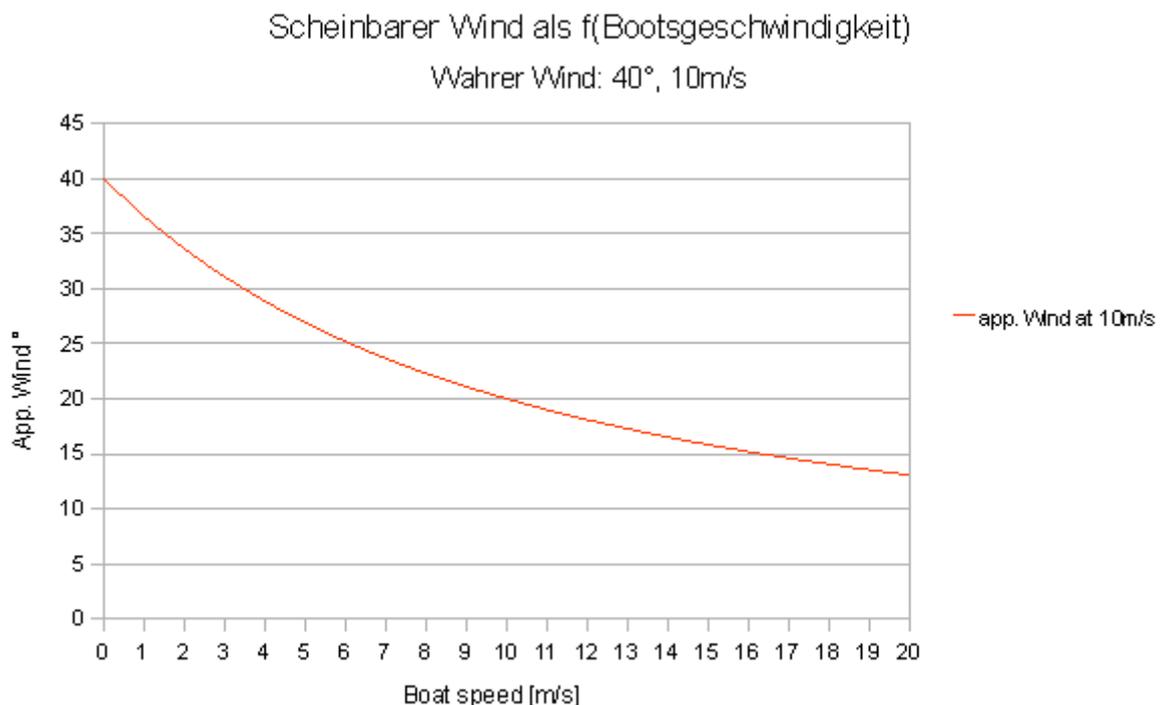
a° : Richtung des scheinbaren Windes in Bezug auf die Schiffslängsachse

b° : Richtung des wahren Windes in Bezug auf die Schiffslängsachse

w [m/s] : Geschwindigkeit des wahren Windes über Grund

v [m/s] : Geschwindigkeit des Boots über Grund

Nimmt man den wahren Wind sowie den Bootskurs zum wahren Wind als konstant an, so ergibt sich folgendes Bild bei einer Auftragung der Richtung des scheinbaren Windes gegen die Bootsgeschwindigkeit gemäß Gleichung [1]:

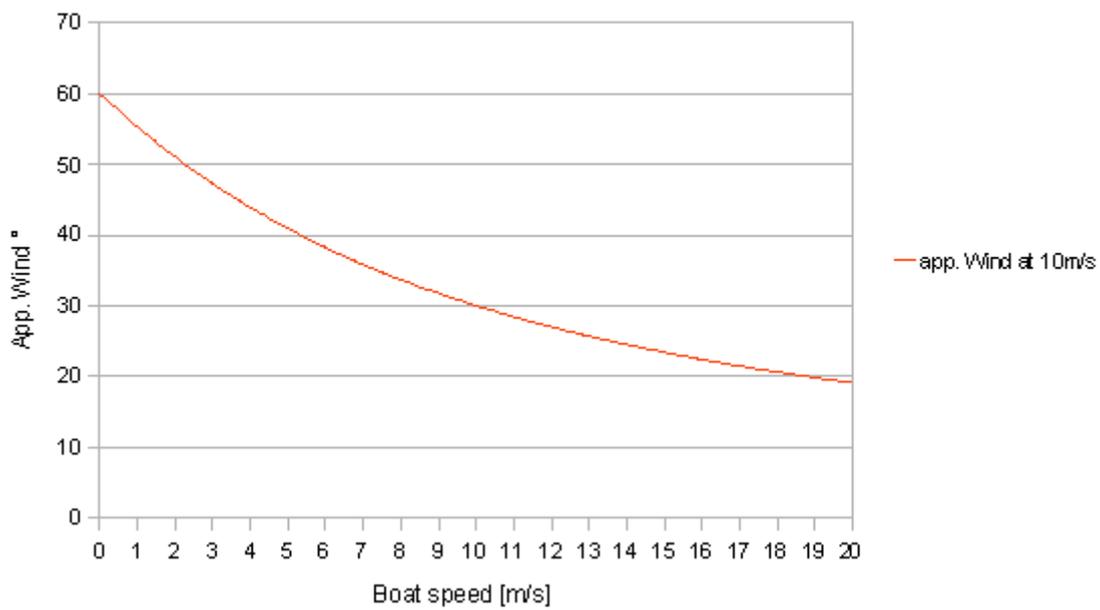


Als Beispiel ist der wahre Wind mit 10 m/s aus 40° angenommen. Wenn das Boot die gleiche Geschwindigkeit wie der wahre Wind hat, halbiert sich der Einfallswinkel des scheinbaren Windes gegenüber demjenigen des wahren Windes. Wichtig ist an dieser Stelle die Form des Graphen: Die Einfallsrichtung des scheinbaren Windes nimmt, je höher die Bootsgeschwindigkeit wird, auf einem Amwindkurs nur noch wenig ab. D.h. die größte Einflußnahme eines mechanischen Reglers auf den von der WSA vorgegebenen Sollkurs muss bei niedrigen Geschwindigkeiten erfolgen.

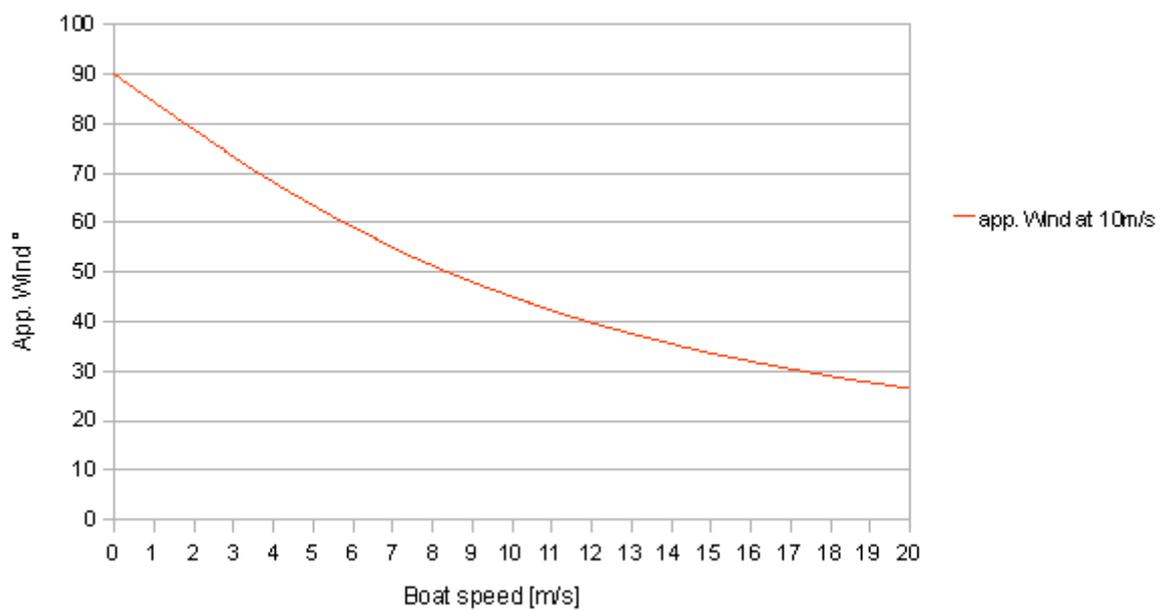
Im folgenden die Graphen, wie sie sich bei verschiedenen Kursen zum Wind ergeben - jeweils 10 m/s Wind

vorausgesetzt:

Scheinbarer Wind als f(Boots­geschwindigkeit)
Wahrer Wind: 60°, 10m/s

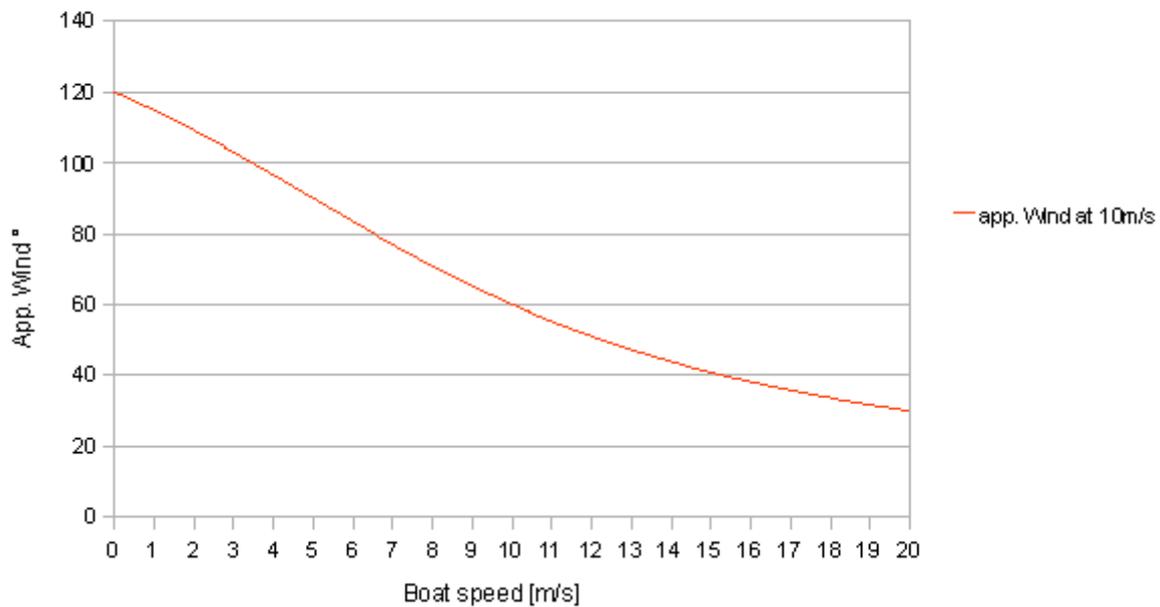


Scheinbarer Wind als f(Boots­geschwindigkeit)
Wahrer Wind: 90°, 10m/s



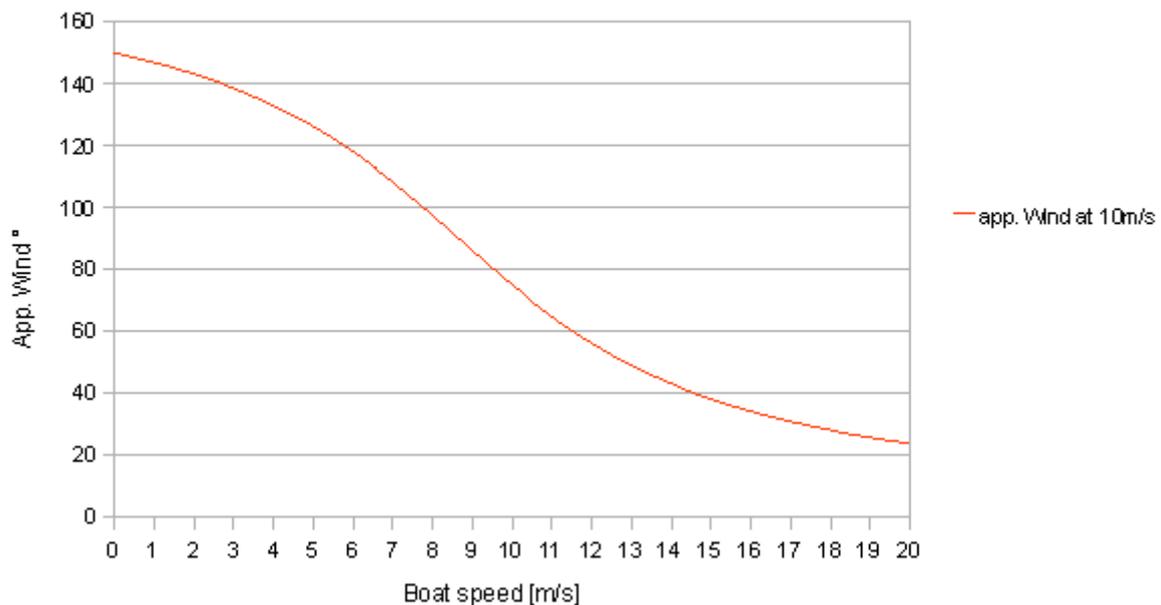
Scheinbarer Wind als f(Boots­geschwindigkeit)

Wahrer Wind: 120°, 10m/s



Scheinbarer Wind als f(Boots­geschwindigkeit)

Wahrer Wind: 150°, 10m/s



Gemeinsam ist allen Kursen, dass sich genau dann der Einfallswinkel des scheinbaren Windes halbiert, wenn das Boot die gleiche Geschwindigkeit wie der wahre Wind hat. Die Kurvenform ist bei den Kursen höher oder gleich Halbwind nahezu identisch, jedoch mit unterschiedlicher Skalierung. Anders sieht es auf raumen Kursen aus: Dort erhält man einen konvexen Verlauf der Abhängigkeit des scheinbaren Windes von der Bootsgeschwindigkeit, bis der scheinbare Wind 90° unterschreitet.

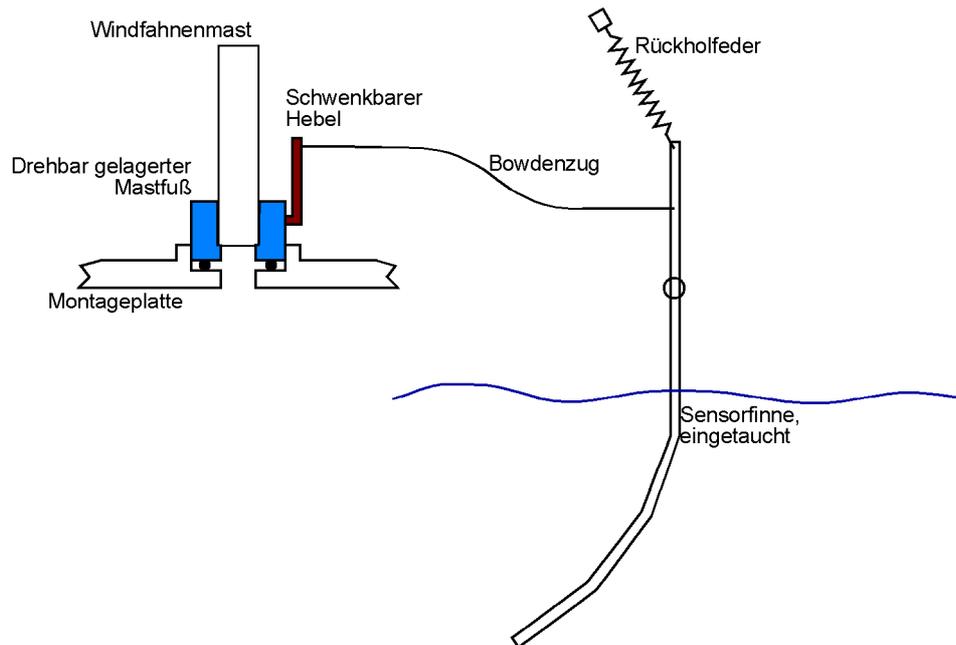
Es sind zwar Bootsgeschwindigkeiten bis zum Doppelten der Windgeschwindigkeit aufgetragen, doch solche Geschwindigkeiten werden nur von Tragflächentrimaranen erreicht (z.Bsp. Windrider Rave: 15 m/s). Die hier beschriebene Mechanik samt WSA kommt jedoch nur für Fahrten-Multihulls (Verdränger) in Frage. Bei jenen beginnt das Geschwindigkeitslimit bekannterweise eher im Bereich der Rumpfgeschwindigkeit, die von der Bootslänge abhängt - bei Gleitfahrt auf raumen Kursen bis in den Bereich der Windgeschwindigkeit bzw darüber.

Mechanischer Kursregler mit Geschwindigkeitssensor

Zur Einrichtung eines mechanischen Kursreglers gemäß der Bootsgeschwindigkeit braucht man einen Sensor, der die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser mehr oder weniger proportional in einen Weg umsetzt. Nach Möglichkeit sollte die Wegcharakteristik dieses mechanischen Sensors im relevanten Geschwindigkeitsbereich obigen Grafiken entsprechen. Ein solcher Sensor ist beispielsweise eine in Fahrtrichtung des Bootes drehbar gelagerte Finne mit einem kleinen Paddel am unteren Ende. Die Finne taucht in vertikaler Stellung ins Wasser ein. Ein Federzug hält die Finne bei Null m/s Bootsgeschwindigkeit vertikal (0°). Hat das Boot seine maximale Geschwindigkeit, so sollte die Rückholfeder der Sensorfinne noch so kräftig sein, dass die Finne immer noch ins Wasser eintaucht, und nicht über die Oberfläche "surft".

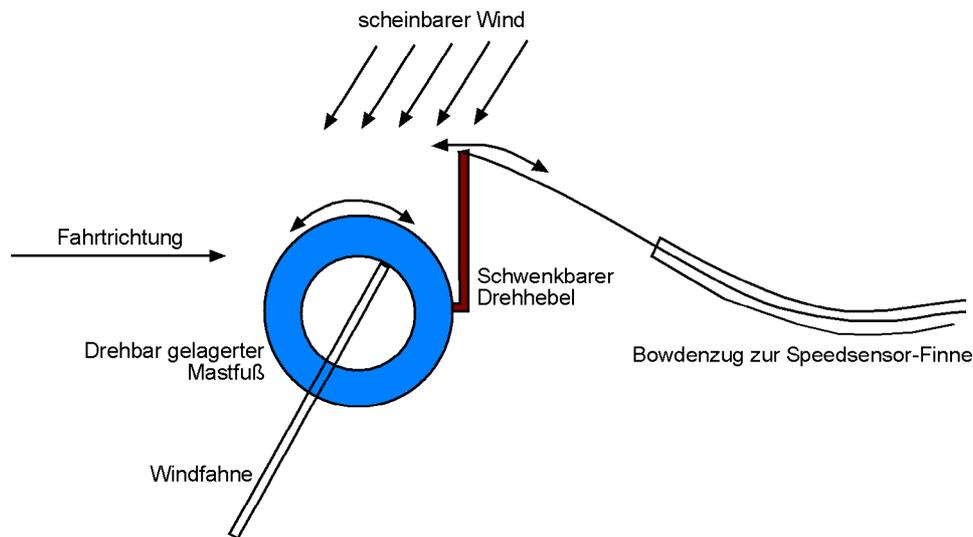
Die Umsetzung der Stellung der Speedsensorfinne auf die Sollkursvorgabe der WSA erfolgt über Hebelgestänge, einen ummantelten Schub/Zugdraht (Bowdenzug) und / oder einfache Getriebeelemente wie Zahnräder, Schneckenantrieb o.ä. Im folgenden wird zunächst von einem Bowdenzug ausgegangen.

Der Windfahnenmast ist im Gegensatz zu üblichen WSA auf einem drehbaren Mastfuß gehalten. Die manuelle Kursvorgabe erfolgt wie üblich durch eine Drehung des Windfahnenmastes innerhalb dieses Mastfußes, bis die Windfahne im scheinbaren Wind vertikal steht. Der Mastfuß jedoch wird von der Speedsensorfinne angetrieben, die je nach aktueller Geschwindigkeit den Mastfuß um einen Zusatzwinkel relativ zur Bootsängsachse dreht. Die Übertragung der Speedsensorstellung auf den drehbaren Mastfuß erfolgt über einen drehbaren Hebel, der entweder manuell oder vom Windfahnenmast über einen Mitnehmer so umgeklappt wird, dass der Bowdenzug jeweils auf der richtigen Seite des Mastfußes angreift. Die Hülle des Bowdenzuges wird in einem Gelenkkopf gehalten, um die Drehung des Übertragungshebels von Steuerbord nach Backbord nachzuvollziehen, ohne den Schub/Zugdraht zu knicken. Der Übertragungshebel am Mastfuß wird mit einer Feder entweder in Steuerbord oder Backbordposition an einem Endanschlag festgehalten. Ein variabler Ansatz des Bowdenzuges an der Sensorfinne erlaubt eine Einstellung des Übertragungsverhältnisses von der Sensorfinnenanstellung auf den Drehwinkel des Mastfußes. Der Bowdenzug kann auch durch eine Schubstange mit Kardangelenken ersetzt werden.



Prinzipskizze, Ansicht von Steuerbord, (Drehebel nicht in Arbeitsposition)

Die Windfahne wird wie üblich durch Drehung des Windfahnenmastes innerhalb des Mastfußes auf den scheinbaren Wind eingestellt. Ändert das Boot seine Geschwindigkeit und sich damit die Richtung des scheinbaren Windes, so stellt der geänderte Winkel des Sensorfinne über den schwenkbaren Drehhebel und drehbar gelagerten Mastfuß die Sollkurs-Vorgabe durch die Windfahne nach.



Prinzipskizze, Ansicht von oben
(Drehhebel in horizontaler Arbeitsposition auf Backbordseite,
Wind von Backbord)

Geht das Boot durch die Wende und wird die Windfahne am Windfahnenmast auf den neuen Kurs eingestellt, so legt ein Mitnehmerstift am Windfahnenmast den Drehhebel auf die andere Seite um. Auch bei einer Halse muss daher die Windfahne über die Amwindposition auf den neuen Kurs zum Wind eingestellt werden.

Theoretisches

Betrachtet man die Steuercharakteristik des Speedsensors, so ist die Kraft am Ausgangshebel bei einer geraden Fläche proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit des Bootes sowie proportional des Cosinus des Anstellwinkels gegenüber der Horizontalen. In erster Näherung wird nun eine linear arbeitende Rückholfeder horizontal ansetzend am Ausgangshebel (L_a) der Sensorfinne betrachtet. Dabei wächst die rückstellende Kraft mit dem Sinus der Fennausslenkung. Vereinfachend wird zunächst angenommen, dass die Drehachse der Finne genau in der Wasseroberfläche liegt:

$$F_w = \cos(e) \cdot C_w \cdot v^2 \text{ mit:}$$

F_w = Kraft des Wasser an der Sensorfinne

C_w = Reibungskonstante

v = Bootsgeschwindigkeit

e = Anstellwinkel der Sensorfinne gegenüber der vertikalen

Die rückstellende Kraft am oberen Ende der Sensorfinne (F_f) ergibt sich aus der Federkonstanten (C_f) und dem Federweg (L_a):

$$F_f = L_a \cdot C_f$$

Der Federweg ist Hebellänge (K) mal Sinus des Anstellwinkels (e):

$$L_a = K \cdot \sin(e)$$

Damit ist

$$F_f = C_f * K * \sin(e).$$

Im Kräfte-Gleichgewicht gilt bei bestimmter Bootsgeschwindigkeit v für einen bestimmten Anstellwinkel e der Sensorfinne:

$$F_f = F_w, \text{ damit folgt:}$$

$$C_f * K * \sin(e) = \cos(e) * C_w * v^2$$

$$\sin(e) / \cos(e) = (C_w / (C_f * K)) * v^2 ; \text{ mit } \sin(e) / \cos(e) = \tan(e)$$

$$\tan(e) = (C_w / (C_f * K)) * v^2$$

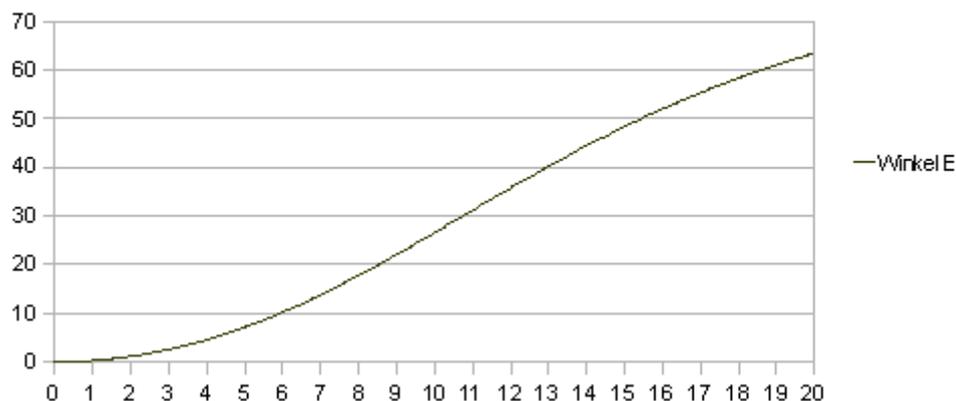
$$e = \arctan((C_w / (C_f * K)) * v^2), \text{ die Konstanten alle zu "C" zusammengefasst:}$$

$$e = \arctan(C * v^2)$$

Im Folgenden zunächst der Anstellwinkel der Sensorfinne in Abhängigkeit von der Bootsgeschwindigkeit nach oben genannter Formel:

Winkel Sensorfinne in Abhängigkeit von der Bootsgeschwindigkeit

$C = 0.005$



Diesen Winkel muss man auf die einmal gesetzte Stellung des Windfahnenmastes zum scheinbaren Wind derart übertragen, dass der Mastfuß in Abhängigkeit von der Bootsgeschwindigkeit so gedreht wird, dass die Kurve "Scheinbarer Wind als $f(\text{Bootsgeschwindigkeit})$ " dupliziert wird. Also wird der Winkel der Sensorfinne transformiert und vom Winkel der Windfahne abgezogen. Dies kann beispielsweise geschehen über einen exzentrischen Quadranten an der Sensorfinne. Die zurückgelegte Strecke auf einem Quadranten, z. Bsp. Zugweg eines Steuerseils errechnet sich zu

$$L = 2 * \pi * R * e / 360$$

mit L =Weg des Zugseiles, e =Drehwinkel, R =Radius des Quadranten

Ändert sich R jedoch mit e , d.h. handelt es sich um einen exzentrischen Quadranten, so ist beispielsweise:

$$R = R - (e * C_r)$$

C_r ist der Faktor, um den sich der Radius des Exzenters mit zunehmendem Drehwinkel verringert. Man erhält den Weg eines Zugseiles auf dem Exzenter durch Integration über den Winkel von 0 .. e .

Eine Exzenterform für die Anpassung des Finnenhebelweges auf die Winkeländerung des Windfahnenmastes ist über eine Tabellenkalkulationssoftware leicht zugänglich. Allerdings ergibt sich für obigen Ansatz des Kräftegleichgewichtes eine sehr ungeeignete Form mit einem erforderlichen Anfangsradius des Quadranten von 14, der sehr rapide auf 0.25 abnimmt (Dimensionslose Größe).

Ein verbesserter prinzipieller Ansatz für das Kräftegleichgewicht zwischen Finne und Rückholfeder ergibt sich, wenn man berücksichtigt, dass bei geringen Bootsgeschwindigkeiten ein relativ große Änderung des scheinbaren Windes mit der Änderung der Bootsgeschwindigkeit vorliegt, die bei zunehmender

Geschwindigkeit immer geringer wird. Also wird die Rückholfeder besser nicht horizontal im 90°-Winkel an der Sensorfinne ansetzen sondern in einem flacheren Winkel, der bei geringerer Geschwindigkeit größere Änderungen des Sensorwinkels erlaubt als bei höherer Geschwindigkeit. Die folgende Ableitung gilt für einen Ansatzwinkel genau in Richtung des Sensorhebels:

Die Federkraft der Rückholfeder kann wie folgt angesetzt werden

$$[2] \quad F_f = C_f * (K - L_f) \quad \text{mit}$$

F_f = Kraft der Rückholfeder; K = gedehnte Länge der Rückholfeder; L_f = Länge der "entspannten" Rückholfeder; C_f = Federkonstante.

Die Länge der gedehnten Rückholfeder lässt sich aus der Länge des Finnenhebels (L_a) sowie dem Finnenanstellwinkel (e) berechnen:

$$[3] \quad K = \sqrt{(L_f + L_a - L_a * \cos(e))^2 + (L_a * \sin(e))^2}$$

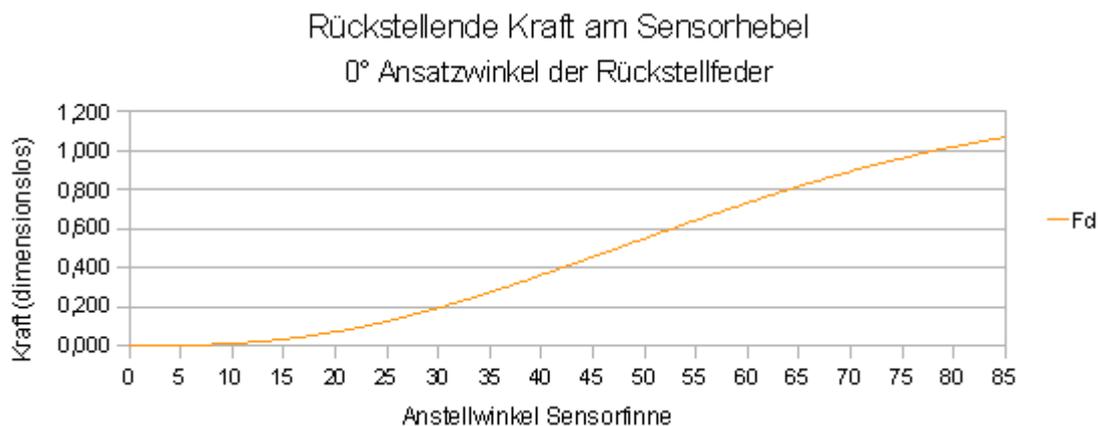
Damit folgt für die Kraft der Rückholfeder in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Finne:

$$[4] \quad F_f = C_f * (\sqrt{(L_f + L_a - L_a * \cos(e))^2 + (L_a * \sin(e))^2} - L_f)$$

Die Rückholfeder setzt nun jedoch nicht im rechten Winkel an, sondern zunächst gerade, übt damit bei vertikaler Finne keinen Zug aus. Es darf nur die Komponente der Federkraft Berücksichtigung finden, die am Finnenhebel senkrecht ansetzt:

$$[5] \quad F_d = F_f * \sin(180^\circ - (\arccos(\sin(e)) + \arccos((L_a * \sin(e)) / K)))$$

Es ergibt sich am Ausgangshebel der Sensorfinne danach die folgende Kraftkurve, wenn die Feder die gleiche Länge wie der Ausgangshebel hat ($L_f = L_a$)



Es ist deutlich, dass eine rückstellende Federkraft bei solcher Anordnung erst ab einer Anstellung der Sensorfinne von ca 10° einsetzt, und ab 30° Anstellwinkel in einen mehr oder weniger linearen Bereich kommt. Von der Kurvenform her eignet sich augenscheinlich der Bereich von 10° bis 50°, denn man erhält dort eine zum Kurvenverlauf des scheinbaren Windes auf Halb- bis Amwindkursen entsprechende Krümmung mit anfangs geringerer Rückstellkraft.

Zur Optimierung sollte also der Ansatzwinkel der Rückstellfeder am Sensorhebel sowie deren Vorspannung einstellbar sein. Dazu wird der Befestigungspunkt der Rückstellfeder auf einer Metallplatte in Form eines Viertelkreises mit einem Schlitz und zusätzlich auf einem Schieber in Federrichtung verstellbar gemacht.

Eine linear ansteigende Rückstellkraft ist erzielbar durch die Verwendung eines Quadranten mit Seilzug für den Ansatz der Feder am Sensorhebel.

Ein Problem besteht nun noch im nichtlinearen Anstieg der Kraft an einer geraden Sensorfinne in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit: Die Kraft, die ein eingetauchter Körper im Wasser erfährt, ist in erster Näherung proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit durchs Wasser sowie zur eingetauchten Fläche. Ersteren Term kann man nicht beeinflussen, jedoch ergibt sich bei der Finnenform, d.h. der eingetauchten Fläche die Möglichkeit den Kraftoutput zu linearisieren: Eine nach achtern gekrümmte Finne setzt je Grad Anstellwinkel überproportional weniger Fläche dem strömenden Wasser aus. Auch dass der Drehpunkt der Sensorfinne nicht in der Wasseroberfläche, sondern weit darüber liegt, trägt zur Linearisierung des Kraftoutputs des Geschwindigkeitssensors bei.

Anpassung der Regelstrecke

Vergleicht man die Graphen für die Abhängigkeit des scheinbaren Windes von der Bootsgeschwindigkeit, so wird deutlich, dass je nach Kurs zum wahren Wind sich der scheinbare Wind stärker (raumer Kurs) oder weniger stark (Amwindkurs) mit der Bootsgeschwindigkeit ändert. Die Anpassung der Regelstrecke des Speedsensors an den Kurs und die damit erforderliche unterschiedliche Winkeländerung am Mastfuß je Geschwindigkeitsänderung erfolgt durch Verschieben des Bowdenzug-Ansatzpunktes auf dem Ausgangshebel des Speedsensors. Die beschriebene Mechanik erlaubt am Mastfuß eine automatische Anpassung der Windfahnenstellung von ca 90° maximal. Die Sensorfinne wird einen Arbeitsbereich von etwa 0 - 60° Anstellung oder sogar etwas darüber haben, wenn sie bei Stillstand des Bootes nicht vertikal ist, sondern sogar etwas schräg nach vorne zeigt (z.Bsp: -20° bis 60° Anstellwinkel).

Der Arbeitsbereich der Speedsensorfinne wird über den Ansatzwinkel, Dimensionierung, und Vorspannung der Rückholfeder am Speedsensor auf den gewünschten Geschwindigkeitsbereich des Bootes eingestellt. Der wird vernünftigerweise bei 1-2 m/s beginnen und beim Speedlimit des Bootes in Gleitfahrt enden.

Betrachtet man nun die erforderlichen Sollkursanpassungen an der Windfahne in einem Bereich der Bootsgeschwindigkeit von 6 - 12 m/s bei 10 m/s wahren Wind, so ergibt jene sich für die verschiedenen Kurse zum wahren Wind zu

wahrer Wind	schb. Wind bei 6 m/s Speed	schb. Wind bei 12 m/s Speed	erforderliche Sollkursänderung
60°	38°	26°	12°
90°	60°	40°	20°
120°	84°	52°	32°
150°	118°	58°	60°

Damit ist auch klar, wie die Einstellung der Anlage in Fahrt erfolgen muss: Man entnimmt der ungefähren Laufrichtung der Windsee (bzw. Kapillarwellen, Schaumstreifen) die Richtung des wahren Windes. Dann stellt man den Ansatzpunkt des Bowdenzuges auf die an der Sensorfinne für diesen Kurs zum wahren Wind markierte Position. Danach braucht man nur noch die Windfahne im Mastfuß auf die aktuelle Richtung des scheinbaren Windes einzustellen, so dass sie vertikal steht, und den Rest (Geschwindigkeitszu- und Abnahme des Bootes) regelt die Anlage über den Speedsensor und den damit nun im richtigen Hebelverhältnis verbundenen drehbaren Mastfuß alleine nach:

Die Steuerleine zum Ruder kann eingeklinkt werden.

Ich würde mich sehr freuen, bei kommerzieller Nutzung dieses samt seiner technischen Detaillösung Lizenzfrei ins Internet gestellten Prinzips zitiert zu werden.

Dank

Mein herzlicher Dank gilt Jan Alkema, NL für die Zurverfügungstellung der zitierten Publikationen.

Literatur

(1) AYRS Publication 127(1999) "Self steering" (S. 147 - 158)