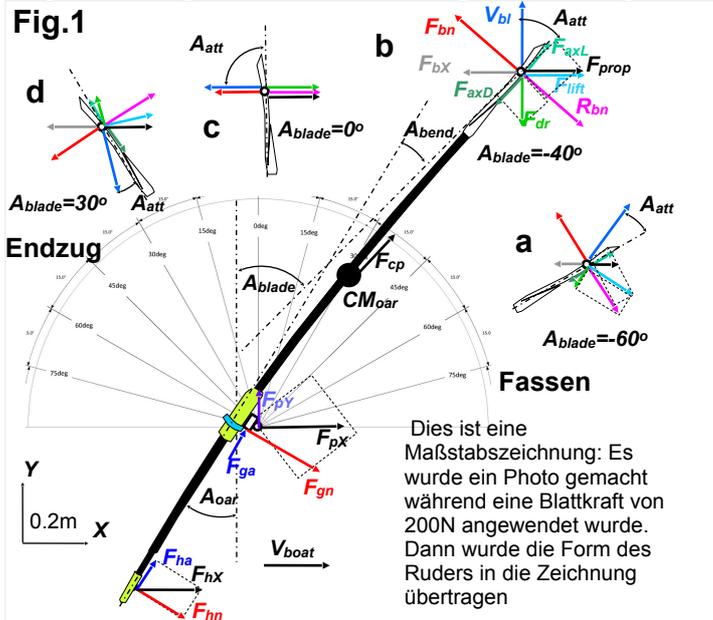
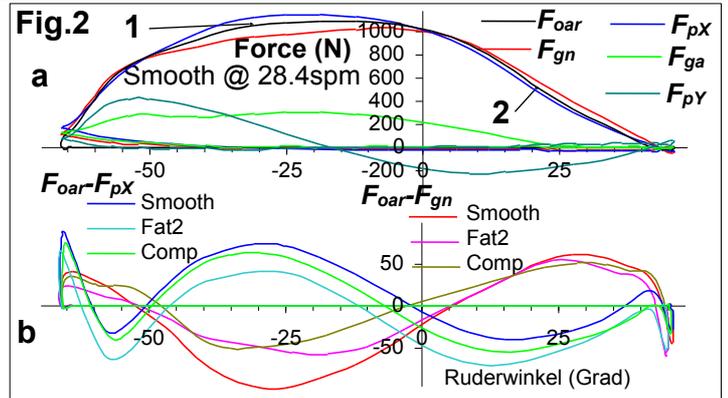


Verfeinerte Ruder-Mechanik

Wir setzen hier unsere Analyse der Ruder-Mechanik mit zwei Absichten fort: 1) Die Prüfsumme der Kräfte am Ruder mit den gemessenen Dollenstift-/Dollenkräften verifizieren; 2) die Kräfte am Ruder mit dem Vortrieb des Ruderer-Boot-Systems in Beziehung setzen. In unserem letzten Experiment wurden vier Drehmomente und fünf Kräfte gemessen. Die Drehmomente wurden in RBN 10-11/2020 beschrieben, die Kräfte waren: normale Dollenkraft F_{gn} , axiale Dollenkraft F_{ga} , Dollenstiftkraft in X (vorwärts) Richtung F_{pX} , Dollenstiftkraft in Y (seitlicher) Richtung F_{pY} (Fig.1) und Dollenstiftkraft in Z (vertikaler) Richtung F_{pZ} (orthogonal zur Ebene und in Fig.1 nicht angezeigt). Am Innenhebel wurden zwei Ruderwinkel, einer in der horizontalen A_{oar} und einer in der vertikalen Ebene A_{ov} gemessen, was dann insgesamt 11 gemessene Variablen pro Ruder ergibt.



Die normalen Griff- F_{hn} und Blattkräfte F_{bn} wurden berechnet, indem man die berechneten Drehmomente und ihre abgeleiteten Angriffspunkte nutzte (RBN 10/2020). Zuerst wurde überprüft, ob die Summe der Kräfte am Ruder $F_{oar} = F_{hn} + F_{bn}$ gleich der gemessenen normalen Dollenkraft F_{gn} ist. Die vorwärts gerichtete Kraft am Dollenstift F_{pX} wurde auch verglichen (Fig.2). Die durchschnittlichen Werte über den Durchzug hinweg (Tabelle 1 im Anhang) waren innerhalb einer Spanne von $\pm 1.5\%$ sehr dicht beieinander, was ein Nachweis für die Genauigkeit sein kann: F_{gn} war etwas höher als F_{oar} , und F_{pX} war etwas niedriger. Die Kurven hatten leicht verschiedene Muster: F_{oar} war höher als F_{gn} und niedriger als F_{pX} "vor der Dolle" (1), aber "hinter der Dolle" waren die Unterschiede umgekehrt (2), somit sind ihre Kurven nahezu gespiegelt (Fig.2,b).



Dieser Befund war recht überraschend, weil die vorwärts gerichtete Dollenstiftkraft F_{pX} vom Ruderwinkel abhängt. Somit sollte der durchschnittliche Wert für F_{pX} niedriger als F_{gn} sein, es sei denn, die axiale Dollenkraft F_{ga} trägt genug zur Balance des Ruderwinkel-Effektes bei, und es sieht so aus als tue sie dies.

Die zweite Absicht ist die Überprüfung der innerhalb des Ruderer-Boot-Systems von der am Blatt erzeugten Vortriebskraft abgeleiteten Vortriebskraft (RBN 2019/01-02). Die Verbiegung des Ruderschaftes, die vom Drehmoment am Außenhebel M_{out} verursacht wird, erzeugt einen zusätzlichen Ruderwinkel A_{bend} , den man experimentell erhielt und für alle getesteten Ruder nahezu gleich war (selbst für die extra-weichen Fat2 Skulls):

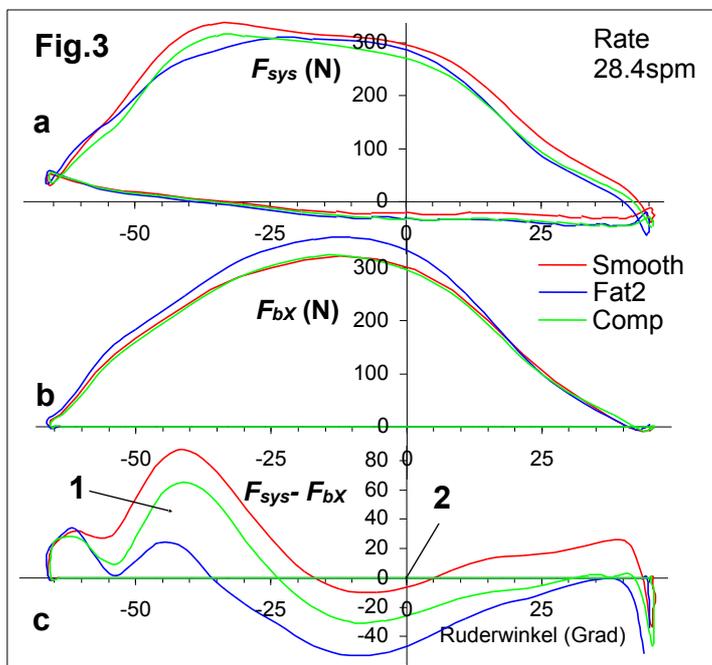
$$A_{bend} = 0.02652 M_{out} \quad (1)$$

Das bedeutet, daß sich der Blattwinkel beim Kraftmaximum um nahezu 10 Grad vom am Innenhebel gemessenen Ruderwinkel unterscheidet (Fig.1). Die Vortriebskraft am Blatt F_{bX} wurde folgendermaßen berechnet:

$$F_{bX} = F_{bn} \cos(A_{oar} + A_{bend}) \quad (2)$$

Die Vortriebskraft des Systems wurde als die Differenz zwischen den X-Kräften von Dollenstift und Griff berechnet:

$$F_{sys} = F_{pX} - F_{hX} = F_{pX} - (F_{hn} \cos(A_{oar}) + F_{ha} \sin(A_{oar})) \quad (3)$$



Man fand heraus, daß F_{sys} nach dem Fassen bis etwa -25 Grad Ruderwinkel höher war (Fig.3), dann dominierte F_{bx} "um den Dollenstift herum", und schließlich war F_{sys} wieder bis zum Endzug höher. Die Unterschiede zwischen F_{sys} und F_{bx} variieren zwischen den Blattformen (Fig.3,c) genauso signifikant wie die Verhältnisse ihrer durchschnittlichen Werte über den Durchzug: bei den Smooth war der Durchschnitt von F_{sys} 15.1% höher als F_{bx} , bei den Comps 4.8% höher, und bei den Fat2 6.8% niedriger (Tabelle 2 im Anhang). Nach diesen überraschenden Funden war unser erster Verdacht, daß bei der Kalibrierung ein Fehler unterlaufen sein könnte, aber das ist unwahrscheinlich, weil die selben Dollen- und Dollenstiftkraftsensoren für alle Ruder benutzt wurden und jeweils nur eine halbe Stunde Zeitabstand zwischen den Messungen war. Die Drehmomentsensoren an den Rudern wurden auch mit demselben Kraftsensor kalibriert und sorgfältig überprüft.

Die Hypothese, die dieses Paradox erklärt, ist die folgende: Wenn sich das Blatt mit einer gewissen Geschwindigkeit V_{bl} und einem Angriffswinkel A_{att} (zwischen der Blattachse und dem Vektor seiner Geschwindigkeit im Wasser, Fig.1) durch das Wasser bewegt, erzeugt das zwei Kräfte: parallel mit der Geschwindigkeit und entgegengerichtete Dragkraft F_{dr} und senkrechte Liftkräfte F_{lift} . Ihre Vektorsumme in orthogonaler Richtung zum Blatt ist die normale Blattreaktionskraft R_{bn} , welche die selbe Größe und entgegengesetzte Richtung zur normalen Blattaktionskraft F_{bn} hat, die zur Ableitung der Vortriebskraft am Blatt genutzt wird. Jedoch werden diese Drag- und Liftkräfte F_{dr} und F_{lift} auch auf die Blattachse projiziert und erzeugen axiale Kräfte, die in entgegengesetzten Richtungen zueinander wirken. Die Größenordnungen dieser axialen Kräfte hängen sowohl

vom Angriffswinkel A_{att} als auch von den Koeffizienten des Blattlift C_l und Drag C_d ab. Die beiden letzteren hängen von der Blattbeschaffenheit (Blattform, Oberflächenbeschaffenheit der Blattoberfläche, etc.) ab. Die Resultierende der Komponenten der axialen Kräfte wird entlang dem Ruderschaft übertragen und beeinflusst die gemessenen Dollenstift- und Dollenkräfte genauso wie die gesamte Vortriebskraft, die auf das Ruderer-Boot-System einwirkt.

Nach dem Fassen, wenn der Angriffswinkel sehr spitz ist (Fig.1,a-b), ist die Liftkraft am Signifikantesten, ihre axiale Komponente ist vorwärts gerichtet und überwindet die axiale Drag-Komponente, die rückwärts gerichtet ist. Dies könnte der Grund dafür sein, warum die gemessenen Vortriebskräfte des Systems höher waren als die Vortriebskräfte des Blattes bei Ruderwinkeln von -50 bis -25 Grad "vor der Dolle" (Fig.3,1).

Bei Ruderwinkeln nahe an 0 Grad während des Mittelzuges (Fig.1,c) und der Vektor der Blattgeschwindigkeit nahezu senkrecht zu seiner Achse (der Angriffswinkel beträgt etwa 90 Grad) ist, gibt es keine Liftkraft und lediglich die Drag-(Brems)kraft, die hier keine axiale Komponente hat, wirkt auf das Blatt ein. Die Smoothie Blätter hatten eine nahezu ausgeglichene Bilanz zwischen der Vortriebskraft des Systems F_{sys} und den Vortriebskräften am Blatt F_{bx} (Fig.3,2), was auch logisch ist, andere Blätter jedoch hatten eine negative Bilanz $F_{sys}-F_{bx}$: Das Fat2 Blatt hatte eine signifikant höhere Blattkraft (wegen der größeren Blattfläche und des kürzeren tatsächlichen Außenhebels - leichtere Übersetzung), aber ohne Zugewinn beim Systemvortrieb. Und die Comps hatten einen geringeren Systemvortrieb (?) bei ähnlicher Blattkraft wie die Smoothies. Wir können nur vermuten, daß der Grund dafür die Rotation des Blattes im Wasser ist, die einigen Widerstand erzeugt, Energie verbraucht und den Systemvortrieb auf diesem Wege verringert.

"Hinter der Dolle" zum Endzug hin wird der Angriffswinkel wieder spitzer, somit beeinflussen die axialen Kräfte das System erneut: die axiale Liftkomponente drückt das Ruder vorwärts, die axiale Dragkraft zieht es zurück. Das Smoothie Blatt sieht hier am Effizientesten aus und hat eine positive $F_{sys}-F_{bx}$ Bilanz, die mit der geringeren Dragkraft zusammenhängen kann, da es keine Vortex-Kanten hat.

Ein weiterer Faktor in der Kräftebilanz ist die Zentripetalkraft F_{cp} , die durch die Rotation des Ruders erzeugt wird. Der Schwerpunkt des Ruders CM ist außerhalb des Drehpunktes auf dem Außenhebel lokalisiert, und diese Kraft ist immer axial. "Vor der Dolle" ist diese Kraft vorwärts gerichtet und erhöht die

Vortriebskraft des Systems, „hinter der Dolle" wirkt sie rückwärts und vermindert den Vortrieb. Obwohl diese Kraft recht gering ist, so kann sie immer noch die Bilanz des Systems beeinflussen: Sie war höher "vor der Dolle" und geringer danach, was recht logisch klingt.

Schlussfolgerung: **Das Fat2 hat eine höhere Vortriebskraft am Blatt wegen der größeren Blattfläche und des kürzeren tatsächlichen Außenhebels, aber das wurde nicht in den Vorteil eines höheren Vortriebs für das Ruderer-Boot-System umgewandelt.** Im Gegensatz dazu konnten die geringeren Vortriebskräfte am Blatt bei den Smoothies und den Comps durch eine höhere Blattgeschwindigkeit durch das Wasser wegen des längeren tatsächlichen Außenhebels, der einen zusätzlichen Lift erzeugt, kompensiert werden. Dieser zusätzliche Lift wird als eine axiale Ruderkraft in den Vortrieb des Systems übertragen. Noch dazu mögen Smoothies und Comps eine geringere Dragkraft haben als das Fat2 Blatt wegen ihrer kleineren Blattfläche, was auch zu ihrem höheren Systemvortrieb beiträgt.

Eine komplette Analyse der Vortriebskräfte, die auf das Ruderer-Boot-System einwirken, ist keine einfache Aufgabe, und eine genaue Bilanzierung erhält man trotz 11 gemessener Variablen auf dem Ruder immer noch nicht. Die Messung der axialen Kraft auf dem Außenhebel kann dabei helfen, das Puzzle zu komplettieren, aber das ist technologisch recht herausfordernd. Experimente mit simultaner Testung der Blattformen kann dabei helfen, ihre Effizienz, basierend auf dem Geschwindigkeits-/Leistungsverhältnis zu ermitteln. Es ist unser Plan, das in der nahen Zukunft zu realisieren.

Danksagungen: Vielen Dank an Concept2 Inc. und persönlich an Dick Dreissigacker und Alex Dunne für ihr Interesse und die freundliche Unterstützung bei dieser Studie.

©2020 Dr. Valery Kleshnev www.biorow.com

Anhang.

Tabelle 1. Durchschnittswerte über den Durchzug: Normale Dollenkraft F_{gn} , Dollenstiftvorwärtskraft F_{pX} , und die Summe F_{oar} von Griffkraft F_{hn} und Blattkraft F_{bn} .

S R	Smooth			Fat2			Comp		
	F_{gn}	F_{pX}	F_{oar}	F_{gn}	F_{pX}	F_{oar}	F_{gn}	F_{pX}	F_{oar}
20	486.4	491.6	477.2	492.4	482.7	490.6	466.0	464.0	462.5
24	543.2	555.1	559.3	551.6	542.4	554.1	537.2	529.5	544.6
28	568.9	590.5	583.9	586.5	575.7	581.5	569.8	564.7	569.0
32	603.8	631.1	603.5	613.4	602.1	611.3	608.6	607.5	609.4

38	713.3	739.1	710.6	685.9	671.5	679.9	696.0	677.5	679.9
Av	583.1	601.5	586.9	585.9	574.9	583.5	575.5	568.7	573.1
	Rgn/oar	RpX/oar		Rgn/oar	RpX/oar		Rgn/oar	RpX/oar	
20	101.9%	103.0%		100.4%	98.4%		100.8%	100.3%	
24	97.1%	99.3%		99.6%	97.9%		98.6%	97.2%	
28	97.4%	101.1%		100.9%	99.0%		100.1%	99.3%	
32	100.1%	104.6%		100.3%	98.5%		99.9%	99.7%	
38	100.4%	104.0%		100.9%	98.8%		102.4%	99.6%	
Av	99.4%	102.5%		100.4%	98.5%		100.4%	99.2%	

Tabelle 2. Durchschnittswerte über den Durchzug der Systemvortriebskraft F_{sys} und Blattvortriebskraft F_{bX} , und ihr Verhältnis $= F_{sys}/F_{bX}$

SR	Smooth			Fat2			Comp		
	F_{sys}	F_{bX}	$R_{sys/bl}$	F_{sys}	F_{bX}	$R_{sys/bl}$	F_{sys}	F_{bX}	$R_{sys/bl}$
20	137.9	123.3	111.8%	124.2	136.6	90.9%	123.2	120.4	102.3%
24	157.6	139.9	112.6%	140.2	152.0	92.2%	141.9	138.1	102.8%
28	170.0	148.1	114.8%	148.6	161.5	92.0%	151.6	146.9	103.2%
32	183.9	157.9	116.5%	158.2	167.9	94.2%	167.5	157.4	106.4%
38	220.8	187.0	118.1%	177.7	185.9	95.6%	190.2	176.6	107.7%
Av	174.0	151.2	115.1%	149.8	160.8	93.2%	154.9	147.9	104.8%