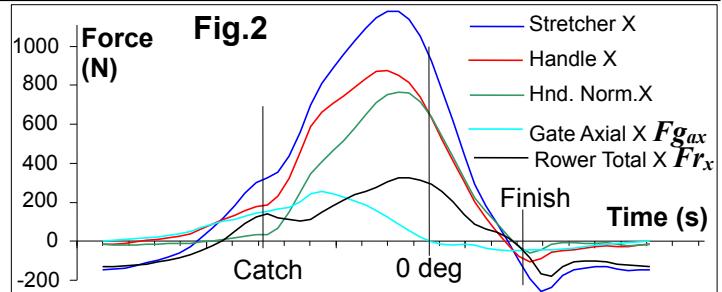
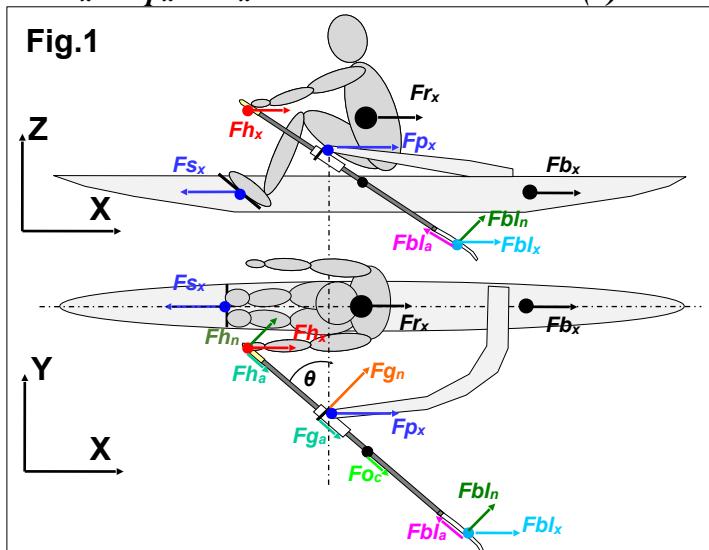


## Bilanz der Vortriebskräfte

In diesem Newsletter setze ich die Analyse der Kräfte beim Rudern fort, und fokussiere mich hier auf die Bilanz der Vortriebskräfte. Die auf das Boot wirkende Kraft  $F_{bx}$  wurde früher bereits definiert (RBN 2019/01) als die Differenz zwischen der Dollenstiftkraft  $F_{px}$  und Stemmbrettkraft  $F_{sx}$ :

$$F_{bx} = F_{px} - F_{sx} \quad (1)$$

**Fig.1**



Die auf das Ruderer-Boot-System angewandte Vortriebskraft  $F_{psys_x}$  wurde als die Summe der Kräfte auf das Boot  $F_{bx}$  und dem Körperschwerpunkt (CM) des Ruders  $Fr_x$  definiert (Gleichung 1,2). Die Stemmbrettkraft  $F_{sx}$  wird gestrichen, somit ist  $F_{psys_x}$  die Differenz zwischen den verschiedenen gerichteten Kräften am Dollenstift  $F_{px}$  und Griff  $F_{hx}$ :

$$F_{psys_x} = Fr_x + F_{bx} = (F_{px} - F_{sx}) + (F_{sx} - F_{hx}) = F_{px} - F_{hx} \quad (3)$$

Somit wird die Stemmbrettkraft überhaupt nicht mehr im System der Vortriebskraft berücksichtigt, sie ist eine interne Kraft zwischen der Masse des Bootes und des Ruders. Die Vortriebskraft, die auf das Ruderer-Boot-System wirkt, ist die Differenz zwischen den verschiedenen gerichteten Kraftkomponenten von Dollenstift und Griff. Wie auch immer, der Ruderer sollte deswegen nicht die Stemmbrettkraft minimieren. Sie wird direkt durch den Ausleger in die Dollenstiftkraft überführt, deren reaktives Gegenstück die positive Komponente für die Vortriebskraft des Systems darstellt.

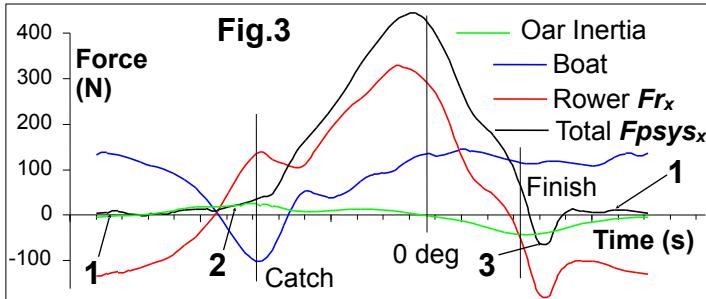
In der Mitte des Vorrollens ist, wie erwartet,  $F_{psys_x}$  dicht an null, (Fig.3,1), aber die Vortriebskraft des Systems wird kurz vor dem Fassen positiv (2), was ein Effekt der Zentripetalkraft des Ruders  $F_{oc}$  und der Rotationsträgheitskraft  $F_{o,in}$  sein kann (RBN 2015/05). Während des Vorrollens bewegt sich der Schwerpunkt des Ruders (der sich im Außenhebel befindet) vorwärts, seine kinetische Energie wird vor dem Fassen, wenn das Ruder abbremst, in das System übertragen (2). Nach dem Endzug ist die Ruderträgheitskraft negativ, was die Vortriebskraft des Systems verringert (3).

Die auf den Körperschwerpunkt (CM) des Ruders wirkende Vortriebskraft  $Fr_x$  wurde als die Summe der Reaktionskräfte am Stemmbrett  $F_{sx}$  und an den Griffen  $F_{hx}$  definiert (Fig.1), wobei letztere  $F_{hx}$  die Summe der Komponenten der normalen  $F_{hn}$  und axialen  $F_{ha}$  Kräfte an den Griffen ist. Von letzterer Kraft  $F_{ha}$  wurde ausgegangen, daß sie gleich der gemessenen axialen Dollenkraft  $F_{ga}$  ist. Tatsächlich ist sie aber ein wenig unterschiedlich dazu, weil die axiale Blattkraft  $F_{bla}$  und die zentripetale Kraft der Rotation des Ruders um die Dolle  $F_{oc}$  nur auf die axiale Dollenkraft  $F_{ga}$  wirken.

$$Fr_x = F_{sx} - F_{hx} = F_{sx} - (F_{hn} \cos(\theta) + F_{ga} \sin(\theta))$$

(2)

wobei  $\theta$  der Ruderwinkel ist. Fig.2 zeigt diese Kräfte bei einem M1x bei 35.5spm, die gleiche Messung wie im RBN 2019/01.



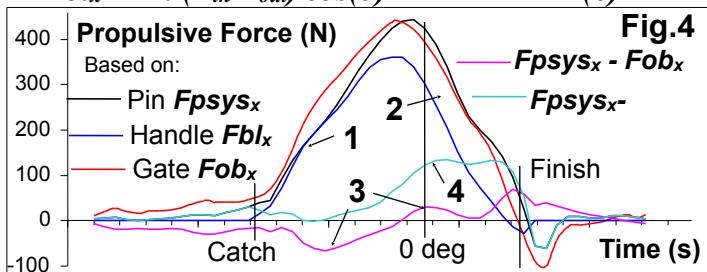
Die verschiedenen gerichteten Komponenten der Trägheitskraft des Ruders werden definiert als Winkelbeschleunigung des Ruders  $\alpha$  (abgeleitet vom Ruderwinkel), dem Trägheitsmoment des Ruders  $I_o$  am Dollenstift ( $1.6 \text{ kgm}^2$ ) und der Entfernung zwischen dem Ruderschwerpunkt (CM) und der Rotationsachse  $Loc_M$  ( $0.42\text{m}$  vom Dollenstift):

$$F_{o,in} = I_o \alpha / Loc_M \cos(\theta) \quad (5)$$

Die Trägheitskraft des Ruders erklärt das Ansteigen der gesamten Vortriebskraft vor dem Fassen (Fig.3,2) und seinem Abfall nach dem Endzug (3).

Die gesamte an Dollenstift/Dolle und Griff gemessene Vortriebskraft  $Fpsys_x$  wurde verglichen mit der traditionell genutzten Vortriebskomponente der Blattkraft  $Fbl_x$ , die durch Griffkraft  $Fh$ , Übersetzung (Innenhebel  $L_{in}$  zu Außenhebel  $L_{out}$ ) und Ruderwinkel  $\theta$  definiert wird:

$$Fbl_x = Fh (L_{in}/L_{out}) \cos(\theta) \quad (6)$$



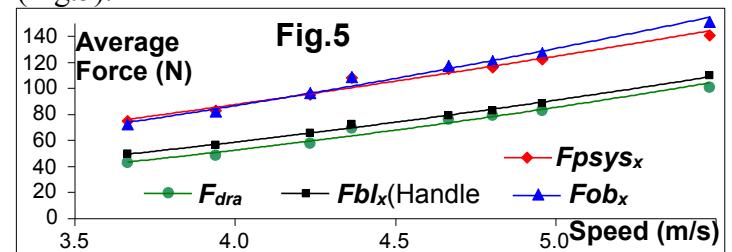
Diese zwei Kräfte waren recht ähnlich während der ersten Phase des Durchzuges (Fig.4,1), aber danach wurde  $Fpsys_x$  deutlich größer als  $Fbl_x$  (2). Um den Meßfehler am Sensor zu eliminieren, wurde die Vortriebskraft am Blatt  $Fob_x$  von den Rudersensoren abgeleitet, welche vollkommen unabhängig von den Sensoren am Dollenstift waren:

$$Fob_x = (Fg_n - Fh_n) \cos(\theta) \quad (6)$$

wobei  $Fg_n$  die normale Dollenkraft ist und  $Fh_n$  die normale Griffkraft. Die beiden Kräfte  $Fpsys_x$  und  $Fob_x$  stimmten recht gut miteinander überein - ein kleiner Unterschied zwischen beiden (3) könnte mit der axialen Kraft am Blatt  $Fba_x$  und der zentripetalen Kraft am Ruder  $Fo_c$ , in Verbindung gebracht werden. Diese wurden nicht vom Rudersensor in  $Fob_x$ , gemessen, beeinflussen aber die gesamte Vortriebskraft  $Fpsys_x$ .

Der signifikante Unterschied in  $Fpsys_x - Fbl_x$  während der zweiten Hälfte des Durchzuges (4) kann mit einer Verschiebung des Druckmittelpunktes des Blattes nach innen erklärt werden, was den aktuellen Außenhebel verkürzt und damit die Blattkraft vergößert, somit erscheint die Definition von  $Fbl_x$  durch Griffkraft und Übersetzung unterschätzt. Dies war eine meiner früheren Überlegungen, als ich die Änderung der Übersetzung von Innen- und Außenhebel und ihre Auswirkungen auf die Griff- und Dollenkräfte analysierte (RBN 2014/02).

Um diesen Anstieg der Blattkraft auf seinen Wahrheitsgehalt hin zu überprüfen, wurden verschiedene Ausführungen der Vortriebskräfte über den Schlagzyklus hinweg bei verschiedenen Frequenzen (17.2-41.5 spm) und Geschwindigkeiten (2:16-1:31 s/500m) gemittelt. Die Widerstandskraft an der Bootshaut (RBN 2019/01) wurde ebenfalls gemittelt, all diese vier Kräfte wurden zum Plotten der relativen Geschwindigkeit herangezogen, dann wurden Trendlinien zur Leistung über diese Punkte gelegt (Fig.5).

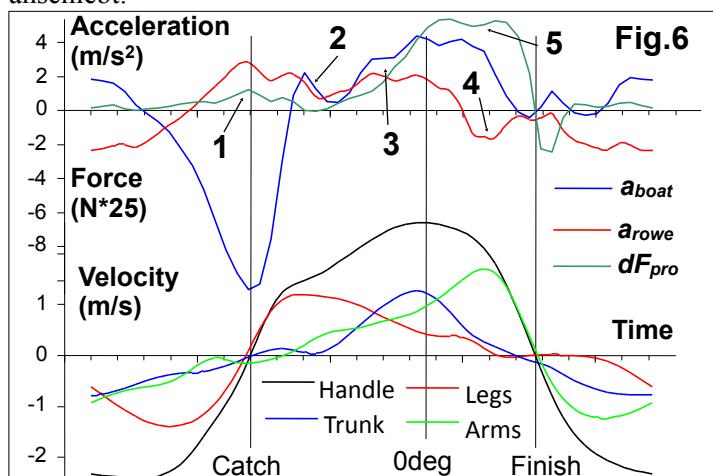


Die beste Übereinstimmung wurde zwischen Widerstandskraft und  $Fbl_x$  gefunden.  $Fbl_x$  ist die Vortriebskraft am Blatt, die mit der traditionellen Methode der ausschließlichen Nutzung der Griffkraft berechnet und erhalten wird ( $r=0.991$ ). **Im Durchschnitt war die Blattvortriebskraft um 8.3% höher als die Bootswiderstandskraft, was recht einfach mit dem zusätzlichen Windwiderstand erklärt werden kann.** Zwei andere Ausführungen der Vortriebskraft hatten auch eine sehr hohe Korrelation mit der Widerstandskraft ( $r=0.998$ ), aber  $Fpsys_x$  (erhalten von Dollenstift-Griff) war 53.2% höher, und  $Fob_x$  (von Dolle-Griff) war 57.1% höher als die Widerstandskraft. Daraus erwuchsen bei mir Zweifel an einer meiner früheren Hypothesen über den kürzeren aktuellen Außenhebel und größere Blattkraft in der zweiten Hälfte des Durchzuges.

Eine mögliche Lösung in diesem Puzzle wäre die mysteriöse zusätzliche Kraft an Dollenstift-Dolle, die

in Verbindung gebracht werden muß mit einigen Trägheitskräften im Ruderer-Boot-System. Dafür wurden die oben gefundenen Differenzen bei den Vortriebskräften  $dF_{prop} = F_{psysx} - F_{blx}$  mit den Beschleunigungen des Bootes  $a_{boat}$  und des Ruderers CM  $a_{rowe}$  (Fig.6) verglichen, wobei  $a_{boat}$  direkt gemessen wurde und  $a_{rowe}$  wurde abgeleitet von den gemessenen Sitz- und Oberkörperbewegungen des Ruderers zusätzlich zur Bootsbeschleunigung. Die Geschwindigkeiten der Griffe und des Ruderers Körper sind gegeben als Referenz in den einzelnen Phasen des Schlagzyklus.

Hier sollte ich auf mein Modell der Leistungsumwandlung in kinetische Energie verweisen, (RBN 2018/11), wo Punkt 9 wie folgt angehängt werden kann: "Die beiden Komponenten des Systems, Ruderer und Boot, erhalten nicht nur kinetische Energie durch das Ruder, sie tausche sie auch untereinander aus... Der Energie-Austausch erfolgt auch während des Durchzuges: Nach dem Fassen beschleunigt der Ruderer aktiv seinen CM mit dem Beinschub und nimmt dabei kinetische Energie vom Boot auf. Das Boot erfährt damit eine negative Beschleunigung". Beim Fassen erfolgt dieser Austausch durch die Stemmbrettkraft, die in der Vortriebsgleichung Nr.3 nicht berücksichtigt ist, so spiegelt sie sich auch nicht wieder bei der Differenz der Vortriebskräfte  $dF_{prop}$ . Ein kleiner Betrag dieser Differenz beim Fassen (Fig.6,1) könnte in Verbindung stehen mit der linearen Ruderträgheitskraft, die den Dollenstift und die Dolle wie eine Vortriebskraft anschiebt.



Am Beginn des Durchzuges wurde die Bootsbeschleunigung der Beschleunigung des CM des Ruderers sehr ähnlich (2), es erfolgte also kein Austausch

von kinetischer Energie zwischen den beiden, und  $dF_{prop}$  geht gegen null.

Im Mittelzug wurde die Bootsbeschleunigung größer als die Beschleunigung des CM des Ruderers (3), letztere wurde dann negativ (4). Dies bedeutet, daß der Ruderer kinetische Energie über die Kräfte an Dolle und Dollenstift auf das Boot überträgt, das hat aber nichts mit dem Blattvortrieb zu tun und spiegelt die größten Unterschiede bei den Kräften  $dF_{prop}$  wieder (5).

Zum besseren Verständnis der Mechanik kann das folgende Beispiel dienen (vorgeschlagen von Dr. Volker Nolte, aber in einem anderen Zusammenhang): Stell Dir vor, der Ruderer bewegt sich im Boot vor und zurück mit einem fixierten Ruder, das nicht gedreht werden kann, ohne Blattarbeit im Wasser und nur die Dollenkraft wird gemessen. Beim „Fassen“ tritt der Ruderer auf das Stemmbrett, aber diese Kraft zählt nicht, weil sie eine interne Kraft ist. Am Ende des „Durchzuges“ muß der Ruderer seine Bewegung abbremsen und zieht am Griff, was dann als Dollenkraft gemessen wird und aussieht wie „Vortriebskraft“.

Zur Zeit ist das alles eine Hypothese und es braucht noch eine Menge Arbeit, um die Mechanik besser zu verstehen und Analysemethoden für Vortriebs- und interne Kräfte im Ruderer-Boot-System zu entwickeln. Angenommen, im oben genannten Beispiel zieht der Ruderer am fixierten Ruder und erzeugt Griffkraft, die von der Dollenkraft in Gleichung 3 abgezogen wird, dann müßte die „Vortriebskraft“ null sein. Vielleicht spielen hier noch einige andere Faktoren mit: Übersetzung? Sitzreibung? Axiale Ruderkräfte?

**Schlußfolgerung:** Die Mechanik im Ruderer-Boot-System ist eine recht komplexe Angelegenheit, wobei die größte Herausforderung die Separierung der Vortriebs- und internen Kräfte ist, die in den Messungen am Griff, Dolle-Dollenstift und Stemmbrett vermischt sind. Zur Zeit haben wir noch keine vollständige Erklärung für das Phänomen der höheren Dollenkraft in der zweiten Hälfte des Durchzuges. Jeder Vorschlag und jede Hypothese aus der Leserschaft ist herzlich willkommen.

**Danksagung:** Vielen Dank an WinTech Racing Boats and Oarsport Ltd. für ihre Unterstützung in dieser Studie.

©2019 Dr. Valery Kleshnev [www.biorow.com](http://www.biorow.com)