

Ruderleistung und kinetische Energie

Hier setzen wir die Analyse der Ruderleistung und seiner Umwandlung in kinetische Energie des Ruderer-Boot-Systems fort. Es werden hier die Definitionen und Messungen vom RBN 01-02/2019 benutzt. Die Hauptgleichungen zur Bewegung des Ruderer-Boot-Systems setzen die Kräfte, die an seinen Komponenten angreifen, mit ihren Massen und Beschleunigungen ins Verhältnis. Die Gesamtkraft, die auf das Boot einwirkt F_b ist die Differenz zwischen der Vortriebskraft F_{bp} und den Bremskräften F_{dr} :

$$F_b = F_{bp} - F_{dr} = F_{p_x} - F_{s_x} - F_{dr} = m_b a_b \quad (1)$$

wobei F_{p_x} die horizontale (X) Komponente der Dollenstiftkraft, F_{s_x} - X Stembrettkraft, und $m_b a_b$ - das Produkt von Bootsmasse und Beschleunigung ist. Im Gegensatz zum Boot, welches in diesem Falle die passive Komponente ist, ist der Ruderer ein aktiver Teil im System: er wendet Kräfte auf das Rudergerät an. Somit wird die Ruderermasse von Reaktionskräften, die dieselbe Größe und entgegengesetzte Richtung wie die Aktionskräfte haben, angetrieben: der Ruderer tritt das Stembrett rückwärts und die Reaktionskraft $F's_x$ beschleunigt seinen Masseschwerpunkt vorwärts, er zieht am Griff und die Reaktionskraft $F'h_x$ bewegt ihn rückwärts. Die resultierende Kraft, die auf den Rudererschwerpunkt einwirkt F_r ist auch eine Differenz zwischen ihrer Vortriebskraft F_{rp} und Bremskraft (Luftwiderstand) F_{rr} , welche recht klein ist und damit vernachlässigt werden kann:

$$F_r = F_{rp} - F_{rr} \sim F's_x - F'h_x = m_r a_r \quad (2)$$

wobei $m_r a_r$ die Ruderermasse und Beschleunigung sind. Die Kraft, die auf das gesamte System wirkt, ist die Summe der Ruderer- und Bootskräfte, somit ergibt sich aus Gleichung 1 und 2:

$$F_s = F_b + F_r = (F_{p_x} - F_{s_x} - F_{dr}) + (F's_x - F'h_x) = F_{p_x} - F'h_x - F_{dr} = m_s a_s \quad (3)$$

Wenn wir die Kräfte F haben, die auf das Boot, den Ruderer und den Gesamt-Systemschwerpunkt CM (Fig.1,a) einwirken und ihre Massen m , dann können wir ihre Beschleunigungen a ableiten (Fig.1,b, hier muß die Gesamtkraft inklusive Bremskraft genutzt werden):

$$a = F / m \quad (4)$$

Die Geschwindigkeiten v kann man als ein Integral der Beschleunigungen plus einen Versatz v_{off} erhalten, um die durchschnittliche Geschwindigkeit über den Schlagzyklus hinweg gleich null zu machen:

$$v_{Li} = v_{Li-1} + a \cdot dt + v_{off} \quad (5)$$

Die Geschwindigkeiten v_L (Fig.1,c) sind in einem lokalen Trägheitsrahmen, der sich mit konstanter Geschwindigkeit gleich der durchschnittlichen Rudergeschwindigkeit v_{av} über den Schlagzyklus hinweg bewegt, repräsentiert. In der Mechanik wird dieser Rahmen „Schwerpunktsystem“ genannt: **“Die kinetische Energie eines Systems hängt von der Auswahl seines Referenzrahmens ab: Der Referenzrahmen, der einen minimalen Wert für diese Energie anzeigt, ist das Bezugssystem, d.h. der Referenzrahmen, wo der Gesamtimpuls des Systems null ist. Dieses Minimum an kinetischer Energie trägt zur invarianten Masse des Systems als Ganzes bei.**

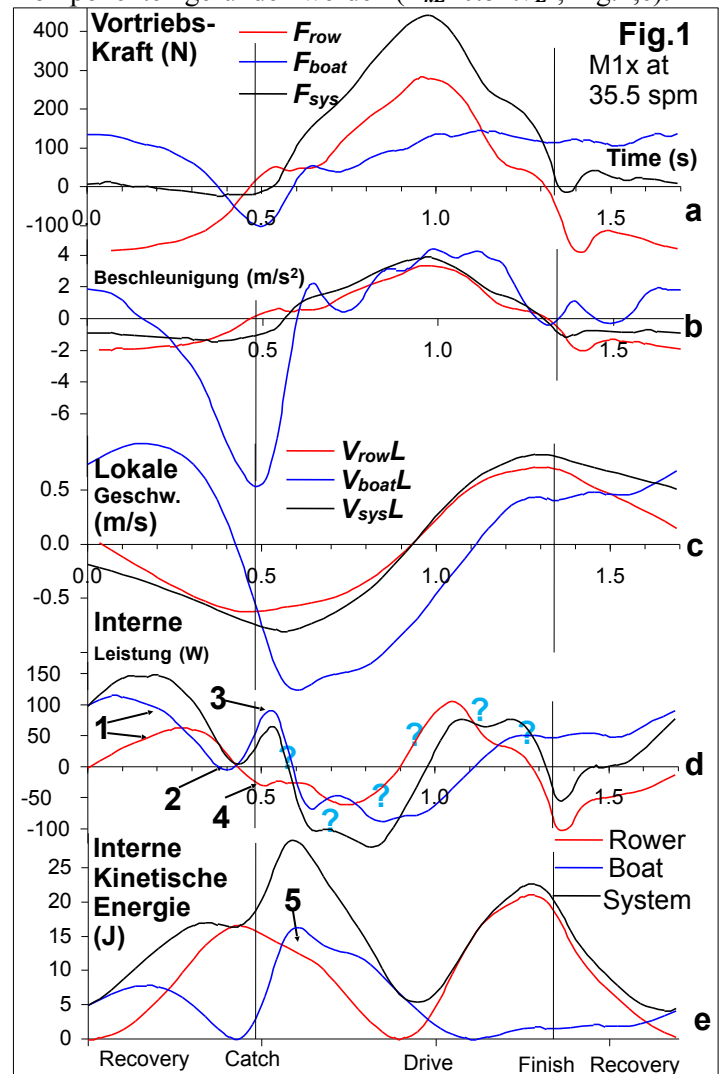
Um die absoluten Geschwindigkeiten v_G im globalen auf dem Wasser basierenden Referenzrahmen abzuleiten, sollte die über den Schlagzyklus durchschnittliche Rudergeschwindigkeit v_{av} zu den Teilgeschwindigkeiten v_L addiert werden:

$$v_G = v_L + v_{av} \quad (6)$$

Wie wir bereits vorher diskutiert haben (siehe RBN 11/2018), gibt es hier zwei mögliche Szenarien:

- Interner Leistungsübertrag zwischen den einzelnen Komponenten des Systems, wobei der lokale Systemrahmen genutzt werden muß;
- Externer Leistungsaustausch mit der Umgebung, wobei die Geschwindigkeiten im globalen Rahmen genutzt werden müssen.

Die interne (lokale) Leistung kann als Produkt ihrer Vortriebskräfte (ohne Bremskräfte des Bootes) und lokale Geschwindigkeiten ($P_L = F_{pL} v_L$, Fig.1,d) abgeleitet werden, und die interne kinetische Energie kann mit den Massen der Komponenten gefunden werden ($E_{KL} = 0.5 m v_L^2$, Fig.1,e).



Wir werden die interne Energie zuerst diskutieren. Während des Vorrollens ist das Ruder vom Wasser getrennt, es gibt also keine Vortriebskraft, und die einzige externe Kraft ist die Bremskraft, die auf den Bootskörper und damit auf das System wirkt. Alle anderen Kräfte sind interne Kräfte, deshalb sollte ihre Leistung mit der Geschwindigkeit im lokalen Referenzrahmen abgeleitet werden. Unter der Vernachlässigung der kleinen Bremskraft des Ruderers ist die Leistung P_{rL} , die im lokalen Rahmen auf den Rudererschwerpunkt wirkt:

$$P_{rL} = F_r v_{rL} = (F's_x - F'h_x) v_{rL} \quad (7)$$

Die lokale Bootsleistung P_{bL} ist:

$$P_{bL} = F_{bp} v_{bL} = (Fp_x - F's_x) v_{bL} \quad (8)$$

Die Leistung des Systems P_{sL} kann auf zwei Wegen abgeleitet werden: 1) Die Summe der Leistungen von Ruderer und Boot P_{sInt} zeigt die Energie, die auf die internen Bewegungen der Komponenten innerhalb des Systems aufgewendet wurden:

$$P_{sInt} = P_{rL} + P_{bL} \quad (9)$$

2) Das Produkt von Kraft und Geschwindigkeit am Systemschwerpunkt definiert die Bewegung des Systems als Ganzes, aber das ist nur im globalen Rahmen gültig, da nur externe Kräfte darauf einwirken:

$$P_{sG} = F_{sp} v_{sG} = (Fp_x - F'h_x) v_{sG} \quad (10)$$

Während des Vorrollens sind Ruderer- und Bootsleistung positiv (1), weil ihre Kräfte und lokalen Geschwindigkeiten in dieselbe Richtung gehen: für den Ruderer selbst sind sie negativ (er zieht sich selbst durch das Stemmbrett zurück, und sein Schwerpunkt bewegt sich auch im lokalen Rahmen zurück); die Bootskraft und lokale Geschwindigkeit sind positiv (es wird durch das Stemmbrett vorwärts gezogen und seine Geschwindigkeit ist höher als der Durchschnitt).

Allgemein läßt sich sagen, daß **positive Leistung konzentrische Muskelkontraktion bedeutet: Kraft und Geschwindigkeit arbeiten in dieselbe Richtung (beide positiv oder beide negativ, abhängig vom Referenzrahmen) und die Muskeln erzeugen mechanische Energie. Negative Leistung bedeutet exzentrische Muskelkontraktion: Kraft und Geschwindigkeit wirken in entgegengesetzter Richtung, somit nehmen die Muskeln mechanische Energie, die anderswo erzeugt wird, auf.**

Vor dem Fassen geht die Bootsleistung für einen kurzen Zeitraum nahe null (2), weil seine Kraft und lokale Geschwindigkeit die Richtung ändern. Dann steigt die Bootsleistung wieder an (3), weil die Kraft und die lokale Geschwindigkeit zur selben Zeit eine negative Richtung erhalten. Die interne Leistung des Ruderers wird vor dem Fassen negativ (4), weil die Kraft positiv wird, die lokale Geschwindigkeit aber noch negativ ist und nur leicht beginnt anzusteigen: die Ruderermasse ist viel schwerer und kann ihre Richtung nicht so schnell wie das Boot ändern. Hier haben wir ein typisches Beispiel für das Aneinanderstoßen (Kollision) zweier Massen.

Aus der Sicht der Mechanik gibt es zwei Arten von Stößen: elastische Stöße, wie Billardkugeln, die voneinander in entgegengesetzter Richtung abprallen mit der nahezu gleichen Geschwindigkeit wie vorher; und unelastische - wie zwei Stücke Lehm, die aneinander kleben bleiben und sich nach dem Stoß als ein Stück weiter bewegen. In beiden Fällen ändert sich der Gesamtimpuls des Systems nicht, wie es vom „Impulserhaltungssatz“ vorgeschrieben wird. Wie auch immer, die interne kinetische Energie des Systems (die Summe der kinetischen Energien der einzelnen Komponenten) ändert sich sehr:

- **Bei einem perfekten elastischen Stoß tauschen die Objekte ihre kinetischen Energien aus, somit bleibt die interne Energie des Systems erhalten** (Energie ist eine skalare Größe, und kein Vektor).
- **Bei einem unelastischen Stoß wird die kinetische Energie zur Verformung der Objekte aufgenommen und als Wärme**

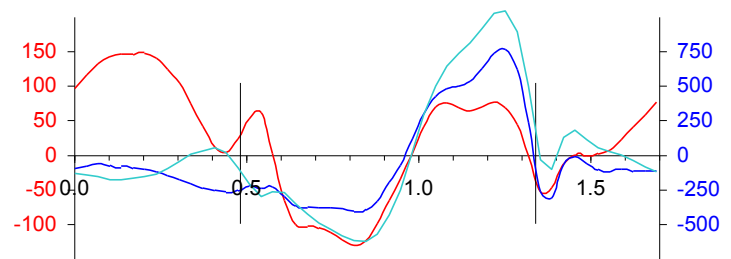
zerstreut, somit wird die interne Energie des Systems null: es gibt im System keine interne Bewegung mehr nach dem Zusammenstoß.

Selbstverständlich gibt es in der reinen Mechanik keine perfekten elastischen Stöße, ein Teil der Energie wird immer für Verformung aufgenommen, aber in der realen Welt kann durch Muskelkontraktion Energie wieder hinzugefügt werden. Biomechanische Studien bei Top-Sprintern verriet, daß bis zu 90% der Start-Energie von den elastischen Elementen der Sehnen und nur 10% von den Muskeln bereitgestellt wird. Selbstverständlich sind die Bewegungen im Rudern viel langsamer und komplexer, somit sieht die obige Effizienz unrealistisch aus. Wie auch immer, **je elastischer die Stöße zwischen der Ruderer- und Bootsmasse in der Auslage erfolgen, desto mehr interne kinetische Energie wird erhalten, die während des Durchzuges wieder verwertet und damit die Rudereffizienz erhöht werden kann. Das bedeutet, daß ein effektives Wasserfassen/Druckaufnahme wie ein „Flummi“ aussehen sollte.** Dies bestätigt perfekt unsere früheren Konzepte vom effektiven Rudern: „Fassen durch das Stemmbrett“, „Trampolin-Effekt“ und das „Hammer und Nagel-Prinzip“, und fügt ein weiteres Argument gegen ältere Konzepte wie „Minimierung des Bootsruckens“, „Verärgere das Boot nicht in der Auslage“, etc. hinzu. Fig.1,e zeigt, daß die kinetische Energie des Bootes nach dem Fassen (5) größer wird als während des Durchzuges, was bedeutet, daß die Rudertechnik dieses Skullers recht effizient ist.

Wenn die Ruderer- und Bootsmasse in der Auslage unelastisch zusammenstoßen, dann muß der Ruderer beim Vorrollen kinetische Energie aufnehmen, was seine Muskeln ermüdet, dann muß er wieder Energie erzeugen, um den Durchzug zu starten, somit leidet die Effizienz. **Das Schlechteste, was ein Ruderer machen kann, ist auf der zweiten Hälfte des Vorrollens zu verlangsamen und in der Auslage "am Stemmbrett zu kleben".**

Während des Durchzuges ist das Bild komplizierter, weil externe Leistung vom Ruderer hinzugefügt wird und mit interner Leistung vermischt wird. Daher belegten wir die Durchzugsphase in Fig. 1,d mit Fragezeichen. Die externen Leistungen der Systemkomponenten können mit Gleichungen ähnlich denen 7-10 abgeleitet werden, wobei die globalen Geschwindigkeiten anstatt der lokalen genutzt wurden (Fig.2,a). Wie auch immer, während des Vorrollens gelten die globalen Vortriebsleistungen von Ruderer und Boot nicht, da sie hauptsächlich von der internen Stemmbrettkraft bewegt werden, daher werden sie weggestrichen. Die globale Systemleistung kann auf zweierlei Weise abgeleitet werden: $P_{sG(r+b)}$ ist die Summe von Ruderer- und Bootsleistung; und P_{sG} mit der Vortriebskraft F_{sP} und Geschwindigkeit v_{sG} :

$$P_{sG} = F_{sP} v_{sG} = (Fp_x - F'h_x) v_{sG} \quad (11)$$



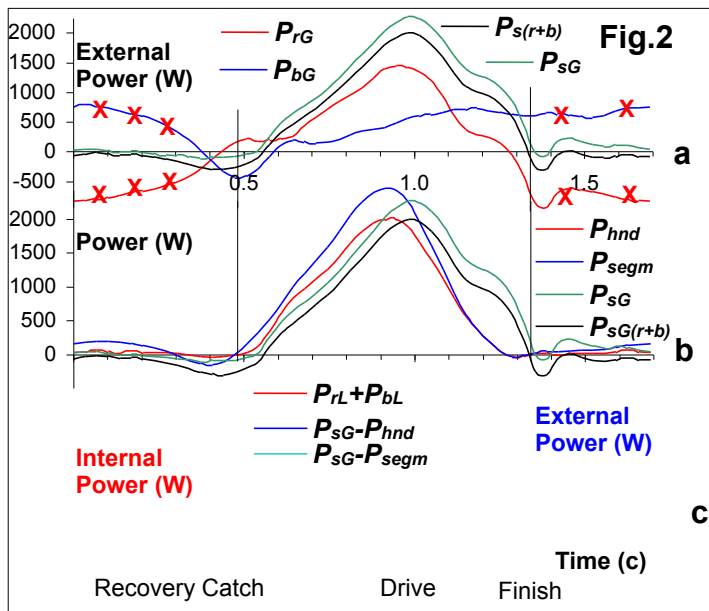


Fig.2,b vergleicht beide Systemleistungen mit der traditionellen Griffleistung P_{hnd} und der Summe der Leistung der Körpersegmente P_{segm} (RBN 06/2004). Die durchschnittliche Leistung $P_{sG(r+b)}$ war der P_{hnd} ($\pm 3\%$ bei 17-41spm) recht ähnlich, P_{sG} war ähnlich der P_{segm} ($\pm 5\%$) und der Bereich der Variation der kinetischen Energie des Systems war dicht an der gemessenen Arbeit pro Ruderschlag ($\pm 2\%$).

Fig.2,c vergleicht die interne Systemleistung von Fig.1.d (auf der linken Seite der Skala) mit den Differenzen zwischen der globalen kinetischen Leistung und der Leistungserzeugung des Ruderers (auf der rechten Seite der Skala). Die Kurven sehen sich sehr ähnlich, was die Hypothese nahelegt, die zweite mit einem Effekt der ersten zu erklären, aber das Problem ist, daß die Größenordnung der globalen Differenzen 4-5mal höher sind als die lokalen Leistungen.

Wir werden die Analyse in der nächsten Ausgabe fortsetzen. Kommentare und Ideen sind stets willkommen.