

Verhältnis von Leistung/Körpergewicht und Bootsgeschwindigkeit

Im vorigen Newsletter haben wir herausgefunden, daß bei 2k und 5k Distanzen auf dem Ergometer die Geschwindigkeit mit der Körpermasse wie $V \approx m^{2/9}$ und Ruderleistung $P \approx m^{2/3}$ zusammenhängt. Ein schwererer Ruderer bietet mehr Leistung auf, verdrängt aber auch mehr Wasser, daher erzeugt er mehr Bremswiderstand, was auf dem Ergometer nicht der Fall ist. Der hydrodynamische Bremswiderstand trägt zu 87% zum gesamten Bremswiderstand bei (2) und die verbleibenden 13% sind aerodynamischer Widerstand (bei Windstille). Beim ersten sind 85% der Reibungswiderstand auf der Bootshaut D_{fr} , der direkt proportional zur Oberfläche ist und mit dem verdrängten Wasser und der Masse des Systems zusammenhängt wie $D_{fr} \approx m^{2/3}$. Wenn nur der Reibungswiderstand berücksichtigt wird (die Form des Bootes und Wellenwiderstand werden ausgelassen), dann sollten sich die umgekehrten Proportionen von Leistung und Bremswiderstand gegenseitig aufheben, $V \approx m^0$, und Ruderer jeglicher Körpermasse sollten keinen Vorteil gegenüber den anderen haben. Dies wurde von Dudhia (1) für aerobe Leistung vorgebracht. McMahon (3) spekulierte, daß, wenn die Bootsabmessungen proportional zum Körpergewicht der Ruderer wäre, dann sollte $V \approx m^{1/18}$, was dann einem 95kg schweren Ruderer 1.7% Vorteil gegenüber einem 70kg schweren Ruderer geben würde. Die neueste Studie von Pelz & Verge (5) nutzte einen rein allometrisch skalierten Zugang und unverständliche Matrix-Umwandlungen, und leitete eine Proportion ab $V \approx m^{1/36}$, die einem Schwergewicht 0.7% Vorteil zuschreibt.

Die anderen Faktoren, die den Bremswiderstand beeinflussen, sind:

1. Bootsgewicht. Die FISA Regeln schreiben ein Mindestgewicht für alle Bootsklassen vor, also ist das Gewichtsverhältnis des Materials pro Ruderermasse für Leichtgewichte höher. Das verursacht drei Missverhältnisse (RBN 2009/02), die Leichtgewichte haben:
 - a) Relativ höheren hydrodynamischen Bremswiderstand pro kg Körpergewicht, verursacht durch größere Wasserverdrängung. Das reduziert die Geschwindigkeit bei 20kg Differenz in der Körpermasse um 0,23%;
 - b) Geringere Energieverluste, die durch geringere Schwankungen in der Bootsgeschwindigkeit mit leichterem sich bewegendem Mannschaft verursacht werden (Vorteil +0.42% für Leichtgewichte);
 - c) Relativ höhere Verluste durch Trägheitskräfte, weil die Ruderer ein relativ schwereres Boot vor- und

zurückbewegen müssen (Nachteil -0.91% für Leichtgewichte).

In Summe für diese drei Bootsgewichtsfaktoren ergibt das einen Nachteil von -0.73% für die Leichtgewichte. (Es ist interessant, daß Dudhia (1) nur die beiden obigen Faktoren **a** und **b** berücksichtigt hat und überraschenderweise schlußfolgerte, daß ein leichteres Boot nicht das beste sei: er fand, daß ein „optimales“ Bootsgewicht bei 28% des Ruderergewichtes liege, d.h. ein 21kg schweres Boot wäre das beste für einen 75kg schweren Ruderer).

2. Nur etwa 35% des aerodynamischen Widerstandes hängt von der Körpergröße der Ruderer in einer Mannschaft ab (2), die proportional zur Körperoberfläche des Ruderers ist $\approx m^{2/3}$ und wird durch die umgekehrt proportionale Leistung aufgehoben. Das Rudermaterial trägt die restlichen 65% des Luftwiderstandes bei (Ruder 50% und Boot 15%), und das ist für alle Rudererkategorien sehr ähnlich. Und so hängen 8.5% ($0.13 \cdot 0.65$) des Gesamtwiderstandes nicht von der Körpergröße der Mannschaft ab und sollten auch durch die geringere Leistung der Leichtgewichtsruderer überwunden werden, somit hätten sie eine um 2.68% (0.085^3) geringere Geschwindigkeit. Dieser Nachteil erhöht sich bei Gegenwind, weil der Anteil des aerodynamischen Widerstandes größer wird, bei Schiebewind wird er jedoch geringer. Die Summe der vier obigen Faktoren verrät uns, daß Leichtgewichte gegenüber den Schwergewichten in ähnlichen Wettbewerben um etwa 3,4% langsamer sein sollten.

Laßt uns diese Theorie mit realen Daten vergleichen. Die meisten der aktuellen Weltbestzeiten im Rudern wurden bei den vergangenen Weltmeisterschaften 2014 in Amsterdam aufgestellt: der schwere M2x war 1.56% schneller als die Leichtgewichte, im M4- war die Differenz 1.54%; im W2x - 2.77%. Der Vergleich der durchschnittlichen Geschwindigkeiten der Sieger bei den Weltregatten über die letzten 21 Jahre bringt sehr ähnliche Zahlen: 1.45% für M2x, 1.34% für M4- und 2.38% für W2x.

Eine interessante Studie wurde von Nevill et al. veröffentlicht (4), wo 49 Athleten auf dem Ergometer und auf dem Wasser in Einern getestet wurden. Man fand heraus, daß die Gleichung, die am Besten die Bootsgeschwindigkeit V_b , Ergometergeschwindigkeit V_e und Ruderermasse m ins Verhältnis setzt, die folgende war:

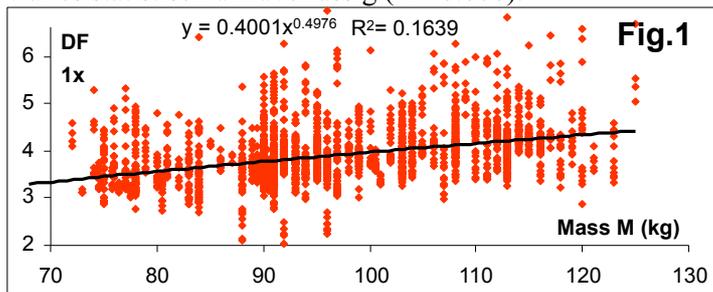
$$V_b \approx V_e m^{-0.23} \quad (1)$$

Angenommen, daß $V_e \approx m^{0.22}$, wie im vorangegangenen Newsletter übereinstimmend gefunden, dann ergibt $V_b \approx m^{0.01}$, was dann lediglich 0.25% Nachteil für die Leichtgewichte bedeuten würde.

In RBN 2007/07 nutzen wir lineare Trends, um den Drag Faktor **DF** mit der Ruderermasse m ins Verhältnis zu setzen, und dann wurden diese Gleichungen in unserem Rigger-Diagramm genutzt (8). Jetzt werden wir die Leistungstrends nutzen, um die Abhängigkeit von **DF** auf

die Masse M von Ruderer plus Boot+Ruder (+18kg) abzuleiten. Für die Einer (n=2296), war das $DF \approx M^{0.50}$ (Fig.1),

für 2x/2- (n=1895) und 4-/4x (n=1119) war es sehr ähnlich $DF \approx M^{0.63}$ ($R^2=0.35$ und 0.26) und für den 8+ (n=728) war es statistisch unzuverlässig ($R^2=0.006$).



Da die Geschwindigkeit V , Leistung P und DF wie $V=(P/DF)^{1/3}$ zusammenhängen, gilt für die Einer

$$V \approx (M^{0.66} / M^{0.50})^{0.33} \approx M^{0.054} \approx M^{1/18} \quad (2)$$

Das bedeutet 1.76% Differenz in der Geschwindigkeit zwischen 70kg Leichtgewichten und 95kg Schwergewichten in den Einern. Für die Zweier und Vierer gilt $V \approx M^{0.011} \approx M^{1/90}$, was dann nur 0.28% Geschwindigkeitsunterschied bedeutet. Da die erste Proportion den beobachteten Daten der weltbesten Ruderer am nächsten kommt und mit McMahon's Theorie korrespondieren, akzeptieren wir sie als Gewichts-Korrektur-Faktor.

Schlußfolgerung: Um Wasserleistung zu definieren, sollte die Ergometerleistung mit dem folgenden Gewichts-Korrektur-Faktor k_w multipliziert werden:

$$k_w = ((M_{st} + m_b) / (m + m_b))^{0.054} \quad (3)$$

wobei m die Athletenmasse ist, M_{st} - eine „Standardmasse“ z.B. 95kg, m_b Boot+Ruder Masse 18kg (Tabelle.1).

Referenzen

1. Dudhia A. 2001. *Effect of Weight in Rowing*. <http://www.atm.ox.ac.uk/rowing/physics/weight.html>
2. Filter K. 2004. *The system crew – boat*. Lecture.
3. McMahon, T.A., 1971. *Rowing: a similarity analysis*. *Science* 173, 349.
4. Nevill A. et al. 2010. *Scaling concept II rowing ergometer performance for differences in body mass to better reflect rowing in water*. *Scand J Med Sci Sports* 2010; 20: 122–127.
5. Pelz P., Vergé A. 2014. *Validated biomechanical model for efficiency and speed of rowing*. *J. of Biomechanics* 47(2014) 3415–3422.
6. <http://www.concept2.com/indoor-rowers/training/calculators/weight-adjustment-calculator>
7. <https://www.rowperfect.co.uk/erg-scores-how-to-adjust-for-athlete-weight/>
8. *Rowing Speed and Rigging Chart* <http://www.biorow.com/RigChart.aspx>

Tabelle 1. Gewichtskorrektur Faktoren für verschiedene “Standard” Massen M_{st} und Ruderergewichte m

M_{st}	m						
	60	70	80	90	100	110	120
60	100.0%	99.3%	98.7%	98.2%	97.7%	97.3%	96.9%
70	100.7%	100.0%	99.4%	98.9%	98.4%	97.9%	97.5%
80	101.3%	100.6%	100.0%	99.5%	99.0%	98.5%	98.1%
90	102.1%	101.4%	100.8%	100.3%	99.8%	99.3%	98.9%
100	102.3%	101.6%	101.0%	100.5%	100.0%	99.5%	99.1%
110	102.8%	102.1%	101.5%	100.9%	100.5%	100.0%	99.6%
120	103.2%	102.5%	101.9%	101.4%	100.9%	100.4%	100.0%

Werte über 100% bedeuten höhere Geschwindigkeit/ kürzere Rennzeiten, unter 100% – geringere Geschwindigkeiten / längere Rennzeiten.

Diese Tabelle kann auch zum direkten Vergleich von Ruderern verschiedenen Körpergewichtes genutzt werden. Z.B., wenn ein 90kg schwerer Ruderer 2.1% schneller als ein 60kg schwerer Ruderer, dann ist ihre Leistung dieselbe.