

R. Beneke^{1,2} und P. E. di Prampero³

Mechanische und metabolische Belastung beim Radfahren – eine Analyse aus physiologischer und biomechanischer Sicht

*Mechanical and metabolic strain of cycling – analysis with special respect to physiology and biomechanics*¹ Institut für Sportmedizin, Freie Universität Berlin² Rehabilitationsklinik Elbe Saale, Barby³ Dipartimento di Science e Technologie Biomediche, Università degli Studi di Udine, Italia

Zusammenfassung

Das Fahrrad hat in den letzten Jahren als Freizeit-, Breiten- und Leistungssportgerät aber auch als Fortbewegungsmittel im täglichen Leben einen Boom erlebt. Dieses ist u.a. darin begründet, daß beim Radfahren die zur Vorwärtsbewegung benötigte metabolische Leistung geringer und somit die mit gegebenen metabolischem Aufwand erreichbare Geschwindigkeit größer als bei jeder anderen Art der Fortbewegung des Menschen ist. In der vorliegenden Arbeit wird Radfahren als komplexes Modell leistungslimitierender Faktoren aus physiologischer und biomechanischer Sicht beschrieben und analysiert. Das Modell basiert auf der Fahrgeschwindigkeit (v) und der Beschreibung von Roll- (C_R) und Steigungswiderstand (C_G) als gewichtsabhängige Belastungsgröße ($a = C_R + C_G$) sowie dem Luftwiderstand ($C_L = b (v + v_L \cos \varphi)^2$) unter Berücksichtigung von Windgeschwindigkeit (v_L) und Windrichtung (φ). Dabei beinhaltet b die Faktoren Luftwiderstandsbeiwert, frontale Projektionsfläche und Luftdichte. Die metabolische Leistung errechnet sich aus dem biomechanischen Wirkungsgrad (η) und der mechanischen Leistung (P_{Mech}) basierend auf den o.g. Zusammenhängen ($P_{\text{Met}} = P_{\text{Mech}} \eta^{-1} = (C_R + C_G + C_L) v \eta^{-1} = (a + b (v + v_L \cos \varphi)^2) \eta^{-1}$). Das Modell ermöglicht den Energieverbrauch und somit individuelle Belastungsgrenzen für das Radfahren unter variablen Bedingungen zu berechnen und trainingsmethodisch zu berücksichtigen.

Schlüsselwörter: Fahrrad, Energieverbrauch, Modellrechnungen

Summary

Bicycle riding has been booming during recent years utilizing the bike as sports kit for leisure time recreational and top performance exercises or simply as a reasonable vehicle in daily life. This enthusiasm is essentially based on the fact that at a given velocity cycling needs less metabolic power than any other terrestrial muscle-powered mode of human locomotion. In the present paper cycling is described and analysed as a complex model of performance limiting factors with special respect to physiology and biomechanics. The model includes cycling velocity (v), rolling resistance (C_R) and resistances against gravity (C_G) as body mass related factors of physical strain ($a = C_R + C_G$) but also air resistance ($C_L = b (v + v_L \cos \varphi)^2$) considering wind velocity (v_L) and wind direction (φ). The parameter b subsumes drag coefficient against air, area projected on the frontal plane and air density. The metabolic power results from biomechanical efficiency (η) and mechanical power (P_{Mech}) based on interrelationships described above ($P_{\text{Met}} = P_{\text{Mech}} \eta^{-1} = (C_R + C_G + C_L) v \eta^{-1} = (a + b (v + v_L \cos \varphi)^2) \eta^{-1}$). The model enables calculation of energy cost of cycling and thus performance limitations with respect to physical fitness under various conditions which makes optimized prescription of exercise training possible.

Key words: cycling, energetics, modelling

Einleitung

Das Radfahren hat in den letzten Jahren nicht nur in Deutschland einen Boom erlebt. Dabei wird das Fahrrad als Freizeit-, Breiten- und Leistungssportgerät aber auch als Fortbewegungsmittel im täglichen Leben genutzt. Entsprechend vielfältig ist das Angebot unterschiedlicher Fahrräder. Unabhängig vom Fahrradmodell ist die Energie, die beim Radfahren gegen die Schwerkraft und innere Kräfte wie Reibung in Kugellagern und Trägheitsmomente einzelner Körperteile aufgewandt werden muß, im Vergleich zu anderen

Arten der Fortbewegung minimiert. Der Sattel stabilisiert die Körpermasse in der vertikalen Ebene. Die alternierende Bewegung der Beine wird bei Beinkurbelarbeit in eine nahezu kontinuierliche Vorwärtsbewegung umgewandelt. Dieses ermöglicht dem Radfahrer, nahezu seine gesamte zusätzlich zum Ruheumsatz bereitgestellte metabolische Energie zur Überwindung des Roll- und des Luftwiderstandes einzusetzen. Dadurch ist die metabolische Leistung, die der Radfahrer tatsächlich zur Vorwärtsbewegung benötigt, geringer und die mit gegebenen metabolischem Aufwand erreichbare Geschwindigkeit größer, als bei jeder anderen Art der Fortbe-

wegung des Menschen (7,14). Unabhängig von diesen hervorragenden Voraussetzungen entscheidet das Verhältnis zwischen der körperlichen Leistungsfähigkeit und der durch die mechanische Leistung bestimmten körperlichen Belastung auch beim Radfahren über Lust oder Frust.

In der vorliegenden Arbeit wird Radfahren als komplexes Modell leistungslimitierender Faktoren aus physiologischer und biomechanischer Sicht unter besonderer Berücksichtigung des Roll- und des Luftwiderstandes sowie des Streckenprofils beschrieben und analysiert. Das Modell basiert auf einer bereits in früheren Arbeiten ausführlich dargestellten Theorie zu leistungslimitierenden Faktoren der Fortbewegung an Land und im Wasser (6). Die vorliegende Arbeit erweitert die Randbedingungen für eine gültige Beschreibung des Luftwiderstandes. Das Modell ermöglicht, Leistungsgrenzen für das Radfahren unter variablen Bedingungen abzuschätzen. Die praktische Relevanz einer solchen Betrachtungsweise wird am Beispiel eines ambitionierten Breitensportlers, der zwei unterschiedliche Sportgeräte, das Mountainbike und das Rennrad, nutzt, demonstriert.

Mechanische Leistung – Ergebnis unterschiedlicher Widerstände

Die mechanische Leistung, die beim Radfahren mit konstanter Geschwindigkeit überwunden werden muss, ist durch den Luftwiderstand und andere mechanische Widerstände bedingt. Vereinfachend können diese Faktoren durch die folgende Gleichung 1 [1] beschrieben werden.

$$C_{\text{Mech}} = a + b v^2 \quad [1]$$

dabei ist C_{Mech} die pro Streckeneinheit erbrachte mechanische Arbeit in $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$ und v die Geschwindigkeit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Die Konstante a ist die mechanische Energie, die pro Streckeneinheit gegen den Rollwiderstand und andere gewichtsabhängige, mechanische Widerstände aufgebracht werden muß. Der Term $b v^2$ ist die mechanische Energie pro Streckeneinheit gegen den Luftwiderstand.

Für gegebene Bedingungen sind a und b Konstanten. Die klassische Methode zur Bestimmung der Konstanten a und b ist, einen Gegenstand zu schleppen. Dabei wird die Zugkraft bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessen. Die Zugkraft entspricht dem mechanischen Energieverbrauch pro Streckeneinheit (2,8,10). Um bei dieser Messmethode realistische Ergebnisse zu bekommen, müssen Randbedingungen wie Geschwindigkeit, ebenes Gelände, Windstille, Reifendruck etc. absolut konstant gehalten werden. Alternativ können a und b dadurch bestimmt werden, dass man einen Gegenstand frei ein Gefälle herunterrollen lässt und dabei den Geschwindigkeitsverlauf registriert. Auf ebenem Gelände kann auch die Geschwindigkeitsabnahme des Gegenstandes pro Streckeneinheit gemessen werden. Weitere elegante jedoch technisch sehr aufwändige Methoden sind die Kombination von Laufband und Windkanal und das Bestücken von Pedalen und/oder Kettentrieb mit Kraft-Geschwindigkeitssensoren.

Tabelle 1: Rollwiderstandskoeffizient in Abhängigkeit von Reifentyp, -durchmesser, -breite und Reifendruck

Reifentyp	Reifendurchmesser (cm)	Reifenbreite (cm)	Reifendruck (Mpa)	Rollwiderstandskoeffizient ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^2$)
Stollen	50.8	5.7	0.32	0.017
Stollen	68.8	5.7	0.32	0.013
Straße (Standard)	68.8	4.5	0.46	0.007
Straße (schmal)	68.8	1.8	0.85	0.0034

Einzelne Aspekte der Leistungsgrenzen beim Radfahren sind unter Umständen einfacher beurteilbar, wenn aus C_{Mech} die mechanische Leistung (P_{Mech}) berechnet wird. C_{Mech} ist eine Kraft. P_{Mech} ist somit das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit [2].

$$P_{\text{Mech}} = C_{\text{Mech}} v = a v + b v^3 \quad [2]$$

Gl.2 ermöglicht, P_{Mech} u.a. in Abhängigkeit von sportgerätabhängigen Faktoren des Roll-, des Luftwiderstandes und anderer Widerstände sowie der Fahrgeschwindigkeit zu beschreiben (Abb.1).

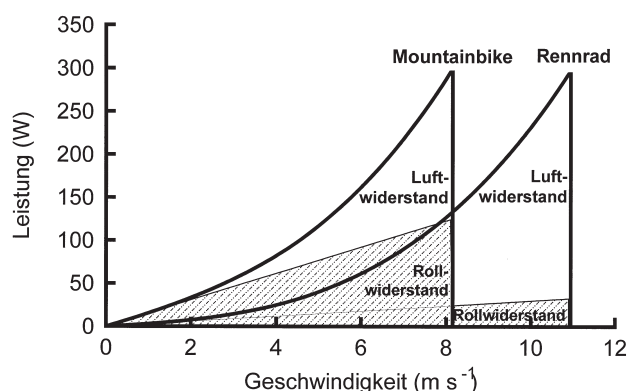


Abbildung 1: Mechanische Leistung beim Radfahren in Abhängigkeit von Fahrradmodell und Geschwindigkeit unter Berücksichtigung von Roll- und Luftwiderstand

Bevor [1] und [2] jedoch zur Berechnung der Belastung beim Radfahren genutzt werden, soll die Charakteristik des Luft- und anderer Widerstände sowie der Konstanten a , näher betrachtet werden.

Rollwiderstand und Berge

Die Gleichungen 1 und 2 subsummieren im Rollwiderstand auch die Reibungswiderstände in Radnaben, Kugellagern und Kettenantrieb sowie den Einfluss von Steigungs- bzw. Gefällstrecken. Dementsprechend errechnet sich a aus dem Rollwiderstand an sich (C_R) und der Energie, die gegen die Schwerkraft pro Streckeneinheit (C_G) aufgebracht werden muss [3].

$$a = C_R + C_G \quad [3]$$

Bei hochwertigen Fahrrädern sind die Reibungswiderstände in Radnaben, Kugellagern und Kettenantrieb sehr gering (10). Somit wird der Rollwiderstand im Wesentlichen durch Reifengröße, Reifendruck und die Oberflächeneigenschaften des Fahrbahnbelags bestimmt. Der Rollwiderstand nimmt proportional zum Gewicht von Radfahrer und Rad zu. Deshalb wird üblicherweise ein Rollwiderstandskoeffizient be-

rechnet. Der Rollwiderstandskoeffizient ist der Quotient aus Rollwiderstand und rollendem Gewicht. Rollwiderstandskoeffizienten für verschiedene Bedingungen sind in Tabelle 1 angegeben. Tabelle 1 zeigt, dass Rennreifen mit großem Durchmesser kombiniert mit geringer Reifenbreite, hohem Reifendruck und somit kleiner Bodenkontaktfläche auf glattem Untergrund den Rollwiderstandskoeffizient im Vergleich zu den Reifen eines normalen Tourenrades auf der Straße um ca. 50 %, im Vergleich zu Reifen mit Stollenprofil um ca. 74 % verringern (Tab.1). Wenn die Gewichte von Radfahrer und Rad bekannt sind, können die entsprechenden Werte für C_R berechnet werden.

Die Bedingung des Fahrens in absolut ebenem Gelände ist normalerweise nur im Bahnradsport gegeben. In hügeligem Gelände muss jedoch auch beim Radfahren Energie, die gegen die Erdbeschleunigung ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) aufgebracht oder durch diese gewonnen wird, berücksichtigt werden. Diese Energie kann als das Produkt aus der Gesamtmasse von Rad und Radfahrer (M), der Erdbeschleunigung (g) und dem Höhengewinn bzw. -verlust (h) berechnet werden. C_G errechnet sich aus h , der Streckeneinheit (d) mal $\sin \gamma$, wobei γ der Winkel zwischen der Steigung der gefahrenen Strecke und der Horizontalen ist [4].

$$C_G = M g h d^{-1} = M g d (\sin \gamma) d^{-1} = M g \sin \gamma \quad [4]$$

Luftwiderstand und Wind

Der Luftwiderstand C_L ist eine Funktion von v^2 (siehe auch [1] und [2]). Er steigt proportional zum Luftwiderstandsbeiwert (c_d), der gesamten frontalen Projektionsfläche (A) und der Luftdichte (ρ) an [5].

$$b = 0.5 c_d A \rho \quad [5]$$

Die Gleichung 5 verdeutlicht, dass Änderungen von A , des c_d -Wertes und des Luftdrucks direkten Einfluss auf den Energieverbrauch, der bei einer gegebenen Geschwindigkeit pro Streckeneinheit gegen den Luftwiderstand aufgebracht werden muss, haben (6,7,8).

Eine intuitive Handlung, A und damit b zu reduzieren, ist das Vorbeugen des Oberkörpers. Bei modernen Rennrädern ist diese Strategie dahingehend optimiert, dass die mehr oder weniger erzwungene Körperposition den Faktor A minimiert (2). Die Optimierung der Körperposition auf dem Fahrrad hat jedoch nicht für jeden Athleten gleiche Vorteile. Nimmt man vereinfachend an, dass Menschen als Körper mit ähnlicher Form und Dichte betrachtet werden können, so ist bei unterschiedlich großen Athleten die Differenz der Körperoberfläche eine Funktion des Quadrats der Größendifferenz. Der Unterschied der Körpermasse ist jedoch eine Funktion der dritten Potenz der Größendifferenz. Unter der Voraussetzung, dass A ein konstanter Betrag der Körperoberfläche ist, hat somit ein größerer Athlet im Verhältnis zur Körpermasse eine kleinere A als ein kleinerer Sportler. Obwohl A jedoch wahrscheinlich keine absolut lineare Funktion der Körperoberfläche ist (3,13), ergibt sich aus der o.g. Argumentation, daß ein größerer Radfahrer bei einer gegebenen v im ebenen

Gelände eine geringere P_{Mech} aufwenden muß oder bei gleicher P_{Mech} eine höhere v erreicht. Wettkampfergebnisse im Zeitfahren auf der Straße und Bahnwettbewerbe bestätigen diese Annahme. Da die maximale Sauerstoffaufnahme pro kg Körpermasse jedoch im Durchschnitt bei größeren Personen tendentiell geringer wird, hat nicht der wirklich größte Radfahrer sondern der Athlet mit der optimalen Größe die besten Voraussetzungen b zu optimieren.

Das Vorbeugen des Oberkörpers verringert jedoch nicht nur A . Durch die veränderte Luftströmung verbessert das Vorbeugen auch den c_d -Wert. Im Rahmen der Wettkampfregeleln kann der c_d -Wert durch Körperposition, spezielle Kleidung und Radkonstruktionen um bis zu ca. 50 % verringert werden (Tab.2). Eine weitere Möglichkeit b zu verringern ist,

Tabelle 2: Luftwiderstandsbeiwert (c_d -Wert) und Projektionsfläche (A_f) in Abhängigkeit vom Fahrradmodell

Fahrradmodell	c_d	A_f (% Körperoberfläche)
Cityrad (aufrechtsitzend)	1.1	27.6
Cityrad (vorgebeugt)	1.0	24.3
Tourenrad tiefer Lenker (vorgebeugt)	0.87	23.8
Rennrad (vorgebeugt)		

den Windschatten eines mit gleicher Geschwindigkeit vorausfahrenden Radfahrers zu nutzen. Bei Rennengeschwindigkeit kann b so um bis zu 30 % reduziert werden.

Entscheidend für die Leistung, die gegen den Luftwiderstand erbracht werden muss, ist nicht die Geschwindigkeit und damit die Zeit pro Streckeneinheit an sich sondern vielmehr, wie schnell die Luft am Körper vorbeiströmt. Wind- und Fahrrichtung können in unterschiedlichen Winkeln zueinander stehen. Daraus folgt, dass die Leistung gegen den Luftwiderstand eine Funktion von b der Fahrgeschwindigkeit (v), der Windgeschwindigkeit (v_L) und dem Winkel (ϕ) zwischen Fahrt- und Windrichtung ist. [6] modifiziert frühere Berechnungen des Luftwiderstands (6,7,8) und ist dadurch gültig für alle Windrichtungen.

$$P_{\text{Mech Luft}} = b (v + v_L \cos \phi)^2 v \quad [6]$$

Unter der Bedingung Windstille sind Wind- und Fahrgeschwindigkeit gleich und der Winkel ϕ ist 0° . Dadurch wird $\cos \phi = 1$. Dieser Sonderfall vereinfacht [6] zu [7].

$$P_{\text{Mech Luft}} = b v^3 \quad [7]$$

Metabolische Leistung und mechanischer Wirkungsgrad

Die beim Radfahren bei gegebener P_{Mech} zu erbringende metabolische Leistung (P_{Met}) ist vom mechanischen Wirkungsgrad (η) abhängig.

$$P_{\text{Met}} = P_{\text{Mech}} \eta^{-1} = (a + b v^3) \eta^{-1} \quad [8]$$

Beim Radfahren sowie bei der Fahrradergometrie wurde η wahrscheinlich ausführlicher analysiert als bei jeder anderen Tätigkeit. Zahlreiche Untersuchungen zeigten, dass die Kurbfrequenz des η -Optimums von ca. 25 % in einem Leistungsbereich von 100 bis 300 W mit höher werdender Leistung von ca. 35 min^{-1} auf 60 min^{-1} ansteigt (1,4,5,9,12,15,16). Aus den o.g. Arbeiten geht hervor, dass

relativ große Änderungen der Kurbelfrequenz nur mit geringen η -Abnahmen verbunden sind. Zusätzlich verringern bei hohen Leistungen selbst Frequenzen von ca. 120 min^{-1} η nur auf ca. 22 %. Speziell bei hohen Leistungen sind η -Änderungen in Abhängigkeit von der Kurbelfrequenz extrem gering. Ersetzt man in [8] $a \eta^{-1}$ durch α und $b \eta^{-1}$ durch β wird die [8] übersichtlicher und zu [9].

$$P_{\text{Met}} = \alpha + \beta v^3 \quad [9]$$

dabei ist P_{Met} als die Leistung definiert, die zusätzlich zur metabolischen Leistung in körperlicher Ruhe erbracht wird. Unter der Annahme, dass unter gegebenen Bedingungen auch der mechanische Wirkungsgrad konstant ist, sind auch α und β Konstanten.

[8] und [9] ermöglichen u.a., den Einfluss des Sportgerätes auf die körperliche Belastung zu berechnen. Das Beispiel eines ambitionierten Freizeitsportlers zeigt, dass die Fahrradwahl die Belastung und Beanspruchung des Sportlers erheblich beeinflussen kann. Während eine Geschwindigkeit von ca. $29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ auf dem Mountainbike der Maximalleistung des Sportlers auf dem Fahrradergometer entspricht, wird mit einem Rennrad eine vergleichbare Leistung erst bei einer um ca. 33 % höheren Geschwindigkeit von ca. $39 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ erreicht. Auch das Verhältnis zwischen Luft- und Rollwiderstand wird bei dieser Belastung erheblich durch das Sportgerät beeinflusst. Beim Fahren mit dem Mountainbike verteilt sich P_{mech} zu ca. 42 % auf den Rollwiderstand und zu 58 % auf den Luftwiderstand. Im Gegensatz dazu ist dieses Verhältnis beim Rennrad mit ca. 11 % Rollwiderstand zu 89 % Luftwiderstand deutlich verändert (Abb.1). Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in Abhängigkeit vom Sportgerät Geschwindigkeits- und Streckenangaben trainingsmethodisch absolut unterschied-

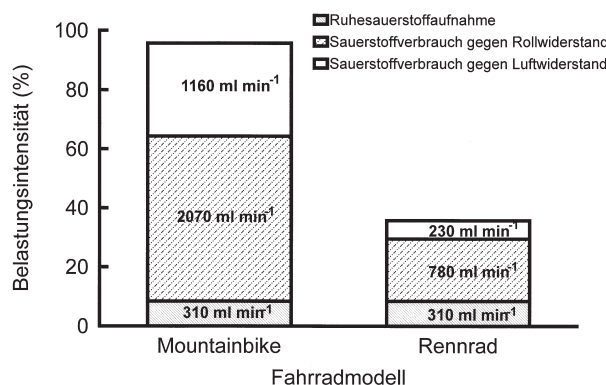


Abbildung 2: Belastungsintensität bei einer Geschwindigkeit von ca. $29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ mit einem Mountainbike und einem Rennrad relativ zur höchsten Sauerstoffaufnahme bei Fahrradergometrie bei einem männlichen ambitionierten Freizeitsportler (Alter: 32 J, Größe: 177 cm, Masse: 77 kg, $\text{VO}_{2\text{peak}}$: $3700 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$).

lich bewertet werden müssen. Während eine Geschwindigkeit von ca. $29 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ auf dem Mountainbike für den o.g. Sportler eine Belastung im Bereich seiner Peaksauerstoffaufnahme darstellt und somit nur wenige Minuten aufrechterhalten werden kann, entspricht die gleiche Geschwindigkeit auf dem Rennrad einer Belastung von weniger als 50 % der $\text{VO}_{2\text{peak}}$ (Abb.2) und kann somit über Stunden erbracht werden.

Schlussfolgerungen

Das beschriebene Modell zu physiologischen und biomechanischen Aspekten des Radfahrens ermöglicht u.a., den Energieverbrauch und somit die metabolische Belastung und ihre Grenzen für das Radfahren unter Berücksichtigung von zahlreichen Faktoren des Roll- und des Luftwiderstandes und somit für verschiedenen Bedingungen abzuschätzen. Praxisrelevante Probleme des Radfahrens, die u.a. wesentlich den möglichen Spaß bzw. Frust beim Radfahren bedingen, können so durch eine komplexe Betrachtungsweise systematisch erkannt und bewältigt sowie trainingsmethodisch berücksichtigt werden.

Literatur

1. *Banister EW, Jackson RC*: The effect of speed and load changes on oxygen intake for equivalent power outputs during bicycle ergometry. *Arbeitsphysiol* 24 (1967) 284-290
2. *Capelli C, Rosa G, Butti F, Ferretti G, Veicsteins A, di Prampero PE*: Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *Eur J Appl Physiol*, 67 (1993) 144-149
3. *Capelli C, Schena F, Zamparo P, Dal Monte A, Faina M, di Prampero PE*: Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc* 30 (1998) 614-624
4. *Coast JR, Welch HJ*: Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol* 53 (1985) 339-342
5. *Dickinson S*: The efficiency of bicycle-peddalling, as affected by speed and load. *J Physiol (London)* 67 (1929) 242-255
6. *di Prampero PE*: The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 7 (1986) 55-72
7. *di Prampero PE*: Cycling on earth, in space, and on the moon. *Eur J Appl Physiol* (in Press)
8. *di Prampero PE, Cortili G, Mogroni P, Saibene F*: Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 47 (1979) 201-206
9. *Ericson MO*: Mechanical muscular power output and work during ergometer cycling at different work loads and speeds. *Eur J Appl Physiol* 57 (1988) 382-387
10. *Kyle CR*: Mechanical factors affecting the speed of a cycle. In: *Burke ER* (ed): *Science of cycling*. Human Kinetics, Champaign, I11 (1979a) pp 133-135
11. *Pugh LGCE*: The relation of oxygen intake and speed in competition cycling and comparative observations on the bicycle ergometer. *J Physiol (London)* 241 (1974) 795-808
12. *Seabury JJ, Adams WC, Rammey MR*: Influence of pedalling rate and power output on energy expenditure during cycling ergometry. *Ergonomics* 20 (1977) 491-498
13. *Swain DP, Coast JR, Clifford PS, Miliken MC, Stray-Gundersen J*: Influence of body size on oxygen consumption during cycling. *J Appl Physiol* 62 (1987) 668-672
14. *Tucker VA*: Energetic cost of moving about. *AM Sci* 63 (1975) 423-419
15. *Zoladz JA, Duda K, Majerczak J*: Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise tests in humans. *Eur J Appl Physiol* 77 (1998) 445-451
16. *Zoladz JA, Rademaker ACHJ, Sargeant AJ*: Non-linear relationship between O_2 uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol (London)* 448 (1995) 211-217

Anschrift für die Verfasser:
 Priv.-Doz. Dr.med. Ralfp Beneke
 Brauhofstraße 1
 10587 Berlin
 e-mail: rabe94@zedat.fu-berlin.de