

Christa Leutert, Hans Hoppeler

Anatomisches Institut der Universität Bern, Bern

# Effekte einer Fettdiät auf den Muskelstoffwechsel unter submaximaler Belastung bei nicht ausdauertrainierten Personen

## Zusammenfassung

Bei 7 untrainierten Probanden (3 Frauen und 4 Männer; Alter  $22.6 \pm 2.0$  Jahre) wurden die Veränderungen des respiratorischen Quotienten (RQ) und damit des muskulären Substratmetabolismus bei submaximaler Belastung als Folge von akuten und chronischen Diätmanipulationen untersucht. Nach einer Beobachtungsphase von 2 Wochen mit einer gewohnten, kohlenhydratreichen Ernährung (< 30% der eingenommenen Energie in Form von Fett) wurde auf eine 4 Wochen dauernde isokalorische Fettdiät (> 50% Fett) umgestellt. Zusätzlich wurde während der Beobachtungsphase und während der Fettdiät einmal pro Woche je eine fettreiche und eine kohlenhydratreiche Testmahlzeit verabreicht. Nach jeder Testmahlzeit wurde der Substratverbrauch der Skelettmuskulatur bei submaximaler Belastung auf zwei Intensitätsstufen (40% und 70% der maximalen Sauerstoffaufnahme  $VO_{2,max}$ ) bestimmt. Als Folge der unterschiedlichen Testmahlzeiten veränderte sich der RQ signifikant. Eine kohlenhydratreiche Mahlzeit erhöhte den RQ gegenüber einer fettreichen Mahlzeit bei 40%  $VO_{2,max}$  um 2.3%, bei 70%  $VO_{2,max}$  um 1.3%. Dies entspricht einem vermehrten Kohlenhydratmetabolismus von 7% bzw. 4%. Während der 4 Wochen fettreicher Diät wurde keine Abnahme des RQ bei submaximaler Belastung festgestellt. Die in die Untersuchung einbezogenen Blutlipidmessungen zeigten keine Verschlechterung des Risikofaktorenprofils als Folge der 4-wöchigen Fettdiät.

### Schlüsselwörter

Ernährung – Diät – Fett – Kohlenhydrat – Substratmetabolismus – submaximale Belastung – respiratorischer Quotient (RQ) – Blutlipid

## Summary

The influence of acute and chronic diet manipulations on the substrate metabolism of muscles at sub-maximum exertion has been studied on 7 untrained individuals (3 women and 4 men, age  $22.6 \pm 2.0$  years). Over 2 weeks a normal diet (< 30% of the energy intake as fat) was ingested. Then an isocaloric fat diet (> 50% as fat) was consumed for 4 weeks. In addition to this scheme a fat-rich and a carbohydrate-rich test meal was provided each week throughout the 6 weeks. After each test meal substrate utilization was measured at 2 levels of exertion (40% and 70% of maximum oxygen uptake  $VO_{2,max}$ ). As a consequence of the different test meals the respiratory exchange quotient (RQ) changed significantly. A carbohydrate-rich meal increased the RQ (compared with a fat rich-test meal) at 40%  $VO_{2,max}$  by 2.3%, at 70%  $VO_{2,max}$  by 1.3%. This corresponds to an increased carbohydrate metabolism by 7% and 4% respectively. During the 4 weeks with fat diet there was no decrease of the respiratory exchange quotient observed at sub-maximum exertion, indicating that there was no shift in substrate utilization. Blood lipids were also measured, but did not show a change of the risk factors profile as a consequence of the fat rich diet.

### Keywords

Nutrition – diet – fat – carbohydrate – substrate metabolism – sub-maximum exertion – respiratory exchange quotient (RQ) – blood lipid

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 49 (3), 105–110, 2001

## Einleitung

Seit Christensen und Hansen [4] ist gut bekannt, dass der menschliche Organismus sowohl in Ruhe als auch unter Belastung eine Mischung aus Kohlenhydrat und Fett verbrennt. Bei körperlicher Arbeit im Fließgleichgewicht (steady state) lässt sich der Substratverbrauch der Muskulatur anhand einer atmungsphysiologischen Untersuchung ermitteln. Das Verhältnis von Kohlendioxidproduktion zu Sauerstoffaufnahme ( $VCO_2/VO_2$ ) – der respiratorische Quotient (RQ) – liegt zwischen 0.69 und 0.73, wenn nur Fett oxidiert wird (abhängig von der Fettsäurenlänge). Bei reiner Kohlenhydratoxidation (Glucoseverbrennung) ist der RQ 1.0. Verschiedene Untersuchungen [4, 20, 21, 22] belegen, dass sich die Zusammensetzung des Gemisches ändern kann, abhängig vom Angebot der zirkulierenden Substrate, von der Belastungsintensität, von der Belastungsdauer, vom Trainingszustand,

von der hormonellen Situation (Insulin, Cortisol, Wachstumshormon usw.) und von der Zusammensetzung der Nahrung.

Verschiedene Studien untersuchten bereits die Auswirkungen von Diätmanipulationen auf den muskulären Substratverbrauch und die Leistungsfähigkeit. Ein Vergleich der Studien gestaltet sich allerdings schwierig, da sich die Studien in vielen Variablen unterscheiden: Trainingszustand der Probanden, Belastungsintensität, Belastungsdauer, Sportart, Zeit zwischen Mahlzeit und Belastung, Dauer der Diätintervention, Diät/Mahlzeit-Zusammensetzung, Art der RQ- bzw. der Leistungs-Bestimmung.

Die Dauer der Diätintervention scheint bei allen Studien eine zentrale Rolle zu spielen. So begünstigt bereits eine einzige kohlenhydratreiche Testmahlzeit die Kohlenhydratoxidation [4, 7]. Vor allem während der Initialphase einer Ausdauerbelastung scheint sich der muskuläre Substratverbrauch durch die zuvor eingenommenen Testmahlzeiten geringfügig zu verändern. Ein

Effekt auf die Leistungsfähigkeit konnte allerdings nicht festgestellt werden [30, 42].

Bei einer kurzfristigen Umstellung von normaler Ernährung auf eine fettreiche Diät (Diättdauer von 5 bis 7 Tagen) wird ein niedrigerer RQ gefunden [1, 19]. In diesen Experimenten nimmt die Leistungsfähigkeit nach fettreicher Diät im Allgemeinen ab [1, 9, 19] oder sie bleibt unverändert [41]. Als Ausnahme erscheint die Arbeit von Muoio et al. [29], welche eine Leistungssteigerung bei einem unveränderten RQ ergab.

Bei einer längerfristigen Umstellung auf eine fettreiche Diät (Diättdauer mindestens 2 Wochen) kommt es vermutlich neben akuten (funktionellen) Anpassungen des Organismus auch zu metabolischen Veränderungen der Muskelzellen im Sinne einer Aufregulierung lipolytischer Stoffwechselwege [12, 20, 21, 22]. Eine strukturelle Veränderung des Muskelgewebes konnte nach einer 4 Woche dauernden Fettdiät nicht nachgewiesen werden [16]. Bei Sportlern führen sowohl Training als auch eine längerfristige Fettdiät zu einer Begünstigung der Fettoxidation im Muskel, welche sich in einer Abnahme des RQ manifestiert. Training steigert die oxidative Kapazität der Muskulatur, wobei sich das Gleichgewicht zwischen Kohlenhydrat- und Fettverbrennung in Richtung Fettoxidation verschiebt [20, 21, 22, 25]. Weil die Leistungsfähigkeit im Training insgesamt erhöht wird, bedeutet dies absolut gesehen eine Erhöhung des Fettmetabolismus. Eine fettreiche Diät scheint andererseits den Fettmetabolismus zu begünstigen, ohne im Allgemeinen an der Leistungsfähigkeit etwas zu ändern.

Die meisten Studien, die sich mit der Auswirkung eines Diätwechsels auf den Substratverbrauch der Skelettmuskulatur befassten, untersuchten Sportlerpopulationen. Neuere Studien mit Untrainierten [11, 13, 19, 34, 39] deuten darauf hin, dass Diätumstellungen bei Untrainierten anders verlaufen könnten als bei Sportlern. So führt bei Untrainierten ein mehrwöchiges Ausdauertraining bei gleichzeitiger Einnahme einer fettreichen Diät zu einer geringeren Leistungssteigerung als bei Einnahme einer kohlenhydratreichen Diät [11]. Bei Ausdauertrainierten bleibt hingegen die Leistungsfähigkeit bei Einnahme einer langfristigen fettreichen Diät unverändert [10, 32] oder nimmt sogar leicht zu [16, 24]. Nicht nur chronische Diätinterventionen, sondern bereits eine einzige Mahlzeit scheint bei Trainierten und Untrainierten eine unterschiedliche metabolische Antwort hervorzurufen [17, 28]. Man muss daher davon ausgehen, dass es Unterschiede in der Steuerung des Substratmetabolismus zwischen Untrainierten und Trainierten gibt. Fettreiche Diäten scheinen beim Trainierten keinen negativen Einfluss auf das Blutlipidprofil zu haben [26]. In Anbetracht des erhöhten Energieumsatzes des Sportlers erscheint dieser Befund nicht besonders auffällig. Über eine Veränderung des Blutlipidprofils bei Untrainierten als Folge einer Umstellung auf eine fettreiche Diät liegen unseres Wissens keine Angaben vor.

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, ob und allenfalls in welchem Umfang sich der Substratverbrauch der Skelettmuskulatur bei Untrainierten einerseits durch akute und andererseits durch chronische Diätintervention manipulieren lässt und in welchem Umfang sich dabei das Blutlipidprofil verändert.

Folgende spezifische Hypothesen wurden überprüft:

1. Bei submaximaler Belastung ist der RQ nach einer kohlenhydratreichen Testmahlzeit grösser als nach einer fettreichen Testmahlzeit.
2. Vier Wochen fettreiche Diät führen zu einer Abnahme des RQ bei submaximaler Belastung.

In die Untersuchung einbezogen wurden Veränderungen von Gasaustauschparametern, der Herzfrequenz sowie des Blutlipidbildes.

## Material und Methoden

### Probanden

Die anthropometrischen Daten der 7 untrainierten Probanden (3 Frauen und 4 Männer) sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Teilnehmer wurden dazu angehalten, ihren gewohnten Bewe-

gungsumfang über die Dauer der Studie konstant zu halten. Die Studie wurde von der ethischen Kommission der Universität Bern genehmigt. Alle Probanden wurden über Nutzen und Risiken der Studie informiert und gaben schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme.

	Alle Probanden (n = 7)	Frauen (n = 3)	Männer (n = 4)
Alter [Jahre]	22.6 ± 2.0	22.0 ± 0.2	23.2 ± 2.7
Grösse [cm]	174.3 ± 10.9	165.7 ± 7.0	180.8 ± 8.5
Körpergewicht (KG) [kg]	67.9 ± 7.8	63.8 ± 5.2	71.0 ± 8.7
Body mass index (BMI) [kg/m <sup>2</sup> ]	22.3 ± 1.9	23.3 ± 2.7	21.6 ± 0.9
Hämoglobin (Hb) [g/dl]	15.5 ± 1.3	14.8 ± 1.4	16.0 ± 1.0
max. O <sub>2</sub> -Aufnahme (VO <sub>2</sub> max) [ml/min/kg]	50.3 ± 6.3	46.6 ± 5.8	53.0 ± 5.8
max. Herzfrequenz (Hfmax) [min <sup>-1</sup> ]	190 ± 11	184 ± 12	195 ± 10

Mittelwert und Standardabweichung der Stichprobe.

Tabelle 1: Anthropometrie

### Versuchsablauf

Die Probanden nahmen während der Beobachtungsphase von 2 Wochen ihre gewohnte Nahrung (< 30% der eingenommenen Energie in Form von Fett) zu sich und erstellten davon ein detailliertes Diätprotokoll, welches anschliessend mit einer Diätsoftware ausgewertet wurde. Danach wurde auf eine 4 Wochen dauernde isokalorische Fettdiät (> 50% der eingenommenen Energie in Form von Fett) umgestellt.

Zusätzlich wurde während der Beobachtungsphase und während der Fettdiät einmal pro Woche je eine fettreiche und eine kohlenhydratreiche Testmahlzeit verabreicht. 3 Stunden nach Einnahme der Testmahlzeit wurde der RQ – als Mass für den Substratverbrauch der Muskulatur – bestimmt. Gemessen wurde bei submaximaler Belastung auf zwei Intensitätsstufen (bei 40% und 70% der maximalen Sauerstoffaufnahme VO<sub>2</sub>max). Zudem wurden vor und nach der 4-wöchigen Fettdiät nüchtern Blutlipidmessungen durchgeführt.

### VO<sub>2</sub>max-Test

Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max) der Probanden wurde 1 Woche vor Beginn der Studie unter ärztlicher Kontrolle in der Abteilung für kardiologische Rehabilitation des Inselspitals Bern durchgeführt. Die Untersuchung diente der Charakterisierung der Testpersonen sowie dazu, die individuellen Leistungen für die submaximalen Belastungen festzulegen. Die Messung von VO<sub>2</sub>max erfolgte auf einem Velo-Ergometer (Ergoline GmbH & Co KG, Deutschland) unter EKG-Kontrolle. Nach einer Aufwärmphase von 6 Minuten bei einer Leistung von 50 Watt wurde die Leistung alle 2 Minuten um 25 Watt erhöht, bis die Probanden eine Tretfrequenz von 65 Umdrehungen/Minute nicht mehr aufrecht erhalten konnten. Während des VO<sub>2</sub>max-Tests wurden die folgenden physiologischen Variablen mit einem Oxycon-Alpha-Gerät (Firma Jaeger, Deutschland) fortlaufend gemessen: Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>) und Kohlendioxidproduktion (VCO<sub>2</sub>), Ventilation, Leistung in Watt.

### Bestimmung des respiratorischen Quotienten (RQ) bei submaximaler Belastung

Die Messung erfolgte auf einem Velo-Ergometer 3 Stunden nach Einnahme einer standardisierten Testmahlzeit. Der respiratorische Quotient (RQ) wurde bei submaximaler Belastung auf einer niedrigen und einer mittleren Intensitätsstufe, entsprechend 40% bzw. 70% der individuellen VO<sub>2</sub>max, bestimmt. Für Frauen ergab dies eine Leistung von durchschnittlich 90 bzw. 155 Watt, bei Männern eine solche von 119 bzw. 208 Watt. Die Ausatmungsgase wurden während der letzten Minute der 10 Minuten dauernden Intensitätsstufe mit Douglasbags gesammelt und mit einem Oxycometer (Servomex Analyser Series 1400) analysiert, das zuvor mit einem Gasgemisch bekannter Zusammensetzung (5% CO<sub>2</sub>, 95% N, Carbagas) geeicht wurde. Das Verhältnis der gemessenen Gasanteile in

der Ausatemluft ( $VCO_2/V\dot{O}_2$ ) ergibt den respiratorischen Quotienten (RQ). Präliminäre Untersuchungen ergaben, dass sich die Zusammensetzung der Ausatemluft nach 9 Minuten nicht mehr messbar veränderte.

Die Herzfrequenz wurde während des Tests mit einer Polar-Pulsuhr (Modell Accurex plus) gemessen und mit dem dazugehörigen Computerprogramm aufgezeichnet.

**Bestimmung der Blutlipide**

Am Ende der 2-wöchigen Beobachtungsphase mit gewohnter Ernährung wie auch am Ende der 4-wöchigen Fettdiätperiode wurden nüchtern die Triglyceride, das gesamte Cholesterin und das HDL-Cholesterin bestimmt. Dazu wurde 4 ml venöses Blut in EDTA-Röhrchen entnommen und zentrifugiert. Mit dem Trockenchemieapparat Refletron (Firma Boehringer, Mannheim) wurden die Blutlipide im Plasma bestimmt.

**Diät und Diätprotokollierung**

Die Probanden wurden angehalten, während der gesamten Versuchsdauer von 6 Wochen alle eingenommenen Nahrungsmittel genau zu protokollieren und die Nahrungsmittelmengen wenn immer möglich zu wägen. Die Auswertung der Nahrungsprotokolle erfolgte mit der Diätsoftware EBIS (Ernährungsberatungs- und informationssystem). Der angestrebte minimale Gehalt an Fett von 50% (Energieanteil) in der Diät wurde soweit möglich ohne grundsätzliche Veränderung des gewohnten Essverhaltens erreicht. Dies war durch selektive Bevorzugung fettreicher Nahrungsmittel möglich.

	Fett %	Kohlenhydrate %	Eiweiss %	Alkohol %	Energie kcal
gewohnte Nahrung	28.83 ± 1.60	54.69 ± 2.83	14.08 ± 0.75	2.12 ± 0.92	2119 ± 126
Fettdiät	51.56 ± 0.84	33.09 ± 0.79	14.19 ± 0.59	1.06 ± 0.38	2340 ± 145

Mittelwert der 7 Probanden und Standardfehler des Mittelwertes. Angaben in Energieprozenten.

Tabelle 2: Gewohnte Nahrung und Fettdiät

**Testmahlzeiten**

Die Testmahlzeiten wurden standardisiert an die Probanden abgeben und von diesen 3 Stunden vor den Belastungen eingenommen. Eine fettreiche Testmahlzeit enthielt 63% Fett, 20% Kohlenhydrate und 17% Eiweiss bei 749 kcal; eine kohlenhydratreiche Testmahlzeit bestand aus 16% Fett, 73% Kohlenhydrate und 11% Eiweiss bei 744 kcal. Die Testmahlzeiten waren für alle Probanden identisch.

**Statistische Auswertung**

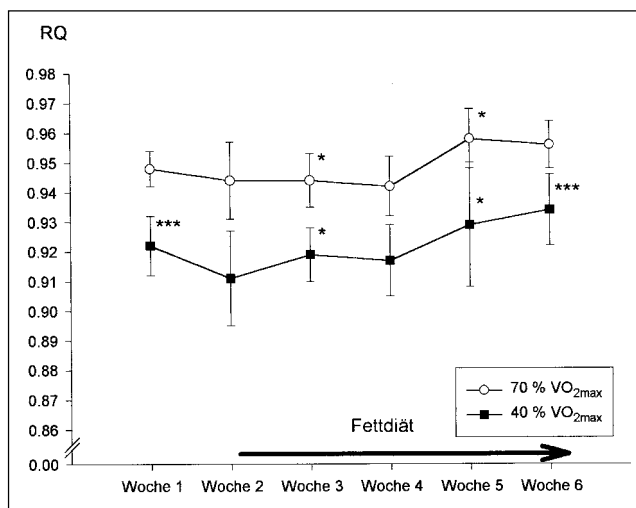
Die statistischen Tests zur Prüfung der Signifikanz von Unterschieden wurden aufgrund der Einzelwerte der Probanden vorgenommen (gepaarte t-Tests).

**Resultate**

**Respiratorischer Quotient**

Die Resultate der Bestimmung des respiratorischen Quotienten (RQ) bei einer Belastung von 40% und 70%  $VO_{2max}$  nach kohlenhydratreicher und nach fettreicher Testmahlzeit sind in den Abbildungen 1a und 1b dargestellt. Angegeben sind die RQ-Werte (Mittelwerte und deren Standardfehler), berechnet aus den Einzelwerten der 7 Probanden.

Wie zu erwarten war, ist der respiratorische Quotient (RQ) bei 70%  $VO_{2max}$  signifikant grösser als bei 40%  $VO_{2max}$  (obere bzw. untere Kurve). Ebenso zeigt sich, dass bei gleicher Belastung der RQ bei den meisten Messpunkten nach einer kohlenhydratreichen Testmahlzeit (Abb. 1a) grösser ist als nach einer fettreichen Testmahlzeit (Abb. 1b).



Signifikanz des Unterschieds nach kohlenhydratreicher (Abb.1a)/fettreicher (Abb. 1b) Testmahlzeit: \* 2p < 0.05, \*\* 2p < 0.01, \*\*\* 2p < 0.005

Abbildung 1a: RQ nach kohlenhydratreicher Testmahlzeit

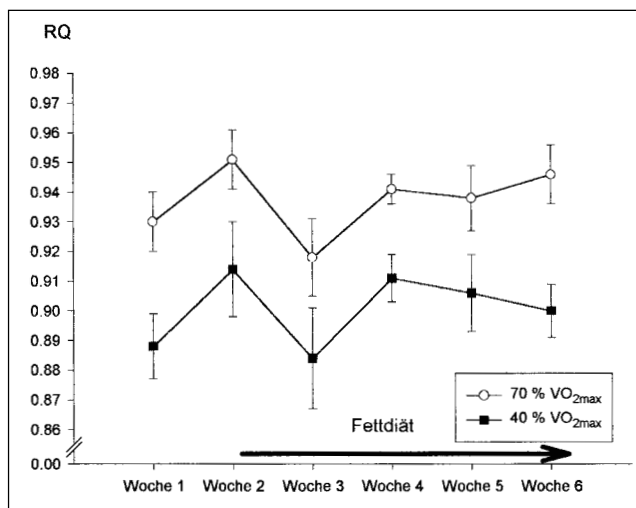


Abbildung 1b: RQ nach fettreicher Testmahlzeit

**Blutlipide**

Die Blutlipid-Werte vor und nach der Fettdiät sind in Tabelle 3 aufgeführt. Angegeben sind die Mittelwerte und deren Standardfehler, berechnet aus den Einzelwerten der 7 Probanden.

	Triglyceride	Cholesterin	HDL-Cholesterin	HDL-Chol./Chol.
vor Fettdiät	1.07 ± 0.09	4.19 ± 0.13	1.22 ± 0.08	0.29 ± 0.02
nach Fettdiät	0.83 ± 0.02 *	4.21 ± 0.23	1.37 ± 0.08 *	0.33 ± 0.02 **

Signifikanz des Unterschieds vor/nach Fettdiät: \* 2p < 0.05, \*\* 2p < 0.01  
Normwerte: Triglyceride < 2.3, Cholesterin < 5.2, HDL-Cholesterin > 0.9

Tabelle 3: Blutlipidwerte nüchtern (in mMol/l)

Die Bluttriglyceridwerte sind nach der Fettdiät signifikant tiefer als vor der Diät. Beim totalen Cholesterin wird keine Veränderung festgestellt, das HDL-Cholesterin steigt leicht an. Dadurch nimmt das Verhältnis HDL-Cholesterin/Cholesterin signifikant zu. Alle diese Veränderungen liegen im Normbereich für diese Messungen.

**Diskussion**

**Hauptbefund**

Das wichtigste Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist die Feststellung, dass der respiratorische Quotient (RQ) im Fließgleichgewicht (steady state) bei untrainierten Testpersonen durch eine

fettreiche bzw. kohlenhydratreiche Testmahlzeit geringfügig, aber signifikant verändert werden kann.

Der RQ ist nach einer kohlenhydratreichen Testmahlzeit grösser als nach einer fettreichen Testmahlzeit. Bei 40%  $\text{VO}_2\text{max}$  beträgt der Unterschied über alle Messungen durchschnittlich 0.021 ( $p < 0.001$ ), bei 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  durchschnittlich 0.012 ( $p < 0.005$ ). Bei 40%  $\text{VO}_2\text{max}$  ist dieser Unterschied sowohl vor als auch während der 4-wöchigen Fettdiät signifikant ( $p < 0.05$  bzw.  $p < 0.01$ ). Bei 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  besteht ein Unterschied ebenfalls schon vor der Fettdiät, ist aber nicht signifikant. Während der 4-wöchigen Fettdiät wird der Unterschied auch bei 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  signifikant ( $p < 0.01$ ). Eine fettreiche Diät über 4 Wochen akzentuiert somit diesen Unterschied, indem die durch Testmahlzeiten induzierte Veränderung des RQ nicht nur bei einer niedrigen, sondern auch bei einer mittleren Arbeitsintensität nachgewiesen werden kann. Die Hypothese 1 ist damit bestätigt worden. Eine kohlenhydratreiche Mahlzeit erhöhte den RQ gegenüber einer fettreichen Mahlzeit bei 40%  $\text{VO}_2\text{max}$  um 2.3%, bei 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  um 1.3%. Dies entspricht einer Vermehrung des Kohlenhydratmetabolismus um 7% bzw. 4%.

Die Ernährung kurz vor der Belastung spielt damit eine wesentliche Rolle für die Substratselektion der Muskulatur bei niedrigen und mittleren Belastungen. Bereits Christensen und Hansen [4] stellten fest, dass eine Kohlenhydrateinnahme in den Stunden vor der Belastung zu einer vergrösserten Kohlenhydratoxidation auf Kosten der Fettoxidation führt. Auch Pirnay et al. [33] stellten fest, dass eine Kohlenhydrateinnahme vor der Belastung zu einer generell grösseren Kohlenhydratoxidation bei niedrigen bis mittleren Belastungsintensitäten führt. Andere Studien zeigten, dass der Substratmetabolismus vor allem in der Anfangsphase einer Ausdauerleistung durch vorgängige Testmahlzeiten beeinflusst werden kann [7, 30, 42]. Lambert et al. [25] vermuteten, dass durch akute Kohlenhydrateinnahme vor oder während der Belastung der RQ entweder durch die unterschiedliche Verfügbarkeit von freien Fettsäuren oder durch die fehlende Anlieferung rasch zugänglicher Nahrungsfette wie Triglyceride modifiziert werden kann. Andererseits wird die Kohlenhydratoxidation auch durch die erhöhten Glucose- und Insulinspiegel nach Kohlenhydrateinnahme gefördert [6]. Welche Mechanismen zur Modifikation beitragen, bleibt aber unklar. Zudem bleibt offen, ob eine Fetteinnahme auch tatsächlich die Fettoxidation fördert. Vermutet wird, dass der tiefere RQ zumindest in Ruhe eher durch eine Verkleinerung der Kohlenhydratanteiles als durch die Vergrösserung des Fettanteiles der Mahlzeiten zustande kommt [8, 40].

#### Grenzen der gewählten Messmethoden

Bei dieser Studie wurde der Gesamtkörper-RQ gemessen. Riley et al. [35] vermuteten, dass der Gesamtkörper-RQ bei niedriger Belastung ( $< 50\% \text{VO}_2\text{max}$ ) den Muskel-RQ nicht genügend reflektiert. Für den vorliegenden Fall lässt sich errechnen, dass bei 40%  $\text{VO}_2\text{max}$  die arbeitende Muskulatur rund 18.4 ml/min/kg Sauerstoff verbraucht, was rund 80% des aufgenommenen Sauerstoffs entspricht. Der Gesamtkörper-RQ widerspiegelt also auch bei niedrigen Belastungsintensitäten recht gut den Muskel-RQ.

Die RQ-Messungen erfolgten immer 3 Stunden nach Einnahme der Testmahlzeiten. Aus logistischen Gründen konnte nicht berücksichtigt werden, dass Kohlenhydrate und Fette nicht gleich schnell resorbiert werden und dem Körper demzufolge auch nicht gleich schnell zur Verfügung stehen. Es ist nicht davon auszugehen, dass dies die Aussage der Studie wesentlich verändert hätte.

#### Auswirkungen einer 4 Wochen dauernden fettreichen Diät auf den RQ

Die chronische Diätmanipulation bestand in einer Erhöhung des Fettgehalts der Nahrung von 29% auf 52% Energieanteil, wobei der Energiegehalt der Nahrung insgesamt konstant gehalten blieb. Es wurde erwartet, dass durch diese Erhöhung des Fettanteils nach 4 Wochen eine nachhaltige Senkung des RQ festzustellen sei (Hypothese 2). Das Experiment hat diese Vermutung nicht bestätigt. Nach fettreichen Testmahlzeiten wurde keine Veränderung

des RQ als Folge der vierwöchigen Fettdiät festgestellt; nach kohlenhydratreichen Testmahlzeiten stieg der RQ infolge der 4-wöchigen Fettdiät tendenziell sogar leicht an.

Der Grund für dieses Ergebnis ist unklar. Möglicherweise lässt sich dieser Effekt dadurch erklären, dass der Betrag an Fett in der Nahrung im Vergleich zu den Körperfettreserven sehr klein ist und somit für die Fett-Oxidation eine untergeordnete Rolle spielt. Kohlenhydrate können hingegen nur in einem viel kleineren Ausmass gespeichert werden und beeinflussen deshalb möglicherweise die Steuerung des Substratmetabolismus stärker als Fett [8]. Allerdings konnten andere Autoren bei Untrainierten weder durch eine fett- noch durch eine kohlenhydratreiche isokalorische Diätumstellung von 4 Wochen Dauer eine Beeinflussung des RQ bei einer gegebenen Belastungsintensität feststellen [34].

Gemäss Literatur lässt sich der RQ bei Belastung sowohl bei Sportlern als auch bei Untrainierten manipulieren, wenn der Unterschied zwischen den Diäten genug gross ist (Phinney et al. [32], fettarm 17%, fettreich = 85%; Lambert et al. [24], fettarm = 12%, fettreich = 67%, Helge et al. [11], fettarm = 20%, fettreich = 62%). Der in der vorliegenden Untersuchung vorgenommene Diätwechsel war dazu offenbar zu gering. Aufgrund der vorliegenden Studie wird vermutet, dass nicht nur die Differenz des Fettgehaltes, sondern auch das Niveau, auf welchem die Änderung stattfindet, eine Rolle spielt. Möglicherweise hat ein Wechsel von beispielsweise 15 auf 35% Fett in der Nahrung einen stärkeren Einfluss als ein Wechsel von 30 auf 50% Fett.

#### Einfluss der Belastungsintensität auf den RQ

Wie zu erwarten war, steigt der respiratorische Quotient (RQ) mit zunehmender Belastungsintensität signifikant an. Bei 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  ist der RQ nach einer fettreichen Testmahlzeit durchschnittlich um 0.037, nach einer kohlenhydratreichen Testmahlzeit durchschnittlich um 0.027 grösser als bei 40%  $\text{VO}_2\text{max}$  ( $p < 0.001$ ). Somit werden bei erhöhter Intensität mehr Kohlenhydrate verbrannt [4, 36, 37]. Interessant ist der Befund, dass der RQ-Unterschied zwischen 40% und 70%  $\text{VO}_2\text{max}$  nach fettreichen Testmahlzeiten signifikant grösser ist als nach kohlenhydratreichen Testmahlzeiten (Abb. 1b und 1a).

#### RQ bei Trainierten und Untrainierten

Training steigert die oxidative Kapazität der Skelettmuskulatur und begünstigt dadurch die Fettoxidation. Zur Vermeidung von Trainingseffekten wurden die untrainierten Probanden deshalb aufgefordert, ihren gewohnten Bewegungsumfang beizubehalten. Es wurde angenommen, dass eine wöchentliche Zusatzaktivität von 40 Minuten Ergometer-Velofahren bei relativ niedrigen Belastungen noch keinen Einfluss auf den Trainingszustand der Probanden habe. Die gemessenen Herzfrequenzdaten bestätigen diese Annahme. Eine metabolische Anpassung der Muskelzellen unter Belastung kann aber nicht restlos ausgeschlossen werden.

Bei den untrainierten Probanden blieb der RQ bei submaximaler Belastung während der ganzen Versuchsdauer nach fettreichen Testmahlzeiten konstant und nahm nach kohlenhydratreichen Testmahlzeiten tendenziell leicht zu. Im Gegensatz dazu wurde bei Dauerleistungssportlern als Folge einer langfristigen fettreichen Diät ein signifikanter, dauerhafter und deutlicher Abfall des RQ festgestellt [24, 32]. Auch bei Untrainierten, die während einer 4-wöchigen Fettdiät ein Training absolvierten, konnte ein signifikanter RQ-Abfall festgestellt werden [13].

Die Unterschiede zwischen Ausdauertrainierten und Untrainierten zeigen sich vor allem in einer höheren Fettoxidationsrate der Trainierten. Dazu tragen verschiedene Adaptationsmechanismen bei: eine grössere Aktivität oxidativer Enzyme [12, 20, 21, 22], eine Zunahme des Volumenanteils an Mitochondrien [14, 15, 23], eine grössere Kapillardichte im Muskelgewebe [23], ein grösserer Verbrauch von intramuskulären Triglyceriden [18, 27], eine veränderte Fettsäurenanlieferung zu den Mitochondrien [20, 21, 22]. Eine niedrigere Glycogenolyserate und eine langsamere Plasmaglucoseaufnahme wurden ebenfalls als Gründe genannt [5, 14, 23]. Auch konnte gezeigt werden, dass Training generell die Kapa-

zität steigert, alle Substrate zu brauchen [2]. Möglicherweise sind deshalb Sportler bei der Wahl ihrer Energielieferanten flexibler, wodurch eine Umstellung von Kohlenhydrat- auf Fettverbrennung bei Sportlern schneller erfolgen könnte als bei Untrainierten. Dies würde auch erklären, weshalb bei Trainierten der RQ nach einer Fettdiät abnimmt, dieser Effekt bei Untrainierten jedoch nicht auftritt. Hypothetisch könnte auch vermutet werden, dass bei Sportlern mit einem relativ kleinen Körperfettanteil der Betrag an Fett in der Nahrung für die Fettoxidation an Bedeutung gewinnt. Die Fettoxidation in Ruhe korreliert nach Roy et al. [38] mit der fettfreien Körpermasse und der Diät, dagegen wurde die Substratoxidation nicht durch den Trainingszustand der Probanden beeinflusst. Bei trainierten Frauen konnte im Vergleich mit trainierten Männern (mit einem niedrigeren Körperfettanteil) keine Unterschiede im Substratmetabolismus bei verschiedenen Belastungsintensitäten festgestellt werden [37].

#### Geschlechtsspezifische RQ-Unterschiede

Die Population der Probanden ist zu klein, um statistisch signifikante Aussagen über geschlechtsspezifische RQ-Unterschiede machen zu können. Doch fällt auf, dass Frauen – unabhängig von der Belastung, der Testmahlzeit und der längerfristigen Ernährung – einen tieferen RQ aufweisen als Männer. Dieser Befund steht im Widerspruch zu den Untersuchungen von Schrauwen et al. [39], die nach 2 Wochen Fettdiät bei Frauen einen höheren RQ ergaben. Zudem war dort die Abnahme des RQ während der zweiten Woche Fettdiät bei Frauen schwächer als bei Männern. Möglicherweise kommen die unterschiedlichen Resultate durch die unterschiedlichen RQ-Messungen zustande: Bei Schrauwen et al. [39] wurden die RQ-Werte in Ruhe bestimmt, in der vorliegenden Studie jedoch bei submaximaler Belastung. Wir gehen davon aus, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in der Substratwahl der Muskulatur bestehen könnten, was in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden sollte.

#### Blutlipidprofil

Erstaunlicherweise verschlechtert sich das Risikofaktorenprofil durch eine isokalorische Fettdiät über 4 Wochen nicht. Bei einem gleichbleibenden Gesamtcholesterin-Spiegel nahm das HDL-Cholesterin um 0.15 mMol/l zu ( $p < 0.05$ ). Der Quotient HDL-Cholesterin/Cholesterin verbesserte sich somit signifikant ( $p < 0.005$ ). HDL-Cholesterin ist dafür verantwortlich, dass Cholesterin aus der Peripherie zur Leber transportiert wird, damit es dort abgebaut und anschliessend ausgeschieden werden kann. Untersuchungen bei Sportlern zeigten ebenfalls einen Anstieg des HDL-Cholesterins nach einer längerfristigen Fettdiät [26]. Pendergast et al. [31] stellten im Gegensatz dazu keinen Anstieg des HDL-Cholesterins fest; das Gesamtcholesterin blieb, in Übereinstimmung mit den vorliegenden Resultaten, über 4 Wochen fettreiche Diät konstant. Leddy et al. [26] hatten bei der Untersuchung der Lipoprotein-Risikofaktoren (Triglyceride, Cholesterin-Subfraktionen, Apolipoproteine) bei Sportlern einen ähnlichen Befund. Als Folge der vorliegenden Fettdiät nahmen die Triglyceridwerte um 0.24 mMol/l ab ( $p < 0.05$ ). Eine Abnahme der Triglycerid-Werte nüchtern als Folge einer Fettdiät fanden auch Schrauwen et al. [39]. Bei ihnen manifestierte sich dieser Effekt bereits am 4. und 8. Tag nach dem Wechsel auf eine Fettdiät. Mit der vorliegenden Studie kann nicht abgeschätzt werden, wie sich die Blutlipidwerte bei einer noch länger dauernden fettreichen Ernährung verhalten. Brown & Cox [3] stellten bei Sportlern auch nach 3 Monaten Fettdiät keine Verschlechterung des Blutlipidprofils fest.

#### Geschlechtsspezifische Unterschiede bei den Blutlipiden

Die kleine Anzahl Probanden lässt keine statistischen Aussagen zu, doch deuten die Resultate der Studie darauf hin, dass bei Frauen und Männern die Anpassung an eine fettreiche Ernährung verschieden abläuft. Bei Frauen steigt das Cholesterin bei der Fettdiät tendenziell an. Doch auch das HDL-Cholesterin nimmt bei Frauen stärker zu als bei Männern, so dass im Endeffekt bei

beiden Geschlechtern etwa der gleiche HDL-Cholesterin/Cholesterin-Quotient resultiert. Bei Männern ist die Triglycerid-Abnahme bei Fettdiät tendenziell stärker, wobei Männer vor der Fettdiät eine höhere Triglycerid-Konzentration als Frauen aufwiesen. Schrauwen et al. [39] fanden nach 1 Woche bei Frauen nüchtern eine signifikant höhere Fettsäurekonzentration, und das Glycerol stieg signifikant an; bei Männern stellten sie keinen Unterschied fest. Frauen reagieren möglicherweise schneller und stärker auf ein erhöhtes Lipidangebot.

#### Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass der respiratorische Quotient (RQ) im Flussgleichgewicht (steady state) durch eine fettreiche bzw. kohlenhydratreiche Testmahlzeit geringfügig, aber signifikant verändert werden kann. Dabei ist der RQ erwartungsgemäss nach einer kohlenhydratreichen Mahlzeit grösser als nach einer fettreichen Mahlzeit. Als Folge der 4-wöchigen isokalorischen fettreichen Diät wurde dieser Unterschied bei einer mittleren Arbeitsintensität auch nach einer kohlenhydratreichen Testmahlzeit signifikant. Bei Untrainierten hat die kurzfristige Ernährung somit einen Einfluss auf die Substratelektion der Muskulatur. Während der 4 Wochen Fettdiät wurde keine Abnahme des RQ bei submaximaler Belastung festgestellt. Die RQ-Werte nach fettreichen Testmahlzeiten veränderten sich als Folge einer Fettdiät über 4 Wochen nicht. Nach kohlenhydratreichen Testmahlzeiten wurde hingegen gegen Ende der Fettdiät eine leichte Zunahme des RQ festgestellt. Untrainierte zeigen demnach ein von Sportlern verschiedenes Verhalten der Substratwahl der Muskulatur. Das Risikofaktorenprofil der Blutlipide wies nach der 4-wöchigen Beobachtungsdauer mit vermehrter Einnahme von Fett keine Verschlechterung auf. Neben dem Trainingszustand beeinflusst auch die Ernährung, der prozentuale Fettanteil in der Diät und die Wahl der Testmahlzeit den Fettmetabolismus.

#### Korrespondenzadresse:

Dr. med. Christa Leutert, Florastrasse 18, CH-3005 Bern

#### Literaturverzeichnis

- 1 Bergström J., Hermansen L., Hultman E., Saltin B. (1967): Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol. Scand.* 71: 140–150.
- 2 Brooks G.A., Mercier M. (1994): The balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: The crossover concept. *J. Appl. Physiol.* 76: 2253–2261.
- 3 Brown R.C., Cox C.M. (1998): Effects of high fat versus high carbohydrate diets on plasma lipids and lipoproteins in endurance athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30 (12): 1677–1683.
- 4 Christensen E.H., Hansen O. (1939): Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Scand. Arch. Physiol.* 81: 160–171.
- 5 Coggan A.R., Williams B.D. (1995): Metabolic adaptations to endurance training: substrate metabolism during exercise. *Exercise metabolism*, Champaign, Human Kinetics Publishers: 41–71.
- 6 Costill D.L., Coyle E., Dalsky G., Evans W., Fink W., Hoppes D. (1977): Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J. Appl. Physiol.* 43(4): 695–699.
- 7 Coyle E.F., Coggan A.R., Hemmert M.K., Lowe R.C., Walters T.J. (1985): Substrate usage during prolonged exercise following a pre-exercise meal. *J. Appl. Physiol.* 59(2): 429–433.
- 8 Flatt J.P., Ravussin E., Acheson K.J., Jéquier E. (1985): Effects of dietary fat on postprandial substrate oxidation and on carbohydrate and fat balances. *J. Clin. Invest.* 76: 1019–1024.
- 9 Galbo H., Holst J.J., Christensen N.J. (1979): The effect of different diets and of insulin on the hormonal response to prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* 107: 19–32.
- 10 Goedecke J.H., Christie C., Wilson G., Dennis S.C., Noakes T.D., Hopkins W.G., Lambert E.V. (1999): Metabolic adaptations to a high-fat diet in endurance cyclists. *Metabolism* 48: 1509–1517.

- 11 Helge J.W., Richter E.A., Kiens B. (1996): Interaction of training and diet on metabolism and endurance during exercise in man. *J. Physiol.* 492: 293–306.
- 12 Helge J.W., Kiens B. (1997): Muscle enzyme activity in humans: role of substrate availability and training. *Am. J. Physiol.* 272(5): R1620–R1624.
- 13 Helge J.W., Wulff B., Kiens B. (1998): Impact of a fat-rich diet on endurance in man: role of the dietary period. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30(3): 456–461.
- 14 Holloszy J.O., Coyle E.F. (1984): Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol.* 56: 831–838.
- 15 Hoppeler H. (1986): Exercise-induced ultrastructural changes in skeletal muscle. *Int. J. Sports Med.* 7: 187–204.
- 16 Hoppeler H., Billeter R., Horvath P.J., Leddy J.J., Pendergast D.R. (1999): Muscle structure with low- and high-fat diets in well-trained male runners. *Int. J. Sports Med.* 20: 522–526.
- 17 Horton T.J., Drougas H.J., Sharp T.A., Martinez L.R., Reed G.W., Hill J.O. (1994): Energy balance in endurance-trained female cyclists and untrained controls. *J. Appl. Physiol.* 76(5): 1937–1945.
- 18 Hurley B.F., Nemeth P.M., Martin III W.H., Hagberg J.M., Dalsky G.P., Holloszy J.O. (1986): Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. *J. Appl. Physiol.* 60: 562–567.
- 19 Jansson E., Kaijser L. (1982): Effect of diet on the utilization of blood-borne and intramuscular substrates during exercise in man. *Acta Physiol. Scand.* 115: 19–30.
- 20 Jeukendrup E., Saris W.H.M., Wagenmakers A.J.M. (1998a): Fat metabolism during exercise: a review. Part I: fatty acid mobilization and muscle metabolism. *Int. J. Sports Med.* 19: 231–244.
- 21 Jeukendrup E., Saris W.H.M., Wagenmakers A.J.M. (1998b): Fat metabolism during exercise: a review. Part II: regulation of metabolism and the effects of training. *Int. J. Sports Med.* 19: 293–302.
- 22 Jeukendrup E., Saris W.H.M., Wagenmakers A.J.M. (1998c): Fat metabolism during exercise: a review. Part III: effects of nutritional interventions. *Int. J. Sports Med.* 19: 371–379.
- 23 Kiens B., Essen-Gustavsson B., Christensen N.J., Saltin B. (1993): Skeletal muscle substrate utilization during submaximal exercise in man: effect of endurance training. *J. Physiol.* 469: 459–478.
- 24 Lambert E.V., Speechly D.S., Dennis S.C., Noakes T.D. (1994): Enhanced endurance performance during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high-fat diet in trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 287–293.
- 25 Lambert E.V., Hawley J.A., Goedecke J., Noakes T.D., Dennis S.C. (1997): Nutritional strategies for promoting fat utilization and delaying the onset of fatigue during prolonged exercise. *J. Sports Sci.* 15: 315–324.
- 26 Leddy J.J., Horvath P.J., Rowland R., Pendergast D.R. (1996): Increased dietary fat does not adversely affect multiple cardiovascular risk factors in male and female runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29: 17–25.
- 27 Martin III W.H., Dalsky G.P., Hurley B.F., Matthews D.E., Bier D.M., Hagberg J.M., Rogers M.A., King D.S., Holloszy J.O. (1993): Effect of endurance training on plasma free fatty acid turnover and oxidation during exercise. *Am. J. Physiol.* 265: E708–E714.
- 28 Montain S.J., Hopper M.K., Coggan A.R., Coyle E.F. (1991): Exercise metabolism at different time intervals after a meal. *J. Appl. Physiol.* 70: 882–888.
- 29 Muoio D.M., Leddy J.L., Horvath P.J., Awad A.B., Pendergast D.R. (1994): Effect of dietary fat on metabolic adjustments to maximal  $\dot{V}O_2$  and endurance in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 81–88.
- 30 Okano G., Sato Y., Takumi Y., Sugawara M. (1996): Effect of 4h preexercise high carbohydrate and high fat meal ingestion on endurance performance and metabolism. *Int. J. Sports Med.* 17(7): 530–534.
- 31 Pendergast D.R., Horvath P.J., Leddy J.J., Venkatraman J.T. (1996): The role of dietary fat on performance, metabolism, and health. *Am. J. Sports Med.* 24(6): S53–S58.
- 32 Phinney S.D., Bistrian B.R., Evans W.J., Gervino E., Blackburn G.L. (1983): The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: preservation of submaximal exercise capability with reduced carbohydrate oxidation. *Metabolism* 32: 769–777.
- 33 Pirnay F., Crielaard J.M., Pallikarakis N., Lacroix M., Mosora F., Krzentowski G., Luyckx A.S., Lefebvre P.J. (1982): Fate of exogenous glucose during exercise of different intensities in humans. *J. Appl. Physiol.* 53: 1620–1624.
- 34 Pogliaghi S., Veicsteinas A. (1999): Influence of low and high dietary fat on physical performance in untrained males. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(1): 149–155.
- 35 Riley M., Wasserman K., Fu P.C., Cooper C.B. (1996): Muscle substrate utilization from alveolar gas exchange in trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72: 341–348.
- 36 Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Gastaldelli A., Horowitz J.F., Wolfe R.R. (1993): Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* 265: E380–E391.
- 37 Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Rosenblatt J., Wolfe R.R. (2000): Substrate metabolism during different exercise intensities in endurance-trained women. *J. Appl. Physiol.* 88: 1707–1714.
- 38 Roy H.J., Lovejoy J.C., Keenan M.J., Bray G.A., Windhauser M.M., Wilson J.K. (1998): Substrate oxidation and energy expenditure in athletes and nonathletes consuming isoenergetic high- and low-fat diets. *Am. J. Clin. Nutr.* 67: 405–411.
- 39 Schrauwen P., Lichtenbelt W.D., Saris W.H., Westerterp K.R. (1997): Changes in fat oxidation in response to a high-fat diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 66: 276–282.
- 40 Schutz Y., Flatt J.P., Jéquier E. (1989): Failure of dietary fat to promote fat oxidation: a factor favoring the development of obesity. *Am. J. Clin. Nutr.* 50: 307–314.
- 41 Sherman W.M., Costill D.L., Fink W.J., Miller J.M. (1981): Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance. *Int. J. Sports Med.* 2: 114–118.
- 42 Whitley H.A., Humphreys S.M., Campbell I.T., Keegan M.A., Jayanetti T.D., Sperry D.A., MacLaren D.P., Reilly T., Frayn K.N. (1998): Metabolic and performance responses during endurance exercise after high-fat and high-carbohydrate meals. *J. Appl. Physiol.* 85(2): 418–424.