

Beat Knechtle

Gesundheitszentrum, St. Gallen

Kann Fatloading die Ausdauerleistungsfähigkeit verbessern?

Zusammenfassung

Die in mehreren Übersichtsartikeln geäußerte Meinung, eine Fettdiät verbessere die Ausdauerleistung nicht, beruht mehrheitlich auf der falschen Wahl der Belastungsprotokolle und der zu tiefen prozentualen Menge an Fett in der Diät. Etliche Studien mit trainierten Ausdauerathleten haben gezeigt, dass eine Belastung mittlerer Intensität nach einer hochprozentigen Fettdiät teils signifikant länger durchgehalten werden kann. Von einer konsequenten Fettdiät profitiert derjenige Athlet, der eine mehrstündige bis mehrtägige Ausdauerbelastung (> 6 Stunden) in Angriff nimmt und dessen Belastungsintensität im Bereich von 50% bis höchstens 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ liegt.

Schlüsselwörter:

Diät, Leistung, Ausdauer

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 53 (4), 179–184, 2005

Abstract

Wrong exercise protocols and diets too low in fat are likely reasons that a fat diet is not improving endurance performance as it is expressed in several review articles. Some studies have shown that a medium intensity exercise load can be maintained significantly longer after a fat diet by trained endurance athletes. An athlete will benefit from a fat diet during an endurance exercise, which lasts several hours up to several days (> 6 hours) and which intensity lies between 50% and 60% $\dot{V}O_2\text{max}$.

Key words:

Diet, performance, endurance

Einleitung

Die Bedeutung einer fettreichen Diät in Bezug auf eine Leistungssteigerung im Ausdauerbereich wurde in etlichen Studien [41, 42, 49, 64, 66, 67, 76] untersucht und in mehreren Übersichtsartikeln mehrheitlich kritisch beurteilt und hinterfragt [5, 19, 20, 40]. In der Mehrzahl der Studien [14, 30, 34, 56, 66, 77] sowie der Übersichtsartikel [5, 17, 19, 20, 43] wird der Fettdiät kein leistungssteigernder Effekt attestiert. Nur in wenigen Arbeiten wird ein positiver Einfluss des Fatloadings auf die Leistungsfähigkeit nachgewiesen [41, 49], und dieser bleibt allenfalls für Langstreckenbelastungen reserviert [40]. Erstaunlicherweise konnte aber in Tierversuchen mit Ratten – die den Humanstudien vorausgingen – eine teils deutliche Leistungssteigerung gefunden werden.

Die Studien beim Menschen, die den Einfluss einer Fettdiät auf die Ausdauerleistungsfähigkeit untersucht haben, werden in dieser Zusammenstellung analysiert. Einerseits werden die Studien nach Probandengruppen (trainierte gegenüber untrainierte Probanden) und nach verwendeter Belastungsart (Laufen gegenüber Radfahren) gesondert untersucht und beurteilt. Beim Radfahren liegt vorwiegend eine konzentrische Muskelbelastung vor, während beim Laufen die exzentrische Muskelbelastung im Vordergrund liegt. Aufgrund von neueren Studien ist bekannt, dass beim Laufen bei der gleichen relativen Intensität deutlich mehr Fett verbrannt wird als beim Radfahren [1, 36]. Zudem werden beim Radfahren bei der gleichen relativen Intensität höhere Laktatwerte produziert als beim Laufen [36]. Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz sind während des Laufens auch höher als während des Radfahrens [1]. Der relative Fettanteil an der Energiegewinnung ist aber beim Laufen wie beim Radfahren unabhängig von der Intensität und beträgt rund 50% [36].

Deshalb stellt sich die Frage, was im Tierversuch gegenüber den Humanstudien anders gemacht wurde.

Was ist der Hintergrund für eine Fettdiät?

Seit langem ist bekannt, dass die Energie für eine länger dauernde Ausdauerleistung aus der Oxidation von Kohlenhydraten und Fett gewonnen wird [78], wobei Fett gerade bei Belastungen tiefer Intensität über längere Zeit den grösseren Anteil an der Energielieferung stellt als die Kohlenhydrate [18, 22, 39]. Bei einer länger dauernden Belastung tiefer bis mittlerer Intensität wird in der Anfangsphase der Belastung über ein Drittel der benötigten Energie durch die Kohlenhydratoxidation geliefert; mit zunehmender Dauer der Belastung fällt dieser Anteil zugunsten der Fettoxidation auf etwa einen Fünftel ab [60]. Bei mittleren bis hohen Intensitäten kann nicht genügend Energie aus der Fettoxidation bereitgestellt werden, und es muss zusätzlich Energie aus der Kohlenhydratoxidation geliefert werden [12, 61, 65].

In den letzten Jahren wurden vermehrt Studien zum Thema fettreiche Ernährung und Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit gemacht. Eine fettreiche Ernährung führt zu verschiedenen Veränderungen im Muskelstoffwechsel. Die intramuskulären Triglyzeride (IMCL) nehmen zu [13, 25, 29, 76], das intramuskuläre Glykogen nimmt ab [15, 25, 41, 59], die im Plasma zirkulierenden freien Fettsäuren (FFS) nehmen zu [31, 32], die Fettoxidation steigt an [46, 67, 71, 72, 76], und der RQ als Zeichen der erhöhten Fettoxidation sinkt ab [4, 6, 8, 23, 31, 32, 41, 54, 55]. Diese Effekte scheinen in gewissen Studien zu einer Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zu führen.

Das Fatloading in Tierstudien

Tierstudien haben gezeigt, dass eine fettreiche Ernährung nicht nur den Muskelstoffwechsel, sondern auch die Ausdauerleistungsfähigkeit beeinflusst. Der Einfluss einer fettreichen Diät wurde

bisher meistens an Ratten untersucht (Tab. 1). Dabei konnten ausgeprägte myofibrilläre Veränderungen gefunden werden. Eine hochprozentige Fettdiät führt zu einer erhöhten Konzentration der mitochondrialen Enzyme HAD und Zitrat-Synthase in der Muskelzelle [48]. Der Gehalt an IMCL nimmt signifikant zu [10]. Die fettreiche Ernährung führt weiter zu einem tieferen Glykogengehalt der Muskulatur [48] und bewirkt während einer Belastung eine geringere Glykogenentleerung [26, 48, 51].

Besonders bemerkenswert ist, dass die fettreiche Ernährung in Kombination mit Ausdauertraining neben den Stoffwechselveränderungen in der Muskelzelle auch zu einer deutlich verbesserten Ausdauerleistungsfähigkeit führt [45, 48, 51, 70]. Um die Ausdauerleistung zu verbessern, müssen allerdings mehr als 65% Fett und weniger als 15% Kohlenhydrate während mindestens vier Wochen aufgenommen werden [21]. Eine zusätzliche Verbesserung kann erreicht werden, wenn nach einer acht Wochen langen fettreichen Ernährung und Training noch eine kohlenhydratreiche Diät angeschlossen wird [45].

Das Fatloading beim Menschen

Beim Menschen führt eine mehrtägige fettreiche Ernährung im Vergleich zu einer kohlenhydratreichen Ernährung in der Muskulatur zu gleichen Veränderungen wie im Tiermodell. Bezüglich des Einflusses auf die Leistungsfähigkeit liegen aber Unterschiede vor.

Unterschied fettreiche Mahlzeit und Fett-Diät

In Studien werden sehr unterschiedliche Protokolle verwendet [5]. Entweder sind es Fett-Diäten während Tagen bis Wochen [4, 8, 20, 29, 41, 42, 49, 75, 76] mit 60 bis 70% Fett [5, 42, 67, 74], und die tägliche Einnahme an Fett liegt bei 4 g pro kg Körpergewicht [4], oder es wird der Einfluss einer stark fetthaltigen Mahlzeit unmittelbar vor einer Belastung auf Stoffwechsel und Leistungsfähigkeit untersucht [54, 55, 56, 62, 63, 66, 73, 77].

Erhöhte Fettoxidation. Eine kurzfristige fettreiche Ernährung vor einer Belastung mittlerer Intensität führt zu einer erhöhten FFS-Konzentration im Plasma [31, 32] und einer erhöhten Fettoxidation [8, 15, 42, 54, 66, 67, 68, 74, 75, 76]. Unter Belastung steigt die Fettoxidation um 72% [79]. Dabei werden die im Plasma zirkulierenden Triglyzeride und FFS vermehrt oxidiert [69]. Dies dürfte auf eine erhöhte Aktivität der Lipoproteinlipase (LPL) zurückzuführen sein [44]. Eine Diät mit rund 65% Fett erhöht die Fettoxidation unter Belastung um das 2.5- bis fast 3-fache [67]. Wird während sechs Tagen eine fettreiche Diät eingenommen, so hat ein anschließender Tag mit einer kohlenhydratreichen Kost keinen negativen Einfluss auf die Fettoxidation, die trotz der Kohlenhydrateinnahme weiterhin erhöht ist [8]. Die Erhöhung der Fettoxidation nach kombinierter Fett-Kohlenhydrat-Einnahme könnte auf die erhöhte Aktivität der LPL mit Freisetzung von FFS aus den Triglyzeriden in den zirkulierenden Chylomikronen im Plasma zustande kommen [16].

Anstieg der IMCL. Auf muskelzellulärer Ebene kommt es zu einer Zunahme der IMCL [25, 29, 76], einer Erhöhung der HAD-Aktivität [25] sowie der Karnitin-Azyltransferase [15] im Vergleich mit einer kohlenhydratreichen Diät. Der IMCL-Gehalt nimmt um 36% [79] bis 60% zu [29]. Absolut kann der IMCL-Anteil von 1.5% [76] auf fast 3% [37] intrazelluläres Lipid pro Faservolumen ansteigen. 10% der IMCL liegen in unmittelbarer Nähe zu den Mitochondrien, und rund 30% der Oberfläche der Lipidtröpfchen haben unmittelbaren Kontakt zu den Mitochondrien [29]. Auf molekularbiologischer Ebene führt die erhöhte Fettzufuhr zu einer vermehrten Expression von mRNA zur Bildung von Proteinen für den Transport und die Oxidation von Fetten [7].

Abnahme des Muskelglykogens. Das Fatloading hat aber auch einen Einfluss auf den Glykogengehalt in der Arbeitsmuskulatur sowie auf den Verbrauch der Kohlenhydrate unter Belastung [4]. Wie im Tiermodell führt die fettreiche Ernährung zu einer deutlichen Abnahme der intramuskulären Glykogendepots in den Typ-I-Fasern [15, 25, 41, 59]. Dieser Einfluss ist abhängig von der Dauer

der Diätphase und dem Anteil an Fett in der Nahrung. Wird nach einer Fettdiät eine kohlenhydratreiche Diät angeschlossen, kommt es zu einer deutlichen Zunahme des Muskelglykogens [24]. Eine fünfwochige Diätphase mit 53% Fett erhöht die IMCL ohne die Glykogendepots negativ zu beeinflussen [76]. In Ruhe wird der Kohlenhydratstoffwechsel nicht beeinflusst [74]. Die Kohlenhydratoxidation wird unter Belastung eingeschränkt [15, 42]. Das Muskelglykogen nimmt während einer Belastung mittlerer Intensität weniger rasch ab [15, 31, 32, 42], und es resultiert ein Einsparen von Glykogen [4, 5, 57]. Die verminderte Kohlenhydratoxidation führt zu tieferen Laktatkonzentrationen bei einer Ausdauerbelastung [27, 28, 42, 75].

Einfluss auf die Leistungsfähigkeit

Obwohl viele Übersichtsartikel keine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit durch Fatloading annehmen [5, 19, 20, 40], konnte in mehreren Studien ein positiver Einfluss einer fettreichen Ernährung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit gezeigt werden (Tab. 2). Nur in einzelnen Fällen konnte keine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit bei Trainierten gezeigt werden (Tab. 3). Offensichtlich kann eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit ausschliesslich bei Trainierten erzielt werden, bei Untrainierten ist keine Leistungssteigerung nachweisbar (Tab. 4).

Am ehesten kommt die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit bei Trainierten durch eine rasche und ausgeprägte FFS-Erhöhung vor der Belastung zustande [62, 63]. Aber auch nach mehrtägigen, fettangereicherten Diäten kann eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit gezeigt werden [4, 8, 41, 42]. Zudem hat ein anschliessendes Carboloadung nach einem Fatloading ebenfalls noch einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit [42].

Gründe für fehlende Leistungsverbesserungen?

Einfluss auf $\dot{V}O_2\max$. Wenn $\dot{V}O_2\max$ als das Mass der Ausdauerleistungsfähigkeit verwendet wird, dann kann keine Verbesserung nachgewiesen werden, denn eine fettreiche Diät bei Ausdauerathleten erhöht $\dot{V}O_2\max$ nicht [27, 29, 47, 62, 76].

Unterschied Fettmahlzeit und Fettdiät. In mehreren Studien konnte auf eine Fett-Mahlzeit hin keine Verbesserung der Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden [4, 8, 15, 47, 66, 67]. In solchen Studien wurden oft relativ kurze und eher intensive Belastungen durchgeführt [6, 8, 15, 43, 54, 73, 76]. Auch bei Fettdiäten konnte nicht immer eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit gezeigt werden [33]. Eine mehrwöchige fettreiche Ernährung mit 85% Fett, 15% Eiweiss und ohne Kohlenhydrate führt bei trainierten Athleten ebenfalls zu keiner Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit im Bereich der optimalen Fettoxidation von 65% $\dot{V}O_2\max$, aber auch zu keiner Verschlechterung [59].

Selbst wenn nach einer mehrtägigen Fettdiät noch ein bis zwei Tage Kohlenhydrate im Sinne eines Carboloadung aufgenommen werden, kann die Leistungsfähigkeit nicht immer verbessert werden [5]. Wenn nach einem Fatloading ein Carboloadung durchgeführt wird, wird trotzdem die Verfügbarkeit von Kohlenhydraten unter Belastung eingeschränkt [35]. Es wird auch keine Verbesserung bei eher länger dauernden Belastungen nachgewiesen. Nehmen sehr gut trainierte Radfahrer 90 Minuten vor einem Belastungstest, bestehend aus verschiedenen Einheiten, eine fettreiche Mahlzeit ein, so wird weder eine Sprint- noch eine Ausdauerleistung positiv beeinflusst [66]. Auch nach einer Fettdiät während zwei Wochen mit 65% Fett nimmt die Leistung über 100 km Radfahren nicht zu [67].

Trainingszustand. Eine fettreiche Ernährung kann die Ausdauerleistungsfähigkeit nur bei gleichzeitigem intensivem Training verbessern (Tab. 2). Eine mehrwöchige fettreiche Ernährung ohne Ausdauertraining führt weder zu einem höheren $\dot{V}O_2\max$ noch zu einer Verbesserung der Ausdauerleistung [64]. Bei Untrainierten führt eine fettreiche Ernährung auch mit Training zu einer deutlich schlechteren Ausdauerleistungsfähigkeit als eine kohlenhydratreiche Diät (Tab. 4). Vor allem eine intensive Belastung im Bereich von 80% $\dot{V}O_2\max$ verändert sich nicht [25].

Anzahl Versuchstiere	Art der Diät	Art des Belastungsprotokolls	Ergebnis	Quelle
48 männliche Ratten	8 Wochen Fettdiät (79% Fett, 21% Eiweiss, 0% Kohlenhydrate) oder Kohlenhydratdiät (10% Fett, 21% Eiweiss, 69% Kohlenhydrate)	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Mit Fettdiät 39% längeres Rennen (356.8 ± 37.8 vs. 257.5 ± 29.2 min) als mit Kohlenhydratdiät (signifikant)	45
87 männliche Ratten	5 Wochen Fettdiät (78% Fett, 21% Eiweiss, 1% Kohlenhydrate) oder normale Diät (11% Fett, 20% Eiweiss, 69% Kohlenhydrate)	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Mit Fettdiät 33% längeres Rennen (47.1 ± 3.6 vs. 35.5 ± 3.1 min) als mit Kohlenhydratdiät (signifikant)	48
48 männliche Ratten	5 Wochen Fettdiät (78.7% Fett) oder Kohlenhydratdiät (68.7% Kohlenhydrate)	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Ausmass der Muskelglykogen-Entleerung bei beiden Diätgruppen gleich	51
13 männliche Ratten	4-5 Wochen Fettdiät (78% Fett, 21% Protein, 1% Kohlenhydrate) oder Kohlenhydratdiät (11% Fett, 20% Eiweiss, 69% Kohlenhydrate)	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Mit Fettdiät deutlich längeres Rennen (144 ± 45 vs. 104 ± 49 min) als mit Kohlenhydratdiät (signifikant)	10
99 Ratten	4 Wochen Fettdiät (65% Fett, 20% Eiweiss, 15% Kohlenhydrate) oder Kohlenhydratdiät (10% Fett, 20% Eiweiss und 70% Kohlenhydrate). In jeder Diätgruppe eine Gruppe mit und eine Gruppe ohne Training	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Mit Fettdiät und Training Verbesserung der Ausdauerleistung von 50 ± 3 auf 153 ± 8 min (+ 206%) (signifikant)	21
80 männliche Ratten	12 Wochen Fettdiät oder Kohlenhydratdiät. Je eine Gruppe mit und eine Gruppe ohne Training	Rennen auf dem Laufband bis zur Erschöpfung	Mit Fettdiät signifikant längeres Rennen (68 ± 5 vs. 42 ± 4 min) als mit Kohlenhydratdiät (signifikant)	70

Tabelle 1: Fatloading in Tierstudien

Anzahl Probanden	Art der Diät/Training	Art des Belastungsprotokolls	Ergebnis	Quelle
8 Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 64.4 ± 1.8 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹	5 Tage Kohlenhydratdiät (9.6 g Kohlenhydrate/kg/Tag resp. 0.7 g Fett/kg/Tag) oder Fettdiät (2.4 g Kohlenhydrate/kg/Tag resp. 4 g Fett pro kg KG pro Tag). Am 6. Tag Kohlenhydrate.	2 Stunden Radfahren bei 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ und anschliessendes Zeitfahren mit 7 kJ/ kg KG	Mit Fettdiät Abnahme des Muskelglykogens im Vergleich zu Kohlenhydratdiät (554 ± 45 vs. 608 ± 51 mmol Glykogen/kg Muskel-trockengewicht). Zeitfahren nach Fettdiät 8% schneller als mit Kohlenhydratdiät (30.73 ± 1.12 vs. 34.17 ± 2.62 min) (nicht signifikant)	4
7 Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 5.06 ± 0.26 l/min	1 Tag Kohlenhydratdiät und dann 6 Tage Kohlenhydratdiät (11 g Kohlenhydrate/kg/Tag, 1 g Fett/kg/Tag) oder Fettdiät (2.6 g Kohlenhydrate/kg/Tag, 4.6 g Fett/kg/Tag). Am Tag 8 Kohlenhydratdiät. Am Tag 9 Belastungstest.	Nach Kohlenhydratmahlzeit 4 Stunden Radfahren bei 65% $\dot{V}O_2\text{max}$, anschliessend Einzelzeitfahren während 1 Stunde	Leistung beim Zeitfahren nach Fettdiät 11% (signifikant) besser gegenüber Kohlenhydratdiät (312 ± 15 vs. 279 ± 20 W). Nach Fettdiät im Einzelzeitfahren 44.25 ± 0.9 km, nach Kohlenhydratdiät 42.1 ± 1.2 km	8
5 trainierte Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 4.2 ± 0.3 l · min ⁻¹	14 Tage Fettdiät (67.3 ± 1.8% Fett, 7.1 ± 2.2% Kohlenhydrate, 25.5 ± 2.5% Eiweiss) oder Kohlenhydratdiät (73.6 ± 5.0% Kohlenhydrate, 12.0 ± 6.7% Fett, 13.5 ± 1.6% Eiweiss).	Wingate-Test (30 sec), dann Radfahren bei 90% $\dot{V}O_2\text{max}$ bis zur Erschöpfung, dann Ausdauerbelastung bei 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ bis zur Erschöpfung	Nach der Fettdiät konnten die Probanden die Belastung bei 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ signifikant länger durchhalten als nach der Kohlenhydratdiät (79.7 ± 7.6 vs. 42.5 ± 6.8 min)	41
5 trainierte Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 4.9 ± 0.2 l · min ⁻¹	10 Tage Fettdiät (> 65% Fett, < 20% Kohlenhydrate, 20% Eiweiss) oder Kohlenhydratdiät (> 65% Kohlenhydrate, < 15% Fett, 20% Eiweiss)	150 min Radfahren auf Ergometer bei 70% $\dot{V}O_2\text{max}$, anschliessend Zeitfahren über 20 min auf Ergometer	Nach der Fettdiät wurde das Zeitfahren signifikant schneller gefahren als nach der Kohlenhydratdiät (29.35 ± 1.25 vs. 30.68 ± 1.55 min)	42
7 Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 72 ± 7 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹	2 Wochen Fettdiät (66 ± 10% Fett, 20 ± 3% Eiweiss, 15 ± 4% Kohlenhydrate) oder Kohlenhydratdiät (70 ± 9% Kohlenhydrate, 16 ± 5% Fett, 14 ± 2% Eiweiss)	15 min Test zum Aufwärmen, 45 min Radfahren bei 50% Maximalleistung, Stufentest, dann 100 km Zeitfahren	100 km Zeitfahren nach Fettdiät (nicht signifikant) schneller und (nicht signifikant) höhere Leistung	67
7 trainierte männliche Läufer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 60 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹	1 Monat fettarme Diät (18% Fett, 15% Eiweiss, 67% Kohlenhydrate) oder fettreiche Diät (41% Fett, 15% Eiweiss, 44% Kohlenhydrate)	Ausdauerbelastung auf dem Laufband bei 80% $\dot{V}O_2\text{max}$	Ausdauerstest bei fettreicher Diät 21% (signifikant) länger als bei fettarmer Diät (53 ± 4.5 vs. 44 ± 4.2 min)	29
12 männliche und 13 weibliche Läufer. $\dot{V}O_2\text{max}$ Läuferinnen Fettgruppe 50.2 ± 2.0 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹ , Läufer Fettgruppe $\dot{V}O_2\text{max}$ 59.4 ± 3.1 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹	4 Wochen, entweder 16% Fett oder 31% Fett. 6 männliche und 6 weibliche Läufer erhöhten ihren Fettanteil auf 44%.	Wingate Test, $\dot{V}O_2\text{max}$ -Test am gleichen Tag, Lauf bei 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ an einem separaten Tag	Läuferinnen mit der Fettdiät liefen 46.6 ± 13.4 min nach der Diätphase (vorher 39.2 ± 11.2 min, + 20%, nicht signifikant), Läufer mit der Fettdiät liefen 54.9 ± 12.8 min (vorher 44.3 ± 9.5 min, + 8%, nicht signifikant)	27
6 trainierte Läufer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 63.7 ± 2.6 ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹	7 Tage Fettdiät (38% Fett, 50% Kohlenhydrate, 12% Eiweiss) oder Kohlenhydratdiät (73% Kohlenhydrate, 15% Fett, 12% Eiweiss)	Zuerst Maximaltest auf dem Laufband bis zur Erschöpfung. Dann 30 min Laufen bei 85% $\dot{V}O_2\text{max}$, gleich anschliessend Laufen bei 75% bis 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ bis zur Erschöpfung.	Nach der Fettdiät liefen die Läufer 32% (signifikant) länger als nach der Kohlenhydratdiät (91.2 ± 9.5 vs. 75.8 ± 7.6 min)	49

Tabelle 2: Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit bei Trainierten nach Fatloading

Anzahl Probanden	Art der Diät/Training	Art des Belastungsprotokolls	Ergebnis	Quelle
11 trainierte Duathleten	5 Wochen entweder Fettdiät (52.9% Fett, 31.4% Kohlenhydrate, 14.4% Eiweiss) oder Kohlenhydratdiät (16.5% Fett, 68.2% Kohlenhydrate, 14.3% Eiweiss)	$\dot{V}O_2\text{max}$ -Test auf dem Velo, 2 Tage später Ausdauerstest mit je 10 min bei 20%, 40%, 60% und 75% $\dot{V}O_2\text{max}$, wobei die letzte Stufe während 20 min als Zeitfahren absolviert wurde. Zusätzlich noch später ein Halbmarathon.	Im Zeitfahren kein Unterschied zwischen den Diätformen. In der Zeit für den Halbmarathon kein Unterschied zwischen den Diätformen.	76
6 ausdauertrainierte männliche Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ $67 \pm 3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	3 Tage Fettdiät (65% Fett, 9% Kohlenhydrate) oder Kohlenhydratdiät (82% Kohlenhydrate)	Ausdauerbelastung auf dem Radergometer bei 70% $\dot{V}O_2\text{max}$	Die Radzeit verbesserte sich von 89.2 min (78.0–129.5 min) nach der Fettdiät auf 158.2 min (116.9–165.6 min) nach der Kohlenhydratdiät	63
12 trainierte Radfahrer, $\dot{V}O_2\text{max}$ $57.6 \pm 1.9 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	6 Tage Fettdiät (12% Kohlenhydrate, 66% Fett, 22% Eiweiss) oder Kohlenhydratdiät (75% Kohlenhydrate, 13% Fett, 12% Eiweiss)	45 min Radfahren bei $82 \pm 2\%$ $\dot{V}O_2\text{max}$	Kein Effekt der Fettdiät auf das 45-min-Radfahren	34

Tabelle 3: Keine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit bei Trainierten nach Fatloading

Anzahl Probanden	Art der Diät/Training	Art des Belastungsprotokolls	Ergebnis	Quelle
20 untrainierte Männer, $\dot{V}O_2\text{max}$ in Kohlenhydratgruppe $46.2 \pm 3.8 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, $\dot{V}O_2\text{max}$ in Fettgruppe $44.2 \pm 2.0 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	6 Wochen Fettdiät (61% Fett) oder Kohlenhydratdiät (25% Fett). Vor und nach Diätphase (mit konstantem Training) gleiches Testprotokoll.	$\dot{V}O_2\text{max}$ -Test, zwei 30-sec-Wingate-Tests und ein 45-min-Zeitfahren	Signifikante Abnahme von $\dot{V}O_2\text{max}$ in der Fettgruppe nach 6 Wochen, signifikante Abnahme im ersten Wingate-Sprint in der Fettgruppe nach 6 Wochen und signifikante Abnahme im 45-min-Zeitfahren in der Fettgruppe	14
20 untrainierte Männer, $\dot{V}O_2\text{max}$ 3.7 l/min	8 Wochen Training und Kohlenhydratdiät (65% Kohlenhydrate, 15% Eiweiss, 20% Fett), resp. Fettdiät (21% Kohlenhydrate, 17% Eiweiss, 62% Fett)	Vor Diätphase, nach 7 und nach 8 Wochen Training mit Diät Ausdauerbelastung auf Fahrradergometer bei 81% $\dot{V}O_2\text{max}$	Nach 7 Wochen Training und mit Kohlenhydratdiät Verbesserung im Belastungstest um 191 % (von 35.2 ± 4.5 auf 102.4 ± 5.0 min) und mit Fettdiät um 68 % (von 35.7 ± 3.8 auf 65.2 ± 7.2 min)	23
15 untrainierte Männer, $\dot{V}O_2\text{max}$ in Fettgruppe (N=8) $3.7 \pm 0.16 \text{ l/min}$, $\dot{V}O_2\text{max}$ in Kohlenhydratgruppe (N=7) $3.81 \pm 0.43 \text{ l/min}$	4 Wochen Training und Fettdiät (21% Kohlenhydrate, 17% Eiweiss, 62% Fett) bzw. Kohlenhydratdiät (65% Kohlenhydrate, 15% Eiweiss, 20% Fett)	Ausdauerbelastung auf Fahrradergometer bei 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ bis zur Erschöpfung	Nach 4 Wochen Training und Diät Verbesserung in der Fettgruppe um 166% (von 29.5 ± 4.3 auf 78.5 ± 8.2 min) und in der Kohlenhydratgruppe um 150% (von 31.7 ± 4.3 auf 79.3 ± 15.1 min)	25
8 untrainierte Männer, $\dot{V}O_2\text{max}$ $45.2 \pm 2.3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	10 Tage Kohlenhydratdiät (70.7% Kohlenhydrate, 13.7% Fett, 14.7% Eiweiss) oder 10 Tage Fett-Diät (28.3% Kohlenhydrate, 57.5% Fett, 14.3% Eiweiss). Zuerst 10 Tage Diät ohne Training, dann 10 Tage umgekehrte Diät mit Training	Zeitfahren auf dem Fahrradergometer bei 65% $\dot{V}O_2\text{max}$	Kohlenhydrat-Diät und Training erhöht $\dot{V}O_2\text{max}$ und Laktatschwelle signifikant. Fettdiät erhöht $\dot{V}O_2\text{max}$ nicht, hingegen Laktatschwelle. Zeitfahren in beiden Gruppen um 11% schneller	30
14 untrainierte Männer	4 Wochen Fettdiät (55.1% Fett, 35.6% Kohlenhydrate, 12.2% Eiweiss) oder 4 Wochen Kohlenhydratdiät (74.2% Kohlenhydrate, 15.3% Fett, 13.6% Eiweiss)	Nach Diätphase Ausdauerbelastung bei $71.0 \pm 4.8\%$ $\dot{V}O_2\text{max}$	Kein Unterschied zwischen den Diäten	64

Tabelle 4: Fatloading in Humanstudien, Untrainierte Versuchspersonen mit Fahrrad- und Laufbandbelastung

Höhe der Belastungsintensität. In den Studien, in denen nach einer Fettdiät eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit gezeigt werden konnte, lag die Intensität im Belastungsprotokoll eher tief (Tab. 2).

Die Bedeutung von Dauer, Intensität und Art der Belastung

Belastungsdauer und -intensität. Mit zunehmender Dauer einer Belastung sinkt der RQ als Zeichen der erhöhten Fettoxidation [9]. Sicherlich sind ein Marathon, ein Zeitfahren über 4 bis 6 Stunden oder 100 km im Labor allgemein betrachtet eine Ausdauerbelastung [52]. Aber diese relativ kurze Belastungsdauer im Vergleich zu längeren Langzeitbelastungen wie ein 100-km-Lauf, ein Ironman-Triathlon oder ein Radmarathon dürfte aufgrund der relativ hohen Intensität mehrheitlich über den Abbau von Muskelglykogen

und intramuskulärem Glykogen bestritten werden, während die IMCL-Oxidation nur reduziert zum Zug kommen dürfte [11].

Eine so genannte Ultraausdauerbelastung sollte über 4 Stunden und länger dauern [3] und wird in der Regel in Form von Laufen, Langlaufen, Radfahren oder Schwimmen absolviert [58]. Dabei ist die Intensität der Belastung von entscheidender Bedeutung. Eine Ausdauerbelastung über 80 km Laufen wird bei einer Intensität von 58% mit einem Zeitaufwand von 7 Stunden erfolgreich absolviert, während eine Intensität von 74% nicht zum Ziel führt und mit dem Abbruch des Rennens endet [50]. Bei einem Ultratriathlon mit einer Dauerbelastung über rund 40 Stunden liegt die Belastungsintensität bei rund 55% $\dot{V}O_2\text{max}$ [37], bei einem Radrennen über 24 Stunden bei rund 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ [38] und einem Ultraradrennen über 460 km bei 47% $\dot{V}O_2\text{max}$ [53]. Diese über mehrere Stunden anhaltenden Belastungen dürften mehrheitlich über den Abbau von IMCL sowie FFS aus dem Subkutanfett bestritten werden [11], denn der Verbrauch an Kohlenhydraten liegt bei etwa 1 g/min und

kann problemlos über die fortlaufende Nahrungszufuhr gedeckt werden [37].

Der Unterschied zwischen Laufen und Radfahren. Ein weiterer Aspekt, der für die Fettdiät spricht, ist die Belastungsform. In Studien sowohl mit Radfahrern [8, 41, 42] als auch mit Läufern [29, 49] konnte eine signifikante Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit gefunden werden (Tab. 2). Die Belastungsart Laufen unterscheidet sich von der Belastungsart Radfahren in Bezug auf den Energiestoffwechsel. Bezüglich der Effizienz, definiert als das Verhältnis zwischen Zunahme der mechanischen Arbeit und der Zunahme der benötigten Energie, um die Arbeit zu liefern, ist das Laufen rund 20% effizienter als das Radfahren [2]. Dies resultiert auch in einer unterschiedlichen Substratwahl unter Belastung. Beim Laufen wird bei der gleichen relativen Intensität deutlich mehr Fett verbrannt als beim Radfahren [1, 36]. Allerdings werden beim Radfahren bei der gleichen relativen Intensität höhere Laktatwerte produziert als beim Laufen [36]. Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz sind während des Laufens auch höher als während des Radfahrens [1]. Aus praktischer Sicht kann ein Fatloading vor einem Mehrfachtriathlon dazu führen, dass die IMCL während des Radfahrens weniger stark abgebaut werden und für die folgende Laufstrecke noch vorrätig sein können [37].

Schlussfolgerungen

In einigen Studien konnte gezeigt werden, dass eine mehrtägige bis mehrwöchige Fettdiät die Ausdauerleistungsfähigkeit bei Belastungen mittlerer Intensität signifikant verbessert, vorausgesetzt, es wird während der Fettdiätphase adäquat trainiert. Die in mehreren Übersichtsartikeln geäußerte Meinung, eine Fettdiät verbessere die Ausdauerleistung nicht, beruht mehrheitlich auf Studien mit zu hohen Belastungsintensitäten oder mit zu tiefen Fettanteilen in der Diät. Von einer konsequenten Fettdiät profitiert derjenige Athlet, der eine mehrstündige bis mehrtägige Ausdauerbelastung (> 6 Stunden) in Angriff nimmt und dessen geplante Belastungsintensität in Bereich von 50% bis 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ liegt.

Korrespondenzadresse:

Dr. med. Beat Knechtle, Facharzt FMH für Allgemeinmedizin, Gesundheitszentrum St. Gallen, Vadianstrasse 26, CH-9001 St. Gallen, Telefon +41 (0) 71 226 82 82, Telefax +41 (0) 71 226 82 72 E-Mail: beat.knechtle@ecr.ch

Literaturverzeichnis

- Achten J., Venables M.C., Jeukendrup A.E.: Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities. *Metabolism* 52: 747–752, 2003.
- Bijker K., de Groot G., Hollander A.: Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 87: 556–561, 2002.
- Bosch A.N., Weltan S.M., Dennis S.C., Noakes T.D.: Fuel substrate kinetics of carbohydrate loading differs from that of carbohydrate ingestion during prolonged exercise. *Metabolism* 45: 415–423, 1996.
- Burke L.M., Angus D.J., Cox G.R., Cummings N.K., Febbraio M.A., Gawthorn K., Hawley J.A., Minehan M., Martin D.T., Hargreaves M.: Effect of fat adaptation and carbohydrate restoration on metabolism and performance during prolonged cycling. *J. Appl. Physiol.* 89: 2413–2421, 2000.
- Burke L.M., Hawley J.A.: Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1492–1498, 2002.
- Burke L.M., Hawley J.A., Angus D.J., Cox G.R., Clark S.A., Cummings N.K., Desbrow B., Hargreaves M.: Adaptations to short-term high-fat diet persist during exercise despite high carbohydrate availability. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 83–91, 2002.
- Cameron-Smith D., Burke L.M., Angus D.J., Tunstall R.J., Cox G.R., Bonen A., Hawley J.A., Hargreaves M.: A short-term, high-fat diet up-regulates lipid metabolism and gene expression in human skeletal muscle. *Am. J. Clin. Nutr.* 77: 313–318, 2003.
- Carey A.L., Staudacher H.M., Cummings N.K., Stepto N.K., Nikolopoulos V., Bourke L.M., Hawley J.A.: Effects of fat adaptation and carbohydrate restoration on prolonged endurance exercise. *J. Appl. Physiol.* 91: 115–122, 2001.
- Christensen E.H., Hansen O.: Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Scand. Arch. Physiol.* 81: 160–171, 1939.
- Conlee R.K., Hammer R.L., Winder W.W., Bracken M.L., Nelson A.G., Barnett D.W.: Glycogen repletion and exercise endurance in rats adapted to a high fat diet. *Metabolism* 39: 289–294, 1990.
- Coyle E.F.: Substrate utilization during exercise in active people. *Am. J. Clin. Nutr.* 61: 968–979, 1995.
- Coyle E.F., Coggan A.R., Hemmert M.K., Ivy J.L.: Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J. Appl. Physiol.* 61: 165–172, 1986.
- Coyle E.F., Jeukendrup A.E., Oseto M.C., Hodgkinson B.J., Zderic T.W.: Low-fat diet alters intra-muscular substrates and reduces lipolysis and fat oxidation during exercise. *Am. J. Physiol.* 280: E391–E398, 2001.
- Fleming J., Sharman M.J., Avery N.G., Love D.M., Gomez A.L., Scheett T.P., Kraemer W.K., Volek S.: Endurance capacity and high-intensity exercise performance responses to a high-fat diet. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 13: 466–478, 2003.
- Goedecke J.H., Christie C., Wilson G., Dennis S.C., Noakes T.D., Hopkins W.G., Lambert E.V.: Metabolic adaptations to a high-fat diet in endurance cyclists. *Metabolism* 48: 1509–1517, 1999.
- Griffiths A.J., Humphreys S.M., Clarks M.L., Fielding B.A., Frayn K.N.: Immediate metabolic availability of dietary fat in combination with carbohydrate. *Am. J. Clin. Nutr.* 59: 53–59, 1994.
- Hargreaves M., Hawley J.A., Jeukendrup A.: Pre-exercise carbohydrate and fat ingestion: effects on metabolism and performance. *J. Sports Sci.* 22: 31–38, 2004.
- Havel R.J., Naimark A., Borchgrevink C.F.: Turnover rate and oxidation of free fatty acids of blood plasma in man during exercise. *Studies during continuous infusion of palmitate-I-C14.* *J. Clin. Invest.* 42: 1054–1063, 1963.
- Hawley J.A., Brouns F., Jeukendrup A.: Strategies to enhance fat utilization during exercise. *Sports Med.* 25: 241–257, 1998.
- Helge J.W.: Long-term fat diet adaptation effects on performance, training capacity, and fat utilization. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1499–1504, 2002.
- Helge J.W., Ayre K., Chaunчайyakul S., Hulbert A.J., Kiens B., Storlien L.H.: Endurance in high-fat-fed rats: effects of carbohydrate content and fatty acid profile. *J. Appl. Physiol.* 85: 1342–1348, 1998.
- Helge J.W., Lundby C., Christensen D.L., Langfort J., Messonnier L., Zacho M., Andersen J.L., Saltin B.: Skiing across the Greenland icecap: divergent effects on limb muscle adaptations and substrate oxidation. *J. Exp. Biol.* 206: 1075–1083, 2003.
- Helge J.W., Richter E.A., Kiens B.: Interaction of training and diet on metabolism and endurance during exercise in man. *J. Physiol. (Lond.)* 492: 293–306, 1996.
- Helge J.W., Watt P.W., Richter E.A., Rennie M.J., Kiens B.: Partial restoration of dietary fat induced metabolic adaptations to training by 7 days of carbohydrate diet. *J. Appl. Physiol.* 93: 1797–1805, 2002.
- Helge J.W., Wulff B., Kiens B.: Impact of a fat-rich diet on endurance in man: role of the dietary period. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 456–461, 1998.
- Hickson R.C., Rennie M.J., Conlee R.K., Winder W.W., Holloszy J.O.: Effects of increased plasma fatty acids on glycogen utilization and endurance. *J. Appl. Physiol.* 43: 829–833, 1977.
- Horvath P.J., Eagen C.K., Fisher N.M., Leddy J.J., Pendergast D.R.: The effects of varying dietary fat on performance and metabolism in trained male and female runners. *J. Am. Coll. Nutr.* 19: 52–60, 2000.
- Horvath P.J., Eagen C.K., Ryer-Calvin S.D., Pendergast D.R.: The effects of varying dietary fat on the nutrient intake in male and female runners. *J. Am. Coll. Nutr.* 19: 42–51, 2000.
- Hoppeler H., Billeter R., Horvath P.J., Leddy J.J., Pendergast D.R.: Muscle structure with low and high fat diets in well-trained male runners. *Int. J. Sports Med.* 20: 1–5, 1999.
- Jacobs K.A., Paul D.R., Geor R.J., Hinchcliff K.W., Sherman W.M.: Dietary composition influences short-term endurance training-induced adaptations of substrate partitioning during exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 14: 38–61, 2004.
- Jansson E., Kaijser L.: Effect of diet on the utilization of blood-borne and intramuscular substrates during exercise in man. *Acta Physiol. Scand.* 115: 19–30, 1982.
- Jansson E., Kaijser L.: Effect of diet on muscle glycogen and blood glucose utilization during a short-term exercise in man. *Acta Physiol. Scand.* 115: 341–347, 1982.

- 33 *Jeukendrup A.E., Saris W.H.M., Wagenmakers A.J.M.*: Fat metabolism during exercise: a review. Part III: Effects of nutritional interventions. *Int. J. Sports Med.* 19: 1–9, 1998.
- 34 *Kavouras S.A., Troup J.P., Berning J.R.*: The influence of low versus high carbohydrate diet on a 45-min strenuous cycling exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 14: 62–72, 2004.
- 35 *Kiess B.*: Diet and training in the week before competition. *Can. J. Appl. Physiol.* 26: 56–63, 2001.
- 36 *Knechtle B., Müller G., Willmann F., Kotteck K., Eser P., Knecht H.*: Fat oxidation in men and women endurance athletes in running and cycling. *Int. J. Sports Med.* 25: 38–44, 2004.
- 37 *Knechtle B., Zapf J., Zwysig D., Lippuner K., Hoppeler H.*: Energieumsatz und Muskelstruktur bei Langzeitbelastung: eine Fallstudie. *Schweiz. Zschr. Sportmed. Sporttraum.* 51: 180–187, 2003.
- 38 *Knechtle B., Knechtle P., Müller G., Zwysig D.*: Energieumsatz an einem 24-Stunden-Radrennen: Verhalten von Körpergewicht und Subkutanfett. *Östr. J. Sportmed.* 33: 11–18, 2003.
- 39 *Krogh A., Lindhard J.*: Relative value of fat and carbohydrate as a source of muscular energy. *Biochem. J.* 14: 290–298, 1920.
- 40 *Lambert E.V., Goedecke J.H.*: The role of dietary macronutrients in optimizing endurance performance. *Curr. Sports Med. Rep.* 2: 194–201, 2003.
- 41 *Lambert E.V., Speechly D.P., Dennis S.D., Noakes T.D.*: Enhanced endurance in trained cyclists during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high fat diet. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 287–293, 1994.
- 42 *Lambert E.V., Goedecke J.H., van Zyl C., Murphy K., Hawley J.A., Dennis S.C., Noakes T.D.*: High-fat diet versus habitual diet prior to carbohydrate loading: effects on exercise metabolism and cycling performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 11: 209–225, 2001.
- 43 *Lambert E.V., Hawley J.A., Goedecke J., Noakes T.D., Dennis S.C.*: Nutritional strategies for promoting fat and delaying the onset of fatigue during prolonged exercise. *J. Sports Sci.* 15: 315–324, 1997.
- 44 *Landry N., Bergeron N., Archer R., Samson P., Corneau L., Bergeron J., Dériaz O.*: Whole-body fat oxidation rate and plasma triacylglycerol concentrations in men consuming an ad libitum high-carbohydrate or low-carbohydrate diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 77: 580–586, 2003.
- 45 *Lapachet R.A.B., Miller W.C., Arnall D.A.*: Body fat and exercise endurance in trained rats adapted to a high-fat and/or high-carbohydrate diet. *J. Appl. Physiol.* 80: 1173–1179, 1996.
- 46 *Leutert C., Hoppeler H.*: Effekte einer Fettdiät auf den Muskelstoffwechsel unter submaximaler Belastung bei nicht ausdauertrainierten Personen. *Schweiz. Zschr. Sportmed. Sporttraum.* 49: 105–110, 2001.
- 47 *Lukaski H.C., Bolonchuk W.W., Klevay L.M., Milne D.B., Sandstead H.H.*: Interaction among dietary fat, mineral status, and performance of endurance athletes: a case study. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 11: 186–198, 2001.
- 48 *Miller W.C., Bryce G.R., Conlee R.K.*: Adaptations to a high-fat diet that increase exercise endurance in male rats. *J. Appl. Physiol.* 56: 78–83, 1984.
- 49 *Muoio D.M., Leddy J.J., Horvath P.J., Awad A.B., Pendergast D.R.*: Effect of dietary fat on metabolic adjustments to maximal and endurance in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 81–88, 1994.
- 50 *Myles W.S.*: The energy cost of an 80 km run. *Br. J. Sports Med.* 13: 12–14, 1979.
- 51 *Nakamura M., Brown J., Miller W.C.*: Glycogen depletion patterns in trained rats adapted to a high-fat or high-carbohydrate diet. *Int. J. Sports Med.* 19: 419–424, 1998.
- 52 *Neumann G., Pfützner A., Hottenrott K.*: Das grosse Buch vom Triathlon. Meyer & Meyer Verlag, Aachen, 2004.
- 53 *Neumayr G., Pfister R., Mitterbauer G., Gaenzler H., Sturm W., Hoertnagl H.*: Heart rate response to ultraendurance cycling. *Br. J. Sports Med.* 37: 89–90, 2003.
- 54 *Okano G., Sato Y., Murata Y.*: Effect of elevated blood FFS levels on endurance performance after a single fat meal ingestion. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 763–768, 1998.
- 55 *Okano G., Sato Y., Takumi Y., Sugawara M.*: Effect of 4 h preexercise high carbohydrate and high fat meal ingestion on endurance performance and metabolism. *Int. J. Sports Med.* 17: 530–534, 1996.
- 56 *Paul D., Jacobs K.A., Geor R.J., Hinchcliff K.W.*: No effect of pre-exercise meal on substrate metabolism and time trial performance during intense endurance exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 13: 489–503, 2003.
- 57 *Pendergast D.R., Leddy J.J., Venkatraman J.T.*: A perspective on fat intake in athletes. *J. Am. Coll. Nutr.* 19: 345–350, 2000.
- 58 *Peters E.M.*: Nutritional aspects in ultra-endurance exercise. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 6: 427–434, 2003.
- 59 *Phinney S.D., Bistrian B.R., Evans W.J., Gervino E., Blackburn G.L.*: The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: preservation of submaximal exercise capability with reduced carbohydrate oxidation. *Metabolism* 32: 769–776, 1983.
- 60 *Pirnay F., Lacroix M., Mosora F., Luyckx A., Lefebvre P.*: Effect of glucose ingestion on energy substrate utilization during prolonged muscular exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 36: 247–254, 1977.
- 61 *Pirnay F., Scheen A.J., Gautier J.F., Lacroix M., Mosora F., Lefebvre P.*: Exogenous glucose oxidation during exercise in relation to the power output. *Int. J. Sports Med.* 16: 456–460, 1995.
- 62 *Pitsiladis Y.P., Maughan R.J.*: The effects of exercise and diet manipulation on the capacity to perform prolonged exercise in the heat and in the cold in trained humans. *J. Physiol. (Lond.)* 517: 919–930, 1999.
- 63 *Pitsiladis Y.P., Smith I., Maughan R.J.*: Increased fat availability enhances the capacity of trained individuals to perform prolonged exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31: 1570–1579, 1999.
- 64 *Pogliaghi S., Veicsteinas A.*: Influence of low and high dietary fat on physical performance in untrained males. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31: 149–155, 1999.
- 65 *Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Gastaldelli A., Horowitz J.F., Enderby E., Wolfe R.R.*: Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* 265: E380–E391, 1993.
- 66 *Rowlands D.S., Hopkins W.G.*: Effect of high-fat, high-carbohydrate, and high-protein meals on metabolism and performance during endurance cycling. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 12: 318–335, 2002.
- 67 *Rowlands D.S., Hopkins W.G.*: Effects of high-fat and high-carbohydrate diets on metabolism and performance in cycling. *Metabolism* 51: 678–690, 2002.
- 68 *Roy H.J., Levejoy J.C., Keenan M.J., Bray G.A., Windhauser M.M., Wilson J.K.*: Substrate oxidation and energy expenditure in athletes and nonathletes consuming isoenergetic high- and low-fat diets. *Am. J. Clin. Nutr.* 67: 405–411, 1998.
- 69 *Schrauwen P., Wagenmakers A.J.M., van Marken Lichtenbelt W.D., Saris W.H.M., Westerterp K.R.*: Increase in fat oxidation on a high-fat diet is accompanied by an increase in triglyceride-derived fatty acid oxidation. *Diabetes* 49: 640–646, 2000.
- 70 *Simi B., Sempore B., Mayet M.-H., Favier R.J.*: Additive effects of training and high-fat diet on energy metabolism during exercise. *J. Appl. Physiol.* 71: 197–203, 1991.
- 71 *Smith S.R., de Jonge L., Zachwieja J.J., Roy H., Nguyen T., Rood J., Windhauser M., Volaufova J., Bray G.A.*: Concurrent physical activity increases fat oxidation during the shift to a high-fat diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 72: 131–138, 2000.
- 72 *Smith S.R., de Jonge L., Zachwieja J.J., Roy H., Nguyen T., Rood J., Windhauser M., Volaufova J., Bray G.A.*: Fat and carbohydrate balances during adaptation to a high-fat diet. *Am. J. Clin. Nutr.* 71: 450–457, 2000.
- 73 *Starling R.D., Trappe T.A., Parcell A.C., Kerr C.G., Fink W.J., Costill D.L.*: Effects of diet on muscle triglyceride and endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 82: 1185–1189, 1997.
- 74 *Staudacher H.M., Carey A.L., Cummings N.K., Hawley J.A., Burke L.M.*: Short-term high-fat diet alters substrate utilization during exercise but not glucose tolerance in highly trained athletes. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 11: 273–286, 2001.
- 75 *Stepto N.K., Carey A.L., Staudacher H.M., Cummings N.K., Burke L.M., Hawley J.A.*: Effect of short-term fat adaptation on high-intensity training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 449–455, 2002.
- 76 *Vogt M., Puntschart A., Howald H., Müller B., Mannhart C., Gfeller-Tüscher L., Mullis P., Hoppeler H.*: Effects of dietary fat on muscle substrates, metabolism, and performance in athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35: 952–960, 2003.
- 77 *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.*: Metabolic and performance responses during endurance exercise after high-fat and high-carbohydrate meals. *J. Appl. Physiol.* 85: 418–424, 1998.
- 78 *Young D.R., Pelligra R., Adachi R.R.*: Serum glucose and free fatty acids in man during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* 21: 1047–1052, 1966.
- 79 *Zderic T.W., Davidson C.J., Schenk S., Byerley L.O., Coyle E.F.*: High-fat diet elevates resting intramuscular triglyceride concentration and whole body lipolysis during exercise. *Am. J. Physiol.* 286: E217–E225, 2004.