

Die Bedeutung der Kohlenhydrate im Sport

PAOLO C. COLOMBANI, PETER E. BALLMER

Nahrungskohlenhydrate stellen die wesentlichste Energiequelle für Sportler dar, und es herrscht Einigkeit darüber, dass eine tägliche Menge zwischen 5 und 12 g (oder mehr, je nach Intensität) pro kg Körpergewicht notwendig ist für eine optimale Leistungsfähigkeit. Die Kohlenhydratzufuhr muss dabei nicht nur über 24 Stunden auf quantitativer Ebene ausreichend sein; von zentraler Bedeutung ist auch die Zufuhr während einer sportlichen Leistung, sofern diese länger als zwei Stunden dauert. Eine Leistungsverbesserung durch eine Zufuhr von Kohlenhydraten bei kürzerer Belastungsdauer ist zwar wahrscheinlich, aber die Datenlage diesbezüglich ist nicht hundertprozentig sicher. Weshalb sich hohe Kohlenhydratzufuhren bei den Sportlern im Gegensatz zu den körperlich kaum Aktiven nicht negativ auf die Gesundheit auswirken, ist nicht klar. Der Schluss liegt nahe, dass nicht Kohlenhydrate per se (wie kein anderer Nährstoff per se) etwas «Ungesundes» sind, sondern sie nur in der Kombination mit körperlicher Inaktivität ihr «ungesundes» Potenzial entfalten.

Die Sporternährung im Umfeld der modernen Ernährungswissenschaft

Diverse Entdeckungen im 18. und 19. Jahrhundert in Frankreich und Deutschland auf dem Gebiet der Energetik sowie Substratoxidation (Lavoisier, Regnault, Liebig, Voit, Pettenkofer, Rubner und andere) waren wegweisend für die Entwicklung der Sportphysiologie und der Sporternährung. Für Letztere ist die Kenntnis über die während einer muskulären Belastung verbrauchten Energiequellen von grösster Bedeutung. Mitte des 19. Jahrhunderts vertrat Justus von Liebig die Meinung, Protein sei als wesentlicher Bestandteil der Muskulatur auch der primäre Energielieferant für die Muskelkontraktion (1). Obwohl diese Meinung nicht experimentell abgeleitet, sondern die persönliche Überzeugung von Liebig war, wurde sie als Faktum akzeptiert. Entsprechend lag in einem frühen britischen Trainingsbuch von 1866 der Schwerpunkt des Essens beim Fleisch (2).

Erst als mehr und mehr Ergebnisse aus theoretischen wie auch experimentellen Befunden eindeutig Liebigs Meinung widersprachen, liess man trotz des (zu) gros-

sen Respekts vor Liebig von ihr ab. Massgebend dabei war die Untersuchung von Fick und Wislicenus (3) an der Universität Zürich. Aufgrund von Messungen der Harnstoffausscheidung während des Aufstiegs auf das Faulhorn in den Berner Alpen kamen sie 1866 zum eindeutigen Schluss, dass die für den Aufstieg benötigte Energiemenge viel grösser war als jene, die durch Oxidation der zur Harnstoffmenge äquivalenten Proteinmenge theoretisch hätte freigesetzt werden können. Somit mussten stickstofffreie Substanzen als wesentliche Energiequellen für die Muskeltätigkeit infrage kommen. Kohlenhydrate und Fette waren die Kandidaten.

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wurde deshalb vermehrt der Frage nachgegangen, ob Kohlenhydrate oder Fette die primären Energielieferanten für die Muskulatur sind. Die erste Tabelle zum respiratorischen Quotienten als Indikator für den Anteil an Kohlenhydraten beziehungsweise Fetten an der Energiebereitstellung wurde von Zuntz und Schumburg (4) 1901 veröffentlicht und durch Graham Lusk und Mitarbeiter (5) rund

zehn Jahre später zur einfacheren Verwendung um die prozentuale Darstellung des Anteils der Kohlenhydrate und Fette erweitert. Bis Ende der Dreissigerjahre stellte sich zudem aufgrund zahlreicher Untersuchungen von Benedict, Krogh, Christensen und anderen (6–11) heraus, dass die relativen Anteile von Kohlenhydraten und Fetten an der Energiebereitstellung im Wesentlichen von drei Faktoren abhängen: der Belastungsintensität, der -dauer und vom Ernährungsstatus des sich Belastenden (gefasset, postprandial). Generell steigt dabei der Anteil an Kohlenhydraten, je mehr Kohlenhydrate kurz- oder langfristig vor der Belastung gegessen wurden und je intensiver die Belastung ist. Der aktuelle Wissensstand bezüglich benutzter Energiequellen in Abhängigkeit von Belastungsdauer und -intensität wurde von Hawley und Hopkins (12) vor etwas mehr als zehn Jahren zusammengefasst und vor gut fünf Jahren von Gastin (13) überarbeitet. Die in vielen Lehrbüchern lange verwendete und teilweise immer noch benutzte grafische Zusammenstellung von Keul und Mitarbeitern aus dem Jahr

1969 (14) ist nicht mit dem aktuellen Wissensstand vereinbar und sollte verworfen werden. Aus der Grafik von 1969 wurde und wird immer noch fälschlicherweise abgeleitet, dass die unterschiedlichen Energiequellen nacheinander angezapft werden.

Kohlenhydrate in der Sporternährung

Die unterschiedliche Bedeutung der beiden Energiequellen Kohlenhydrate und Fette für die physische Leistungsfähigkeit rückte erst in den Sechzigerjahren wieder vermehrt ins Zentrum des Forschungsinteresses, nachdem die Technik der Nadelbiopsie von Jonas Bergström (15, 16) kurz zuvor für physiologische Studien adaptiert worden war. In der heute zu den Klassikern der Sporternährungsliteratur gehörenden «Nature»-Publikation aus dem Jahr 1966 wurde von Bergström und Hultman (17) aufgezeigt, dass die Entleerung der Muskelglykogenspeicher die Glykogenresynthese verbessert. Aus dieser Erkenntnis wurde anschliessend die als «Schwedendiät» bekannte Ernährungs- und Trainingsintervention abgeleitet, die auf eine Maximierung der Muskelglykogenspeicher abzielte (15, 18, 19); diese korrelieren stark mit der Leistungsfähigkeit (siehe unten). Korrekterweise sollte man aber die Entdeckung, dass Muskelglykogenspeicher durch diätetische Manipulationen rascher wieder aufgefüllt werden können, wenn diese zuvor entleert wurden, nicht den schwedischen Forschern zuordnen, da nicht ganz 20 Jahre vor ihnen bereits Forscher der damaligen Sowjetunion diese Beobachtung beschrieben hatten (20).

Die Schwedendiät (oder Saltindiät) wird heute immer noch als eine Variante des Carboloadings, das heisst der Strategie zur Maximierung der Glykogenspeicher, angewendet. Sie bedingt aber für den Athleten oder die Athletin einen starken Eingriff in das übliche Ess- und Trainingsverhalten kurz vor einem Wettkampf. Zumindest aus psychologischen Gründen ist dies alles andere als vorteilhaft.

Neben der im Prinzip überholten schwedischen Variante wird das von Sherman (21) Anfang der Achtzigerjahre vorge-

schlagene Tapering zum Carboloadings eingesetzt. Im Gegensatz zur Schwedendiät, in der auf eine einzige, sehr intensive Trainingsbelastung – zum Zweck der starken Reduktion der Muskelglykogenspeicher – drei Tage ohne Belastung bei gleichzeitiger kohlenhydratarmer Kost sowie drei Tage mit kohlenhydratreicher Kost ebenfalls ohne Belastung folgen, wird im Tapering die Belastung schrittweise über eine Woche hinweg reduziert. Dabei erwies sich eine gleichzeitige schwedendiätähnliche Ernährungsintervention – drei Tage kohlenhydratarmer Kost (15 Energie-%) danach drei Tage kohlenhydratreiche Kost (70 Energie-%) – hinsichtlich der Maximierung der Muskelglykogenspeicher als einer Intervention ebenbürtig mit drei Tagen gemässiger Kohlenhydratzufuhr (50 Energie-%, entsprechend einer üblichen Ernährungsweise), und danach drei Tage kohlenhydratreiche Kost (70 Energie-%) (21). Deshalb wurde – ursprünglich aufgrund dieser einzigen Studie – die Taperingintervention mit zu Beginn gemässiger Kohlenhydratzufuhr als valide Alternative zur Schwedendiät propagiert, da sie weniger stark in das übliche Verhalten des Athleten/der Athletin eingreift.

Anfang der 2000er-Jahre wurde eine weitere Alternative zur Maximierung der Muskelglykogenspeicher vorgeschlagen. Bis dahin war erstaunlicherweise nicht untersucht worden, ob zur Füllung der Glykogenspeicher drei Tage einer kohlenhydratreichen Kost zwingend notwendig sind, oder ob die Maximierung schon nach einer kürzeren Phase des Carboloadings erfolgt. Obwohl australische Forscher um Paul Fournier (22, 23) 2002 zeigen konnten, dass ein einziger Tag mit extrem kohlenhydratreicher Ernährungsweise (10 g/kg Körpergewicht) ausreichten, um die Speicher zu maximieren, hat sich diese Alternative zum Carboloadings bisher noch kaum durchgesetzt.

Einfluss des Muskelglykogengehaltes auf die Leistungsfähigkeit

Heute besteht in der Sportwissenschaft ein weitgehender Konsens bezüglich der Bedeutung des Muskelglykogens für die Leistungsfähigkeit, und zwar sowohl für

aerobe Ausdauerbelastungen als auch für Belastungen mit längerer anaerober Komponente wie in den Spilsportarten oder beim Krafttraining (24–30): Ein tiefer Muskelglykogengehalt geht generell mit einer reduzierten Leistungsfähigkeit einher. Selbst bei langen Belastungen wie im Ultraausdauerbereich (ab etwa 6 h Dauer), während deren die Lipide die quantitativ dominierende Energiequelle sind, stellen die Muskelglykogenspeicher einen leistungslimitierenden Faktor dar (31, 32).

Ein absolut zentrales Ziel bei praktisch allen Sportarten ist deshalb das Verhindern von ungenügend gefüllten Muskelglykogenspeichern. Dies wurde schon vor mindestens 35 Jahren als Tatsache propagiert (15). Die dafür in der Ernährung benötigte Kohlenhydratmenge hängt von der Sportart beziehungsweise von der Dauer und Intensität des entsprechenden Trainings ab (siehe unten).

Zufuhr von Kohlenhydraten während der sportlichen Leistung

Sportartspezifisch ausreichend gefüllte Glykogenspeicher stellen einen, aber nicht den einzigen wesentlichen leistungsbeeinflussenden Faktor dar. Ein weiterer Faktor ist – neben der Flüssigkeitszufuhr – die Energiezufuhr in Form von Kohlenhydraten während der Belastung. Ähnlich wie beim Muskelglykogen für die Leistungsfähigkeit herrscht hier ein genereller Konsens darüber, dass bei Belastungen von vielleicht schon etwas weniger als einer Stunde, aber sicherlich ab zwei Stunden Dauer eine bessere Leistung erzielt werden kann, wenn während der Belastung Kohlenhydrate aufgenommen werden (33). Obwohl die Diskussion um Menge und Art der während der Belastung zuzuführenden Kohlenhydrate schon seit geraumer Zeit abgeschlossen schien, mussten und müssen die Empfehlungen aufgrund neuerer Erkenntnisse überarbeitet werden.

Die Arbeiten der letzten Jahre aus Asker Jeukendrup's Umfeld (34) führten zum Verwerfen der früheren Annahme, die Oxidation exogen zugeführter Kohlenhydrate während der Belastung erziele bei etwa 1 g/min ihr Maximum. Jeuken-

drups Team (35–41) stellte in einer Reihe aufeinander aufbauender Versuche fest, dass bei Verwendung von Kohlenhydrattypen, die im Dünndarm unterschiedliche Transportwege benutzen (Glukose, Fruktose), Oxidationsraten exogener Kohlenhydrate von bis zu 1,7 g/min erzielt werden können. Auch wenn der experimentelle Beweis noch erbracht werden muss, dass die höhere Oxidationsrate auch zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit beziehungsweise zur Verzögerung der Ermüdung führt, scheint dies doch der einzige logische Schluss zu sein. Die bisher höchste gemessene Oxidationsrate bei exogener Kohlenhydratzufuhr betrug rund 2,4 g/min (35), was etwas mehr als 140 g/h entspricht, also gut der doppelten Menge der üblicherweise (noch) empfohlenen Zufuhr.

Eine weitere Arbeit von Jeukendrup (42) zeigte zudem, dass bei kürzerer Belastung von etwa einer Stunde Dauer auf dem Fahrrad das Spülen des Mundes mit einer kohlenhydrathaltigen Lösung – ohne dass diese dann geschluckt wurde – bereits eine messbare Leistungsverbesserung verursachte. Solange dieses Ergebnis nicht repliziert wird, bleibt es ein nicht erklärbares Phänomen, das offensichtlich weitreichende Konsequenzen mit sich bringen könnte. Zurzeit sind Untersuchungen im Gang, die mittels Gehirncomputertomografie den möglichen Ursachen dieser Ergebnisse nachgehen.

Regeneration von Glykogenspeichern

Im Leistungssport sind hohe Trainingsvolumina mit mehreren Stunden Belastung pro Tag keine Ausnahme. Das Verhindern einer schleichenden oder chronischen Übermüdung ist unter solchen Umständen von grosser Bedeutung, und ausreichende Energiereserven für das tägliche Training sind eine Voraussetzung dafür. Inwiefern entleerte intramuskuläre Lipidspeicher die Leistungsfähigkeit beeinflussen, ist noch nicht mit Sicherheit geklärt. Entleerte Glykogenspeicher der Muskulatur gehen hingegen eindeutig mit einer reduzierten Leistungsfähigkeit einher. Eine optimale Resyntheserate vorausgesetzt, ist eine vollständige Regene-

ration des Muskelglykogens innerhalb von 24 Stunden möglich. Diesbezüglich herrscht unter den Sportwissenschaftlern ebenfalls Konsens (43).

Die Glykogenresynthese in der Muskulatur hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Die wichtigsten sind die zugeführte Menge an Kohlenhydraten, der Zeitpunkt ihrer Zuführung, die Häufigkeit der Zuführung, der Entleerungsgrad der Speicher selbst sowie zum Teil der Typ der Kohlenhydrate (44). Die generell anerkannten Empfehlungen sind nachfolgend aufgelistet (43):

- Während der ersten vier Stunden unmittelbar nach Beendigung der Belastung eine häufige (d.h. ca. alle 30 min) Zufuhr von Kohlenhydraten in der Menge von 1,2 g/kg KG.
- Bei täglichem Training mit moderater Dauer oder tiefer Intensität eine Kohlenhydratzufuhr von 5 bis 7 g/kg KG.
- Bei täglichem Ausdauertraining mit moderater bis hoher Intensität eine Kohlenhydratzufuhr von 7 bis 12 g/kg KG.
- Bei täglichem extremem Training von 4 bis 6 oder mehr Stunden eine Kohlenhydratzufuhr von 10 bis 12 (oder mehr) g/kg KG.

Die obigen Empfehlungen sind bewusst nicht detaillierter verfasst, da die individuelle Situation des Athleten/der Athletin bei der Herleitung einer genaueren Menge berücksichtigt werden muss. Neben den Kohlenhydraten scheinen keine weiteren Substanzen die Glykogenresynthese positiv zu beeinflussen, doch gibt es hierzu nicht allzu viele Studien. Es kann zurzeit nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass eine Proteinzugabe zu einer etwas besseren Glykogenresynthese führt (45–49). Alkohol kann die Glykogenresynthese negativ beeinflussen, aber nur wenn aufgrund der Alkoholeinnahme die Kohlenhydratzufuhr reduziert wird (z.B. Trinken von alkoholhaltigen Getränken anstelle von Sportgetränken) (50).

Referenzwerte für die Kohlenhydratzufuhr im Sport

Im Gegensatz zu den Empfehlungen für die Kohlenhydratzufuhr bei physisch

kaum aktiven Menschen herrscht bei den Referenzwerten für Sportler weitestgehender Konsens unter den Sportwissenschaftlern. Die Referenzwerte entsprechen denjenigen für die Regeneration der Muskelglykogenresynthese, da dies aus energetischer Sicht der bedeutendste Aspekt der Sporternährung ist. Zusammengefasst sind somit Kohlenhydratmengen von mindestens 5 bis 12 g/kg KG oder gar mehr im Sport notwendig (43). Als Vergleich: Die DACH-Referenzwerte für Erwachsene mit wenig physischer Aktivität betragen umgerechnet zwischen 3,5 und 5,1 g/kg KG (51).

Empfehlungen

- Nahrungskohlenhydrate stellen die wesentlichste Energiequelle für Sportler dar.
- Eine tägliche Menge von 5 bis 12 g/kg KG (oder mehr bei sehr hoher Intensität) sind notwendig für eine optimale Leistungsfähigkeit.
- Von zentraler Bedeutung ist auch die Zufuhr während einer sportlichen Leistung, sofern diese länger als zwei Stunden dauert. Eine Leistungsverbesserung durch Zufuhr von Kohlenhydraten bei kürzerer Belastungsdauer ist nicht gesichert.

Referenzen:

1. von Liebig J. Über die Quelle der Muskelkraft. III. Die Quelle der Muskelkraft. *Annalen der Chemie und Pharmacie* 153(2), 157–228. 1870.
2. MacLaren A. *Training, in theory and practice*. London: MacMillan & Co, 1866.
3. Fick A, Wislicenus J. On the origin of muscular power. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 1866; Supplement to Vol. 31 4th Series: 485–503.
4. Zuntz N, Schumburg WAEF. *Studien zu einer Physiologie des Marsches*. Berlin: Hirschwald, 1901.
5. Williams HB, Riche JA, Lusk G. *Animal calorimetry*. Second paper. Metabolism of the dog following the ingestion of meat in large quantity. *J. Biol. Chem.* 1912; 12: 349–376.
6. Krogh A, Lindhard J. The relative value of fat and carbohydrate as sources of muscular energy. *Biochem. J.* 1920; 14: 290–363.
7. Christensen EH, Hansen O. Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Skandinavisches Archiv für Physiologie* 1939; 81: 160–171.
8. Christensen EH, Hansen O. Untersuchungen über die Verbrennungsvorgänge bei langandauernder, schwerer Muskelarbeit. *Skandinavisches Archiv für Physiologie* 1939; 81: 152–159.
9. Christensen EH, Hansen O. Hypoglykämie, Arbeitsfähigkeit und Ermüdung. *Skandinavisches Archiv für Physiologie* 1939; 81: 172–179.
10. Christensen EH, Hansen O. Respiratorischer Quo-

- tient und O₂-Aufnahme. *Skandinavisches Archiv für Physiologie* 1939; 81: 180–189.
11. Benedict FG, Milner RG. Experiments on the metabolism of matter and energy in the human body, 1903–1904. Bulletin 175 ed. Washington: USDA Office of Experiment Stations, 1907.
 12. Hawley JA, Hopkins WG. Aerobic glycolytic and aerobic lipolytic power systems. A new paradigm with implications for endurance and ultraendurance events. *Sports Med.* 1995; 19: 240–250.
 13. Gastin PB. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med.* 2001; 31: 725–741.
 14. Keul J, Doll E, Keppler D. Muskelstoffwechsel. Die Energiebereitstellung im Skelettmuskel als Grundlage seiner Funktion. München: J.A. Barth, 1969.
 15. Bergstrom J, Hultman E. Nutrition for maximal sports performance. *JAMA* 1972; 221: 999–1006.
 16. Lindholm B, Alvestrand A, Jonas Bergstrom MD, PhD (1929–2001): scientist in metabolism and nutrition in renal disease. *Nutrition* 2002; 18: 120–121.
 17. Bergstrom J, Hultman E. Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized to the muscle cells in man. *Nature* 1966; 210: 309–310.
 18. Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol.Scand.* 1967; 71: 140–150.
 19. Hultman E, Bergstrom J. Muscle glycogen synthesis in relation to diet studied in normal subjects. *Acta Med. Scand.* 1967; 182: 109–117.
 20. Yakovlev NN. Biochemistry of sport in the Soviet Union: beginning, development, and present status. *Med Sci Sports* 1975; 7: 237–247.
 21. Sherman WM, Costill DL, Fink WJ, Miller JM. Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance. *Int. J. Sports Med.* 1981; 2: 114–118.
 22. Bussau VA, Fairchild TJ, Rao A, Steele P, Fournier PA. Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002; 87: 290–295.
 23. Fairchild TJ, Fletcher S, Steele P, Goodman C, Dawson B, Fournier PA. Rapid carbohydrate loading after a short bout of near maximal-intensity exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2002; 34: 980–986.
 24. Jeukendrup AE, Jentjens RL, Moseley L. Nutritional considerations in triathlon. *Sports Med.* 2005; 35: 163–181.
 25. Burke LM, Hawley JA. Carbohydrate and exercise. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 1999; 2: 515–520.
 26. Lambert CP, Frank LL, Evans WJ. Macronutrient considerations for the sport of bodybuilding. *Sports Med.* 2004; 34: 317–327.
 27. Johnson NA, Stannard SR, Thompson MW. Muscle triglyceride and glycogen in endurance exercise: implications for performance. *Sports Med.* 2004; 34: 151–164.
 28. Hargreaves M, Hawley JA, Jeukendrup A. Pre-exercise carbohydrate and fat ingestion: effects on metabolism and performance. *J. Sports Sci.* 2004; 22: 31–38.
 29. Lambert EV, Goedecke JH. The role of dietary macronutrients in optimizing endurance performance. *Curr. Sports Med. Rep.* 2003; 2: 194–201.
 30. Hawley JA, Tipton KD, Millard-Stafford ML. Promoting training adaptations through nutritional interventions. *J. Sports Sci.* 2006; 24: 709–721.
 31. Peters EM. Nutritional aspects in ultra-endurance exercise. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 2003; 6: 427–434.
 32. Zaryski C, Smith DJ. Training principles and issues for ultra-endurance athletes. *Curr. Sports Med Rep.* 2005; 4: 165–170.
 33. Jeukendrup AE. Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition* 2004; 20: 669–677.
 34. Jeukendrup AE, Jentjens R. Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med.* 2000; 29: 407–424.
 35. Jentjens RL, Achten J, Jeukendrup AE. High oxidation rates from combined carbohydrates ingested during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004; 36: 1551–1558.
 36. Jentjens RLPG, Venables MC, Jeukendrup AE. Oxidation of exogenous glucose, sucrose, and maltose during prolonged cycling exercise. *J. Appl. Physiol.* 2004; 96: 1285–1291.
 37. Jentjens RLPG, Moseley L, Waring RH, Harding LK, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise. *J. Appl. Physiol.* 2004; 96: 1277–1284.
 38. Wallis GA, Rowlands DS, Shaw C, Jentjens RL, Jeukendrup AE. Oxidation of Combined Ingestion of Maltodextrins and Fructose during Exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2005; 37: 426–432.
 39. Jentjens RLPG, Shaw C, Birtles T, Waring RH, Harding LK, Jeukendrup AE. Oxidation of combined ingestion of glucose and sucrose during exercise. *Metabolism* 2005; 54: 610–618.
 40. Jentjens RL, Jeukendrup AE. High rates of exogenous carbohydrate oxidation from a mixture of glucose and fructose ingested during prolonged cycling exercise. *Br. J. Nutr.* 2005; 93: 485–492.
 41. Jentjens RLPG, Underwood K, Achten J, Currell K, Mann CH, Jeukendrup AE. Exogenous carbohydrate oxidation rates are elevated following combined ingestion of glucose and fructose during exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 2006; 100: 807–816.
 42. Carter JM, Jeukendrup AE, Jones DA. The effect of carbohydrate mouth rinse on 1-h cycle time trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004; 36: 2107–2111.
 43. Burke LM, Kiens B, Ivy JL. Carbohydrates and fat for training and recovery. *J. Sports Sci.* 2004; 22: 15–30.
 44. Jentjens R, Jeukendrup A. Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Med.* 2003; 33: 117–144.
 45. Berardi JM, Price TB, Noreen EE, Lemon PW. Postexercise muscle glycogen recovery enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2006; 38: 1106–1113.
 46. Jentjens RLPG, van Loon LJC, Mann CH, Wagenmakers AJM, Jeukendrup AE. Addition of protein and amino acids to carbohydrates does not enhance postexercise muscle glycogen synthesis. *J. Appl. Physiol.* 2001; 91: 839–846.
 47. van Loon LJ, Saris WH, Kruijshoop M, Wagenmakers AJ. Maximizing postexercise muscle glycogen synthesis: carbohydrate supplementation and the application of amino acid or protein hydrolysate mixtures. *Am. J. Clin. Nutr.* 2000; 72: 106–111.
 48. Carrithers JA, Williamson DL, Gallagher PM, Godard MP, Schulze KE, Trappe SW. Effects of postexercise carbohydrate-protein feedings on muscle glycogen restoration. *J. Appl. Physiol.* 2000; 88: 1976–1982.
 49. Ivy JL, Goforth HW, Jr., Damon BM, McCauley TR, Parsons EC, Price TB. Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J. Appl. Physiol.* 2002; 93: 1337–1344.
 50. Burke LM, Collier GR, Broad EM, et al. Effect of alcohol intake on muscle glycogen storage after prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* 2003; 95: 983–990.
 51. DACH. Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr. 1. Ausgabe ed. Frankfurt: Umschau/Braus, 2000.