

Einfluß der Kohlenhydrataufnahme während eines Langstreckenlaufes auf Leistungsfähigkeit und Stoffwechsel

W. Langhans¹, C. Wenk¹, M. Schwyn¹, W. Frey² und D. Braun³

¹ Institut für Nutztierwissenschaften, ETH Zürich, ² Thurg.-Schaffh. Höhenklinik, Davos, ³ Forschungsstelle Sportphysiologie, ETH Zürich

Effects of carbohydrate consumption during endurance exercise on performance and metabolism

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie wurde der Einfluß der Kohlenhydrataufnahme während eines Langstreckenlaufes über 46,6 km auf Leistungsfähigkeit, Energieumsatz und Stoffwechsel untersucht. Gut trainierte Läufer erhielten während des Laufes entweder ein kohlenhydrathaltiges (KH[+]) oder ein kohlenhydratfreies (KH[–]) Getränk. Der respiratorische Quotient (RQ), die Plasmakonzentrationen von Metaboliten des Kohlenhydrat- bzw. Fettstoffwechsels und von Hormonen (Insulin, Glucagon) wurden gemessen. Die mittlere Geschwindigkeit über die gesamte Distanz betrug 13,6 (KH[+]) bzw. 13,4 (KH[–]) km/h. Dabei war der gegen Ende des Laufes allgemein feststellbare Leistungsabfall bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes etwas schwächer ausgeprägt als bei Aufnahme des KH[–]-Getränkes. Der RQ nahm unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme während des gesamten Laufes annähernd linear ab. Die während des Laufes feststellbaren Veränderungen der Plasmakonzentrationen von Lactat, Freien Fettsäuren (FFS), Glycerin, D-3-Hydroxybutyrat (DHB), Glucagon und Insulin wurden durch die Kohlenhydrataufnahme nicht signifikant beeinflusst. Die Aufnahme des KH[+]-Getränkes verhinderte jedoch den unter Kontrollbedingungen gegen Ende des Laufes feststellbaren Abfall der Plasmaglukosekonzentration sowie den steilen Anstieg des Plasmaspiegels von DHB nach dem Lauf. Ferner führte die Kohlenhydrataufnahme zu einem raschen Abfall der Plasmakonzentrationen von FFS und Glucagon nach dem Lauf und erhöhte die Plasmakonzentration von Insulin geringfügig. Die Ergebnisse zeigen, daß die exogene Zufuhr von Kohlenhydraten den Stoffwechsel erst in der Endphase eines Langstreckenlaufes sowie in der anschließenden Erholungsphase beeinflusst. Ein positiver Effekt der Kohlenhydrataufnahme auf die Leistungsfähigkeit tritt ebenfalls erst in der Endphase eines so langen Laufes auf.

Summary: The present study addressed the effects of carbohydrate consumption during endurance exercise on performance, energy turnover, and metabolism. Well-trained endurance runners consumed a beverage with (cho[+]) or without (cho[–]) carbohydrates during a long-distance run (46.6 km). The respiratory quotient (RQ), plasma levels of carbohydrate and fat metabolites, and of hormones (insulin, glucagon) were measured before, several times during, and after the run. The mean running speed for the entire distance was 13.6 and 13.4 km/h with the cho[+] and cho[–] beverage, respectively. The decrease in speed that was observed towards the end of the run was somewhat more pronounced with consumption of the cho[–] beverage. The RQ decreased during the run almost linearly. This decrease was

independent of the consumed beverage. The changes in plasma levels of lactate, free fatty acids (FFA), glycerol, D-3-hydroxybutyrate (DHB), glucagon and insulin that occurred during the run were not affected by intake of the cho[+] beverage. However, intake of the cho [+] beverage prevented the decrease in plasma glucose observed towards the end of the run under control conditions, and eliminated the steep postexercise increase in plasma DHB. The intake of the cho[+] beverage also caused a rapid decrease in plasma levels of FFA and glucagon after the run, and slightly increased plasma insulin. The results demonstrate that ingestion of a carbohydrate-containing beverage during a long-distance run affects metabolism only during the final phase of the run and during the subsequent recovery period. Moreover, carbohydrate consumption improves performance only during the final phase of a long-distance run.

Schlüsselwörter: Ausdauerbelastung, Sportgetränke, Kohlenhydrataufnahme, Energieumsatz, Stoffwechsel, "post-exercise ketosis"

Key words: endurance exercise, sports beverages, carbohydrate consumption, energy turnover, metabolism, post-exercise ketosis

Einleitung

Dehydration und Kohlenhydratdepletion gelten als die wichtigsten leistungslimitierenden Faktoren bei Ausdauerleistung (z. B. 6, 8, 19). Trotz der unbestrittenen Bedeutung der Versorgung mit Kohlenhydraten beim Ausdauersport ist jedoch noch nicht vollständig geklärt, unter welchen Bedingungen (nur bei Spitzenleistung oder generell), in welcher Menge und Form sowie wann (vor oder während einer Ausdauerleistung) Kohlenhydrate gegebenenfalls konsumiert werden sollen, um die Leistung zu verbessern (siehe 7). Die Interpretation der diesbezüglich vorliegenden Befunde ist auch dadurch erschwert, daß es sich in vielen Fällen um Laboruntersuchungen mit körperlichen Belastungen unterschiedlicher Art und Intensität handelt (z. B. 4, 10, 13, 18, 21), die nicht ohne Einschränkungen mit den Bedingungen beispielsweise bei einem Langstreckenlauf vergleichbar sind. Ferner wurde der Einfluß der Kohlenhydratversorgung während Ausdauerbelastung meist mittels der parallelen Verabreichung von Kohlenhydraten und Elektrolyten geprüft (4, 10, 18), was eine Trennung der Effekte beider Nährstoffgruppen erschwert. In der vorliegenden Studie wurde deshalb untersucht, welchen Einfluß der Konsum eines kohlenhydrathaltigen, elektrolytfreien Getränkes auf Leistung und Stoffwechsel während eines Langstreckenlaufes besitzt. Die initiale Erholungsphase unmittelbar nach dem Lauf wurde dabei ebenfalls berücksichtigt.

Methodik

Versuchspersonen

17 gesunde, gut trainierte Läufer (mittleres Alter: 32 a, mittlere Größe: 175 cm, mittleres Körpergewicht: 67 kg) nahmen an der Studie teil. Die mittlere wöchentliche Trainingsdistanz der Läufer betrug 55 km, die mittlere Marathonbestzeit 173 min. Ihr momentanes Leistungsvermögen schätzten die Läufer auf durchschnittlich 97 % ihrer Bestleistung. Da es sich bei allen Läufern um erfahrene Ausdauersportler mit Wettkampfpraxis handelte, wurde in die individuelle Vorbereitung der

Läufer bewußt nur soweit unbedingt erforderlich eingegriffen. So war beispielsweise nur die Zusammenstellung des Abendessens am Tag vor dem Lauf und des Frühstückes am Lauftag standardisiert (Abendessen: Spaghetti mit Tomatensauce, Früchte, 1 Energieriegel; Frühstück: Weiß- oder Halbweißbrot, maximal 20 g Butter, Konfitüre/Honig). Die von den Läufern jeweils verzehrte Menge der einzelnen Komponenten wurde protokolliert, war aber nicht vorgegeben. Dies führte zu einer geschätzten mittleren Energieaufnahme (Abendessen + Frühstück) von 8975 kJ. Der mittlere Anteil an Protein, Fett und Kohlenhydraten betrug dabei 12, 8,5 und 79,5 %. In den Tagen vor dem Lauf ernährte sich keiner der Läufer nach einem speziellen Plan. Im Rahmen einer ausgewogenen Mischkost mit Milchprodukten als wichtigsten Proteinquellen bevorzugten jedoch alle Läufer kohlenhydratreiche Nahrungsmittel.

Versuchsprotokoll

Die Studie beinhaltete zwei Läufe über eine Distanz von jeweils 46,6 km. Bei jedem Lauf waren vier Runden auf einer flachen, überwiegend über Naturwege führenden Strecke rund um einen kleinen See zu absolvieren. Die beiden Läufe fanden im Frühjahr 1990 im Abstand von vier Wochen bei jeweils optimalen Bedingungen (Lufttemperatur 6–12 °C, rel. Luftfeuchtigkeit 60–70 %) statt. In einer einfachen Blindstudie trank jeder Läufer während der Läufe einmal ein elektrolyt-freies, kohlenhydrathaltiges Sportgetränk KH[+] und einmal ein elektrolyt- und kohlenhydratfreies, künstlich gesüßtes Getränk KH[–] (Tab. 1). Vom zugeteilten Getränk mußten während des Laufes auf zwei Ausgabestellen pro Runde verteilt insgesamt 1,2 l konsumiert werden. Zusätzlich stand Wasser ad libitum zur Verfügung.

Erhebungen und Analysen

Folgende Erhebungen wurden bei jedem Lauf vor dem Start und nach jeder Runde durchgeführt: Zeitnahme, Körpergewichtsmessung, Bestimmung des respiratorischen Quotienten (RQ), Urinsammlung und Blutentnahmen (jeweils etwa 20 ml) aus einer Vene in der Armbeuge zur Bestimmung der Konzentrationen von Metaboliten und Hormonen (siehe unten). Alle Läufer wurden angewiesen, mit ungefähr 80 % ihrer maximalen Sauerstoffkapazität zu laufen. Als Indikator für die Belastungsintensität wurde in einem Vorversuch die entsprechende Pulsfrequenz ermittelt und während des Laufes kontinuierlich gemessen. Zur Bestimmung des RQ liefen die Läufer jeweils zusätzlich 1 km auf einem Laufband mit gleicher Pulsfrequenz wie während der jeweils vorangegangenen Runde. Eine Stunde nach

Tab. 1. Zusammensetzung der beiden Getränke.

	KH[+]	KH[–]
Maltodextrin (g/l)	30	–
Saccharose (g/l)	30	–
Glucose (g/l)	20	–
Fructose (g/l)	10	–
Aspartam (g/l)	–	0.3
Zitronensaft (g/l)	20	20
Energiegehalt (kJ/l)	1560	–
Osmolarität (mmol/l)	306	–

dem Lauf wurde bei fortgesetztem Verpflegungsschema nochmals Blut entnommen.

Alle Blutproben wurden sofort zentrifugiert (4 °C, 2000 g, 10 min). Das so erhaltene Plasma wurde mittels Trockeneis eingefroren und für die späteren Analysen bei -20 °C gelagert. Die Analysen von Glucose, Lactat, Freien Fettsäuren (FFS), D-3-Hydroxybutyrat (DHB) und Glycerin erfolgten nach gängigen enzymatischen Methoden auf einem Analysenautomaten (Cobas, Mira, Hoffmann-La Roche, Basel). Die Bestimmung der Plasmakonzentrationen von Insulin und Glucagon erfolgte mittels kommerzieller Radioimmunttests (Insulin: Insulin RIA 100, Pharmacia Diagnostics AB, Uppsala Schweden; Glucagon: Glucagon Double Antibody, Diagnostic Products Corporation, Los Angeles, CA).

Statistische Auswertung

Für die Auswertung wurden beide Läufe zusammengefaßt, und es wurden nur die Resultate von den 13 Läufern berücksichtigt, die beide Läufe vollständig absolvierten. Statistische Vergleiche der Mittelwerte wurden mittels einer Varianzanalyse für wiederholte Messungen mit nachfolgenden modifizierten T-Tests (Bonferroni) durchgeführt. Als Signifikanzgrenze galt eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %.

Ergebnisse

Laufleistungen

Die mittlere Geschwindigkeit über die gesamte Distanz (46,6 km) betrug $13,6 \pm 0,3$ km/h ($\bar{x} \pm \text{SF}$) bei Aufnahme des kohlenhydrathaltigen (KH[+]) und $13,4 \pm 0,3$ km/h bei Aufnahme des kohlenhydratfreien Getränkes (KH[-]). Wie Abbildung 1 zeigt, war in der letzten Runde generell ein Leistungsabfall feststellbar. Dieser schien bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes stärker ausgeprägt zu sein als bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes. Wegen der großen individuellen Streuung der Laufgeschwindigkeit war der Unterschied jedoch nicht signifikant.

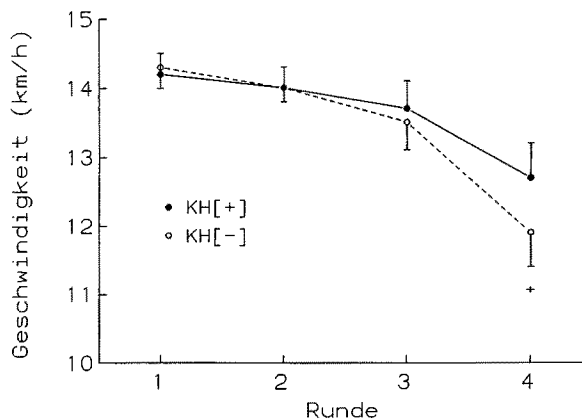


Abb. 1. Laufgeschwindigkeit bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Runde 1“.

Körpergewicht

Der Bruttogewichtsverlust während des gesamten Laufes betrug unabhängig vom konsumierten Getränk im Mittel 3,8 kg. Korrigiert um die aufgenommene Flüssigkeitsmenge (ca. 1,8l) und die abgegebene Urinmenge resultierte daraus ein Netto-Gewichtsverlust von ca. 2,3 kg. Bezogen auf das Körpergewicht der Läufer (67 kg) war der relative Gewichtsverlust demnach beträchtlich. Dies unterstreicht die Bedeutung des Flüssigkeitsersatzes bei Ausdauerbelastungen und ist auch deshalb bemerkenswert, weil der Konsum von 1,2l Flüssigkeit in Form des Sportgetränkes bei optimalen klimatischen Bedingungen vorgeschrieben war. Vermutlich hätten einige Läufer bei freiem Flüssigkeitskonsum weniger getrunken.

Respiratorischer Quotient (RQ)

Sowohl bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes als auch bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes fiel der RQ über die gesamte Laufrunde kontinuierlich ab (Abb. 2). Bei der Messung am Beginn des Laufes ließ sich, vermutlich wegen der zu geringen physischen Belastung, der RQ nicht zuverlässig messen. Die betreffenden Werte wurden deshalb bei der Darstellung nicht berücksichtigt. Unter Vernachlässigung des Proteinabbaues und der Stoffwechselumsetzung von Aminosäuren wurde aus den Gaswechsellmessungen auch der Anteil von Kohlenhydraten und Fetten an der Energiebereitstellung geschätzt. Dabei zeigte sich, daß unabhängig von den konsumierten Getränken der Kohlenhydratanteil von etwa 85 % nach der 1. Runde bis auf 5–8 % nach der 4. Runde abfiel. Am Ende des Laufes wurde demnach der Energiebedarf fast ausschließlich durch die Oxidation von Fettsäuren gedeckt. Interessant ist auch, daß Fett bereits nach der Hälfte der Distanz zu annähernd 50 % zur Energiebereitstellung beitrug (Abb. 2). Betrachtet über die gesamte Laufrunde, waren die Fette im Mittel mit 55 % und die Kohlenhydrate mit ca. 45 % an der Energiebereitstellung beteiligt. Dies

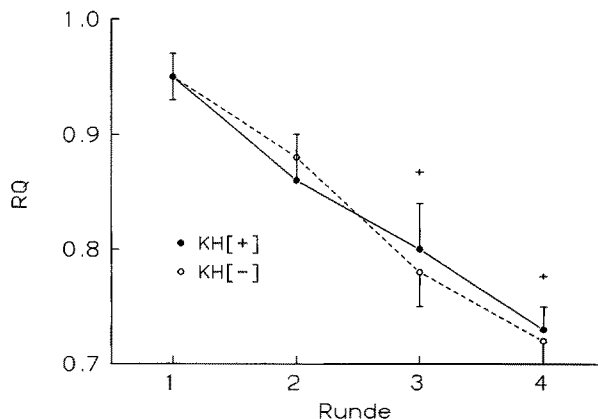


Abb. 2. Verlauf des respiratorischen Quotienten (RQ) bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Runde 1“.

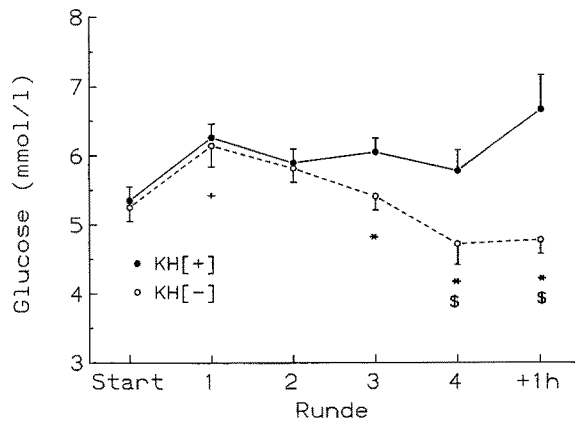


Abb. 3. Verlauf der Plasmakonzentration von Glucose bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). *signifikanter Unterschied zwischen KH[-] und KH[+]; + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“; \$ für KH[-] signifikant verschieden von „Runde 1“.

bedeutet, daß insgesamt etwa 330 g Kohlenhydrate und 180 g Fett verbraucht wurden. Aus den Gaswechsellmessungen läßt sich ferner berechnen, daß während des gesamten Laufes etwa 12,5 MJ umsetzbare Energie verbraucht wurden. Dies entspricht einem mittleren Wert von 53,5 kJ/kg, h, der mit diesbezüglichen Literaturangaben (9, 20) gut übereinstimmt.

Metaboliten und Hormone im Plasma

Da sich die anhand des Hämatokrits abgeschätzten Veränderungen des Plasmavolumens in einem sehr engen Bereich bewegten und von der Kohlenhydrataufnahme unabhängig waren, wurde auf eine rechnerische

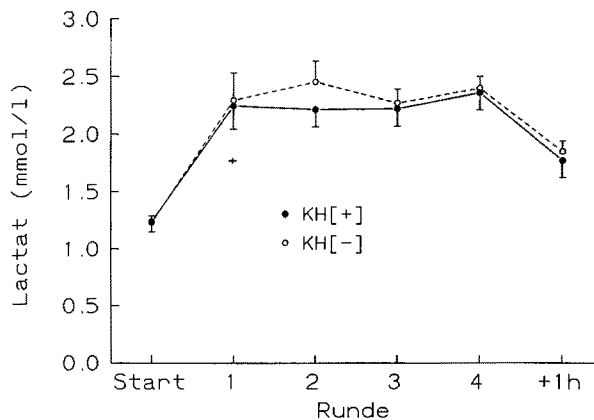


Abb. 4. Verlauf der Plasmakonzentration von Lactat bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“.

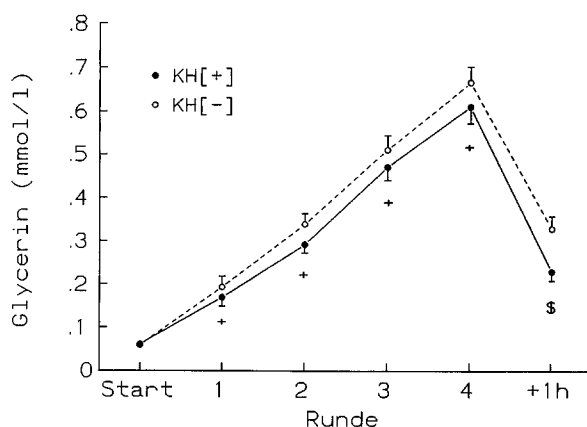


Abb. 5. Verlauf der Plasmakonzentration von Glycerin bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n=13$). + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“; \$ für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Runde 4“.

Korrektur der gemessenen Werte um die Plasmavolumensänderung verzichtet. Unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme stieg die Plasmakonzentration von Glucose in der ersten Runde leicht an (Abb. 3). Bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes blieb die Plasmaglukosekonzentration während des Laufes annähernd konstant und stieg danach noch weiter an. Bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes kam es insbesondere in der 2. Hälfte des Laufes gegenüber der KH[+]-Variante zu einem signifikanten Abfall der Plasmaglukosekonzentration, der bis 1 h nach dem Lauf nicht kompen-

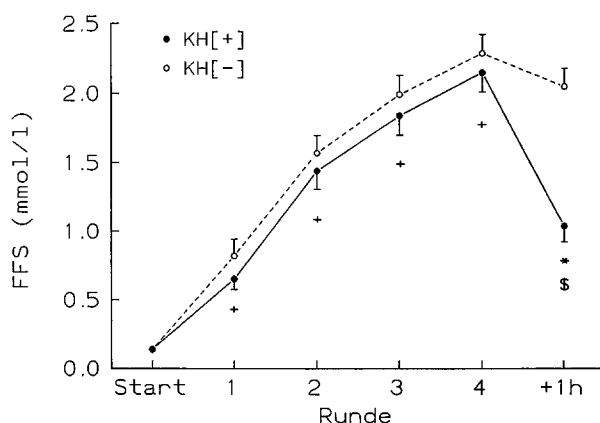


Abb. 6. Verlauf der Plasmakonzentration der Freien Fettsäuren (FFS) bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n=13$). * signifikanter Unterschied zwischen KH[-] und KH[+]; + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“; \$ für KH[+] signifikant verschieden von „Runde 4“.

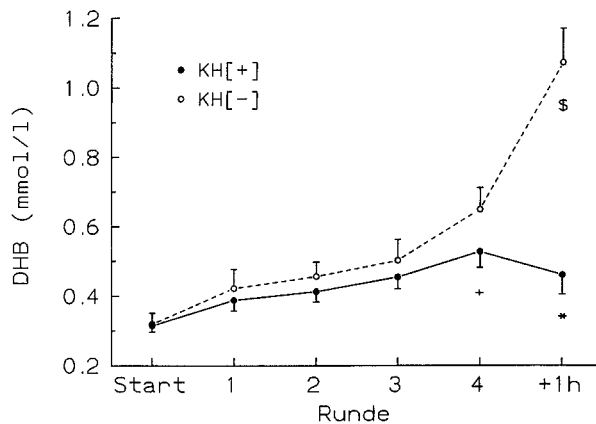


Abb. 7. Verlauf der Plasmakonzentration von D-3-Hydroxybutyrat (DHB) bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). *signifikanter Unterschied zwischen KH[-] und KH[+]; + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“; \$ für KH[-] signifikant verschieden von „Runde 4“.

siert werden konnte (Abb. 3). Die Plasmakonzentration von Lactat stieg ebenfalls unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme in der 1. Runde signifikant an und pendelte sich später auf einem erhöhten Niveau ein (Abb. 4). Als Zeichen der vermehrten Energiebereitstellung durch Lipolyse stiegen die Plasmakonzentrationen von Glycerin (Abb. 5) und Freien Fettsäuren (FFS) (Abb. 6) während des gesamten Laufes unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme sukzessive auf sehr hohe Werte an. Nach dem Lauf sank die Plasmakonzentration von Glycerin unter beiden Bedingungen rasch (Abb. 5) ab, wohingegen die Plasmakonzentration der FFS nur

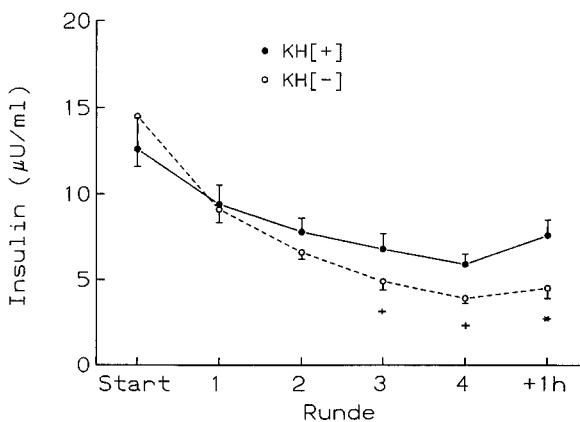


Abb. 8. Verlauf der Plasmakonzentration von Insulin bei Aufnahme des KH[+]- bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). *signifikanter Unterschied zwischen KH[-] und KH[+]; + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“.

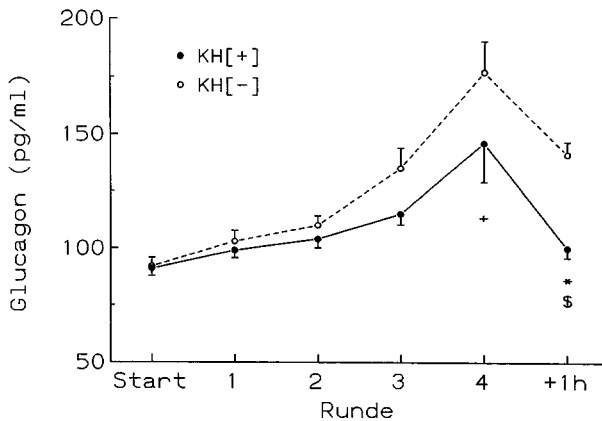


Abb. 9. Verlauf der Plasmakonzentration von Glucagon bei Aufnahme des KH[+] bzw. KH[-]-Getränkes. ($\bar{x} \pm \text{SF}$, $n = 13$). *signifikanter Unterschied zwischen KH[-] und KH[+]; + für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Start“; § für KH[+] und KH[-] signifikant verschieden von „Runde 4“.

bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes deutlich abnahm (Abb. 6). Die Plasmakonzentration von D-3-Hydroxybutyrat (DHB) stieg unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme während des Laufes deutlich an (Abb. 7). Bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes setzte sich dieser Anstieg auch nach dem Lauf fort. Bei fünf inaktiven Kontrollpersonen waren über den gesamten Zeitraum der beschriebenen Messungen keinerlei Veränderungen in den Plasmakonzentrationen der genannten Metaboliten feststellbar (nicht dargestellt).

Unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme sank die Plasmakonzentration von Insulin über den gesamten Lauf betrachtet signifikant und war bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes 1 h nach dem Lauf signifikant niedriger als bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes (Abb. 8). Umgekehrt stieg die Plasmakonzentration von Glucagon bis zum Ende des Laufes unabhängig vom konsumierten Getränk signifikant an und war 1 h nach dem Lauf bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes signifikant höher als bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes (Abb. 9).

Diskussion

Unter möglichst praxisnahen Bedingungen (aktiver Ausdauersport in einer naturnahen Umgebung) wurde in der vorliegenden Studie der Einfluß der Kohlenhydratversorgung auf die Leistungsfähigkeit und den Stoffwechsel bei Langstreckenläufern getestet. Ein positiver Effekt der Kohlenhydratversorgung auf die Leistungsfähigkeit deutete sich dabei erst in der letzten Phase der Ausdauerbelastung an. Allgemein wird der exogenen Zufuhr von Kohlenhydraten über ein Sportgetränk während einer Ausdauerbelastung ein stärkerer Effekt auf die Leistungsfähigkeit zugeschrieben als wir ihn beobachteten (siehe 7). Diesbezügliche Untersuchungen wurden jedoch häufig unter Bedingungen durchgeführt, die mit

einem Langstreckenlauf nicht direkt vergleichbar sind (4, 10, 13, 18, 21). Zudem war der positive Effekt der exogenen Kohlenhydratzufuhr in einigen Untersuchungen ebenfalls marginal (4, 18).

Die kontinuierliche Abnahme des RQ während des gesamten Laufes zeigt, daß es bei einem Langstreckenlauf zu einer allmählichen Umstellung von Kohlenhydrat- auf Fettumsatz kommt. Dies stimmt prinzipiell mit Befunden anderer Autoren (4, 10, 18) überein, die bei unterschiedlichen Formen von Ausdauerbelastung im Labor erhoben wurden. Überraschend ist, daß der RQ durch die Kohlenhydrataufnahme unter den gewählten Bedingungen offenbar nicht beeinflußt wurde, obwohl mit dem KH[+]-Getränk während des Laufs mehr als 100 g Kohlenhydrate aufgenommen wurden. Ähnliche Resultate wurden von anderen Autoren im Labor während eines 180minütigen Fahrradergometertests erhalten (4). Bei einem simulierten Triathlon führte die Aufnahme eines kohlenhydrathaltigen Getränkes hingegen zu einem deutlichen Anstieg des RQ (18). Diese Untersuchung (18) wurde jedoch bei Temperaturen von 25–30 °C durchgeführt, und das kohlenhydrathaltige Getränk wurde in kürzeren Abständen konsumiert als in der vorliegenden Studie. Eine geringfügige Erhöhung des RQ durch die Aufnahme eines kohlenhydrathaltigen Getränkes wurde auch während wiederholter Fahrradergometertests bei einer Temperatur von 26–27 °C gefunden (10). Abweichend von der vorliegenden Studie enthielten die Getränke in den betreffenden Untersuchungen neben Kohlenhydraten jedoch auch Elektrolyte. Dies dürfte die Absorption von Glucose zu einem gewissen Grad verbessern und damit auch deren Verfügbarkeit im Stoffwechsel erhöhen.

Der signifikant unterschiedliche Verlauf der Plasmaglukosekonzentrationen bei Aufnahme des KH[+] bzw. KH[-]-Getränkes in der zweiten Hälfte des Laufes zeigt, daß die Kohlenhydratzufuhr über das Getränk einen Abfall des Blutglucosespiegels verhinderte. Die niedrigen Blutglucosewerte bei Aufnahme des KH[-]-Getränkes schlugen sich offenbar auch im subjektiven Empfinden der Läufer nieder. Diese gaben nämlich an, gegen Ende des Laufes in den Muskeln ein Gefühl der Schwere zu verspüren und ein hohes Maß an Konzentration zu benötigen, um die geforderte Belastung durchzuhalten. Zusammenhänge zwischen einer Abnahme des Blutglucosespiegels und Erschöpfung wurden bereits mehrfach beschrieben (siehe 7). Nach Coyle (7) sind die Muskelglykogenvorräte nach spätestens 3 h intensiver Belastung erschöpft, so daß die im Muskel weiterhin verstoffwechselte Glucose ausschließlich mit dem Blut in die belastete Muskulatur transportiert wird. Die Erschöpfung wird durch die Aufnahme von Kohlenhydraten jedoch nicht verhindert, sondern offenbar lediglich um 30–60 min verzögert (7).

Ein initialer Anstieg der Plasmakonzentration von Glucose während Ausdauerbelastung wurde auch von anderen Autoren beschrieben (13). Der von der Kohlenhydrataufnahme unabhängige Anstieg der Plasmaglukosekonzentration in der ersten Runde paßte zu den beobachteten Veränderungen der Plasmakonzentrationen von Insulin und Glucagon, die für die Aufrechterhaltung der Glucosehomöostase während einer Belastung essentiell sind (22, 23, 25). Der bei Aufnahme des KH[+]-Getränkes festgestellte Anstieg der Plasmaglukosekonzentration in der Erholungsphase nach dem Lauf deutet auf ein vorübergehendes Ungleichgewicht zwi-

schen Glucose-Bereitstellung (orale Aufnahme + Gluconeogenese) und Glucoseverbrauch hin. So gibt es Hinweise darauf, daß der Glucoseverbrauch am Ende der Belastung schneller abnimmt als die Gluconeogenese (8). Der Verlauf der Plasmakonzentrationen von Insulin und Glucagon unterstützt diese Interpretation partiell, da die Insulinkonzentration 1 h nach dem Lauf noch deutlich niedriger war als beim Start.

Der insbesondere während der ersten Runde beobachtete Anstieg der Plasmalactatkonzentration zeigt in Übereinstimmung mit Ergebnissen anderer Autoren (siehe 14), daß die Lactatproduktion während einer Belastung deutlich ansteigt, auch wenn die aerobe Kapazität nicht voll ausgeschöpft ist. Der initiale Anstieg der Plasmakonzentration von Lactat bei submaximaler Belastung ist nicht nur Ausdruck einer unzureichenden Sauerstoffversorgung der Muskulatur (2, 14), sondern auch eine Folge der starken Stimulierung der Glycogenolyse und Glycolyse im Zusammenhang mit der Muskelkontraktion (2, 14). Die daraus resultierende Zunahme der NADH-Konzentration des Cytosols begünstigt die Produktion von Lactat (2, 14). Der initiale Anstieg der Plasmakonzentration von Lactat während des Laufes dürfte somit zum Teil auf eine verzögerte Aktivierung des Citratzyklus bei Belastungsbeginn zurückzuführen sein (2).

Auch der fast lineare Anstieg der Plasmakonzentrationen von FFS und Glycerin erfolgte unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme. Bei Aufnahme des KH[+] -Getränkes kam es nach dem Lauf zu einem schnelleren Abfall der Plasmakonzentration von FFS als bei Aufnahme des KH[-] -Getränkes. Dieser Unterschied scheint weniger durch eine länger anhaltende Stimulierung der Lipolyse bei ausbleibender Zufuhr von exogenen Kohlenhydraten bedingt zu sein, weil die Plasmakonzentration von Glycerin unabhängig von der Kohlenhydrataufnahme nach dem Lauf rasch abnahm. Vielmehr dürften Veränderungen in der Reveresterung von FFS in der Leber nach Belastungsende dazu beitragen. Nach Wolfe et al. (24) wird die vermehrte Oxidation von Fettsäuren bei körperlicher Belastung nicht nur durch eine gesteigerte Lipolyse, sondern auch durch eine Reduktion der Reveresterung von FFS in der Leber ermöglicht. Unmittelbar nach dem Ende der Belastung scheint jedoch die Reveresterung von FFS in der Leber wieder markant anzusteigen (24), was zum raschen Absinken der Plasmakonzentration der FFS in dieser Phase beitragen dürfte. Unsere Ergebnisse lassen demnach vermuten, daß die Umstellung von Oxidation auf Reveresterung von FFS nach Belastungsende beim Fehlen von exogenen Kohlenhydraten verzögert erfolgt. Diese Interpretation wird auch durch den Verlauf der Plasmakonzentration von DHB unterstützt. So war nur bei Aufnahme des KH[-] -Getränkes nach dem Lauf der als „post-exercise ketosis“ (siehe 16) bezeichnete Anstieg der Plasmakonzentration von DHB feststellbar. Als mögliche Auslöser der „post-exercise ketosis“ werden mehrere Faktoren diskutiert (1, 12, 16, 17). Insbesondere scheint die „post-exercise ketosis“ jedoch vom Kohlenhydratstatus des Organismus abhängig zu sein (1, 16). Die „post-exercise ketosis“ ließ sich beispielsweise durch die Aufnahme einer kohlenhydratreichen Diät für zwei Tage vor körperlicher Belastung verhindern (15). Die Verhinderung der „post-exercise ketosis“ durch die Aufnahme des KH[+] -Getränkes in der vorliegenden Studie ist bemerkenswert, weil die

Ernährung der Läufer vor dem Lauf gleich war und weil die Aufnahme von Glucose 30 min vor oder unmittelbar nach körperlicher Belastung die „post-exercise ketosis“ in Untersuchungen anderer Autoren nicht zu blockieren vermochte (17). Insgesamt wird demzufolge nach unseren Ergebnissen der intrahepatische Flux von energieliefernden Substraten nach Ausdauerbelastung durch die wiederholte Aufnahme von Kohlenhydraten während der Belastung beeinflusst.

Die bereits erwähnten gegenläufigen Veränderungen der Plasmakonzentrationen von Insulin und Glucagon während des Laufes stimmen mit diesbezüglichen Literaturangaben überein (z. B. 3, 5, 11). Berücksichtigt man die ausgeprägten Effekte von Insulin und Glucagon auf den Kohlenhydratstoffwechsel sowie die Stimulierung der hepatischen Ketogenese durch Glucagon (22, 23, 25), liegt die Vermutung nahe, daß auch das sehr viel niedrigere Verhältnis der Plasmakonzentrationen von Insulin/Glucagon bei Aufnahme des KH[–]-Getränkes entgegen anderslautenden Vermutungen (siehe 16) das Auftreten der „post-exercise ketosis“ zumindest unter unseren Testbedingungen ebenfalls begünstigte.

Insgesamt zeigen die vorliegenden Resultate, daß die wiederholte Aufnahme von Kohlenhydraten während eines Langstreckenlaufes die Leistungsfähigkeit und den Stoffwechsel erst in der Endphase der Belastung beeinflusst. Die zum Teil deutlichen Unterschiede in den Plasmakonzentrationen von Metaboliten und Hormonen nach Beendigung des Laufes sprechen für eine raschere Erholung bei Aufnahme des KH[+]–Getränkes.

Danksagung

Wir danken Frau Myrtha Arnold und Herrn William Moses für die Laborarbeiten, Herrn Dr. M. Buchmann für die Durchführung der Respirationsmessungen, Herrn M. Häfliger für die Mithilfe bei der Organisation und allen anderen Mitarbeitern des Instituts für ihre tatkräftige Unterstützung.

Die Untersuchungen wurden von der Gesellschaft zur Förderung der Sportwissenschaften an der ETH Zürich unterstützt.

Literatur

1. Adams JH, Koeslag JH (1988) Carbohydrate homeostasis and post-exercise ketosis in trained and untrained rats. *J Physiol* 407:453–461
2. Baessler KH (1988) Die physiologische Rolle von Laktat im Licht neuerer Erkenntnisse. *Ern Umschau* 35:71–74
3. Böttger I, Schlein EM, Faloona GR, Knochel JP, Unger RH (1972) The effect of exercise on pancreatic glucagon secretion. *J Clin Endocrinol Metab* 35:117–125
4. Burgess ML, Robertson RJ, Davis M, Norris JM (1991) RPE, blood glucose, and carbohydrate oxidation during exercise: effects of glucose feedings. *Med Sci Sports Exerc* 23:353–359
5. Cochran B, Marbach EP, Poucher R, Steinberg T, Gwinup G (1966) Effect of acute muscular exercise on serum immunoreactive insulin concentration. *Diabetes* 15:838–841
6. Costill DL, Miller JM (1980) Nutrition for endurance sport: carbohydrate and fluid balance. *Int J Sports Med* 1:2–14
7. Coyle EF (1990) Die Einnahme von Kohlenhydraten: Wirkungen auf Stoffwechsel, Leistung und Erholung. In: Brouns F (Hrsg) *Wander Sportforum* 6, Auf dem

- Weg nach Olympia; Leistungs- und Ernährungsaspekte bei Intensivtraining der Sportler, Wander AG. S 11–24
8. Coyle EF, Hagberg J, Hurley B, Martin W, Ehsani A, Holloszy J (1983) Carbohydrate feeding during prolonged exercise can delay fatigue. *J Appl Physiol* 55:230–235
 9. Davies CTM, Thompson MW (1986) Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes. *J Appl Physiol* 61:611–617
 10. Davis JM, Lamb DR, Pate RR, Slentz CA, Burgess WA, Bartoli WP (1988) Carbohydrate-electrolyte drinks: effects on endurance cycling in the heat. *Am J Clin Nutr* 48:1023–1030
 11. Felig P, Wahren J (1975) Fuel homeostasis during exercise. *N Engl J Med* 293:1078–1084
 12. Féry F, Balasse EO (1983) Ketone body turnover during and after exercise in overnight-fasted and starved humans. *Am J Physiol* 245:E318–E325
 13. Hargreaves M, Briggs CA (1988) Effect of carbohydrate ingestion on exercise metabolism. *J Appl Physiol* 65:1553–1555
 14. Katz A, Sahlin K (1988) Regulation of lactic acid production during exercise. *J Appl Physiol* 65:509–518
 15. Koeslag JH, Noakes TD, Sloan AW (1980) Post-exercise ketosis. *J Physiol* 301:79–90
 16. Koeslag JH (1982) Post-exercise ketosis and the hormone response to exercise: a review. *Med Sci Sports Exerc* 14:327–334
 17. Koeslag JH, Levinrad LI, Lochner J de V (1985) Post-exercise ketosis in post-prandial exercise: effect of glucose and alanine ingestion in humans. *J Physiol* 358:395–403
 18. Millard-Stafford M, Sparling PB, Roszkopf LB, Hinson BT, DiCarlo LJ (1990) Carbohydrate-electrolyte replacement during a simulated triathlon in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 22:621–628
 19. Refsum HE, Tveit B, Meen HD, Strømme SB (1973) Serum electrolyte, fluid and acid-base balance after prolonged heavy exercise at low environmental temperatures. *Scand J Clin Lab Invest* 32:117–122
 20. Stegemann J (1984) *Leistungsphysiologie*, 3. Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart
 21. Stein TP, Hoyr RW, O'Toole M, Leskiw MJ, Schluter MD, Wolfe RR, Hiller WDB (1989) Protein and energy metabolism during prolonged exercise in trained athletes. *Int J Sports Med* 10:311–316
 22. Wasserman DH, Lacy DB, Goldstein RE, Williams PE, Cherrington AD (1989) Exercise-induced fall in insulin and increase in fat metabolism during prolonged muscular work. *Diabetes* 38:484–490
 23. Wasserman DH, Spalding JA, Bracy D, Lacy DB, Cherrington AD (1989) Exercise-induced rise in Glucagon and Ketogenesis during prolonged muscular work. *Diabetes* 38:799–807
 24. Wolfe RR, Klein S, Carraro F, Weber J-M (1990) Role of triglyceride-fatty acid cycle in controlling fat metabolism in humans during and after exercise. *Am J Physiol* 258:E382–E389
 25. Wolfe RR, Nadel ER, Shaw JHF, Stephenson LA, Wolfe MH (1986) Role of changes in insulin and glucagon in glucose homeostasis in exercise. *J Clin Invest* 77:900–907

Eingegangen 27. August 1991
akzeptiert 16. Januar 1992

Für die Verfasser:

Prof. Dr. Langhans, Institut für Nutztierwissenschaften, Gruppe Physiologie und Tierhaltung, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich