

Kohlenhydrate in der Sporternährung

Position der Arbeitsgruppe Sporternährung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE)

Daniel König, Hans Braun, Anja Carlsohn, Mareike Großhauser, Alfonso Lampen, Stephanie Mosler, Andreas Nieß, Helmut Oberritter, Klaus Schäbenthal, Alexandra Schek, Peter Stehle, Kiran Virmani, Rainer Ziegenhagen, Helmut Heseke

Abstract

Kohlenhydrate haben eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung von SportlerInnen. Durch den Abbau von Kohlenhydraten sind sowohl die pro Liter Sauerstoff erzielte Energieausbeute als auch die energetische Flussrate höher als bei der Oxidation von Fettsäuren. Die Speicherkapazität für Kohlenhydrate in Leber und Muskulatur ist jedoch begrenzt. AusdauersportlerInnen wird daher empfohlen, dass die tägliche Ernährung einen hohen Anteil an Kohlenhydraten aufweist. Die genaue Menge richtet sich dabei nach dem Körpergewicht und dem Umfang der körperlichen Aktivität. Trotzdem kommt es während sportlicher Aktivität zu einer Reduktion der Kohlenhydratspeicher. In welchem Ausmaß die Kohlenhydratspeicher entleert werden, hängt insbesondere von der Dauer und Intensität der Belastung ab. Vor allem bei längeren, intensiven Belastungen ist es daher leistungsfördernd, wenn während der Belastung ausreichend Kohlenhydrate zugeführt werden. Auch in der Nachbelastungsphase nach längerer und intensiver körperlicher Aktivität können durch rasche Zufuhr von Kohlenhydraten die Speicher schneller wieder aufgefüllt werden.

Im vorliegenden Positionspapier werden die aktuellen Richtlinien zu Art, Menge und Zeitpunkt der Kohlenhydratzufuhr im Sport vorgestellt. Zudem werden Konzepte zur Bedeutung des sog. *carbohydrate loadings*, des glykämischen Indexes sowie zum Training ohne vorherige Kohlenhydratzufuhr diskutiert.

Schlüsselwörter: Kohlenhydrate, Positionspapier, Sporternährung, Glycogenspeicher, Energieversorgung

Einleitung

Innerhalb der Makronährstoffe sind Kohlenhydrate von besonderer Bedeutung für die sportliche Leistungsfähigkeit [1]. Kohlenhydrate weisen einen sehr günstigen energetischen Wirkungsgrad auf und können sowohl anaerob als auch aerob verstoffwechselt werden [2]. Vor allem hinsichtlich der im Ausdauersport wichtigen Sauerstoffaufnahme und damit der Energieeffizienz ist bei der Energiegewinnung aus Kohlenhydraten die Energieausbeute in Adenosintriphosphat (ATP) pro Liter Sauerstoff höher als bei Fettsäuren [3]. Die Gesamtenergieausbeute während anaerober (2 Mol ATP/Mol Glucose) bzw. aerober (36 Mol ATP/Mol Glucose) Glucoseverstoffwechselung ist zwar geringer als bei der Verstoffwechselung von Fettsäuren (z. B. 122 ATP/Mol Stearinsäure), die Energieflussrate, d. h. die ATP-Gewinnung pro Zeiteinheit, ist jedoch bei der Energiegewinnung aus Kohlenhydraten deutlich höher [4].

Im Vergleich zu der Energiegewinnung aus Fettsäuren ist die ATP-Resynthese/Zeiteinheit bei der aeroben Glucoseverwertung doppelt so hoch. Bei der anaeroben Glucoseverwertung liegt dieser Wert sogar viermal so hoch [5].

Ein hoher Kohlenhydratanteil in der Ernährung kann daher die körperliche Leistungsfähigkeit bei länger anhaltenden, intensiven Ausdauerbelastungen signifikant verbessern [6]. Darüber hinaus gibt es vermehrt Hinweise, dass die Höhe der Kohlenhydratspeicher in Leber und Muskulatur Einfluss auf trainingsinduzierte Anpassungsprozesse im Organismus hat [1, 7, 8].

Die Bedeutung der Kohlenhydratzufuhr für die sportliche Leistungsfähigkeit wird im Folgenden unter den Aspekten

- Kohlenhydrate in der Vorbelastungsphase,
 - Kohlenhydrate während körperlicher Belastung und
 - Kohlenhydrate in der unmittelbaren Nachbelastungsphase
- dargestellt.

Zitierweise

König D, Braun H, Carlsohn A, Großhauser M, Lampen A, Mosler S, Nieß A, Oberritter H, Schäbenthal K, Schek A, Stehle P, Virmani K, Ziegenhagen R, Heseke H (2019) Carbohydrates in sports nutrition. Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). Ernährungs Umschau 66(11): 228–235
The English version of this article is available online:
DOI: 10.4455/eu.2019.044

Peer-Review-Verfahren

Begutachtet im Zuge der Erstellung

Kohlenhydratverbrauch	Belastungsintensität	Zufuhrmenge
gering	niedrige Intensität	3–5 g/kg KG/d
moderat	moderate Belastungen (ca. 1 Stunde moderates Training pro Tag)	5–7 g/kg KG/d
hoch	kompetitives Ausdauertraining (moderates bis hochintensives Training an 1–3 Stunden pro Tag)	6–10 g/kg KG/d
sehr hoch	extreme Trainingsbelastungen (moderates bis hochintensives Training an über 4–5 Stunden pro Tag)	8–12 g/kg KG/d

Tab. 1: Tageszufuhrmenge von Kohlenhydraten in Abhängigkeit von der Belastungsintensität [1]
d = Tag; KG = Körpergewicht

Kohlenhydrate in der Vorbelastungsphase

Tägliche Ernährung

Grundlage für die tägliche Ernährung bei LeistungssportlerInnen ist eine vollwertige Ernährung gemäß den lebensmittelbezogenen Ernährungsempfehlungen der DGE [9, 10]. Einer der wichtigsten Gründe für die Betonung der Kohlenhydrate in der Basisernährung von AusdauersportlerInnen liegt in der dadurch gewährleisteten optimalen Auffüllung der Glycogenspeicher in Leber und Muskulatur [1, 11, 12]. Muskelbiopsiestudien haben gezeigt, dass ein hoher Kohlenhydratanteil in der Ernährung auch mit einem hohen hepatischen und muskulären Glycogenspeicher assoziiert ist. Zudem korrelierte die Höhe der Glycogenspeicher relativ eng mit der anschließenden Belastungsdauer in Ausdauer Tests [6].

Verglichen mit den Fettspeichern im menschlichen Körper (ca. 80 000–100 000 kcal), sind die Glycogenspeicher auch bei SportlerInnen in Muskulatur (ca. 1 230–2 050 kcal) und Leber (ca. 410 kcal) sehr begrenzt. Bei Erschöpfung der Glycogenspeicher kann die Energiegewinnung nicht länger aus Kohlenhydraten erfolgen. Da bei Oxidation von Fett die ATP-Gewinnung pro Zeiteinheit geringer ist (s. o.), muss in der Folge die Belastungsintensität reduziert werden.

Die Geschwindigkeit der Glycogenentleerung hängt von Dauer und Intensität der Belastung sowie vom Trainings- und Füllungs-zustand der Glycogenspeicher bei Belastungsbeginn ab [8]. Bei intensiven Ausdauerbelastungen im Bereich der anaeroben Schwelle reicht die gespeicherte Energiemenge bei voll aufgefüllten Glycogenspeichern für eine Belastungsdauer von ca. 75–90 Minuten; suboptimal gefüllte Glycogenspeicher sind mit entsprechend geringeren Belastungszeiten assoziiert [8, 11, 13].

Bei regelmäßigen Trainingsbelastungen sollte daher auf eine kohlenhydratreiche Ernährung geachtet werden.

♦ Tabelle 1 zeigt die Differenzierung der Zufuhrmenge von Kohlenhydraten in Abhängigkeit von der Trainingsdauer und Belastungsintensität, herausgegeben vom *American College of Sports Medicine* (ACSM) [1]. Die genannten Zufuhrmengen dienen zur groben Orientierung und müssen gegebenenfalls individuell angepasst werden.

Die Frage, inwiefern der Kohlenhydratanteil in der Ernährung die sportartspezifische Wettkampfleistung verbessert, ist wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt [1, 6, 7, 14]. Derzeit existieren verschiedene Konzepte zur Modifikation der Kohlenhy-

dratzufuhr hinsichtlich einer potenziellen Leistungsverbesserung. Von aktueller Relevanz ist v. a. das Training mit niedrigen Glycogenspeichern (*Train low*-Training) zur Verbesserung der Fettoxidation (→ vgl. auch „Position der Arbeitsgruppe Sporternährung der DGE: Fette in der Sporternährung“ [15]) [14, 16, 17].

Die Glycogenverfügbarkeit moduliert mit großer Wahrscheinlichkeit durch körperliches Training aktivierte Signalproteine wie die AMP-aktivierte Proteinkinase (AMPK) oder die p38 Mitogen-aktivierte Proteinkinase (MAPK) [1, 18]. Sowohl AMPK als auch MAPK sind an der Regulation der Expression und Aktivität von Transkriptoren bzw. transkriptionalen Co-Aktivatoren beteiligt, die die mitochondriale Biogenese und somit die oxidative Kapazität beeinflussen [19].

Obwohl eine Verbesserung der oxidativen Kapazität nach einer Trainingsphase mit niedrigen oder entleerten Glycogenspeichern in vielen Studien nachgewiesen werden konnte, ist nicht zweifelsfrei geklärt, ob dies auch mittel- und langfristige Erfolge in der Wettkampfleistung erbringt [14, 16]. Die Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten wird bei Training unter entleerten Glycogenspeichern möglicherweise u. a. durch die Herunterregulation des Glucosetransporters (GLUT-4) ungünstig beeinflusst [17]. Bei Ausdauerwettkämpfen mit hoher Belastungsintensität kann jedoch auf Kohlenhydrate als Energieträger nicht verzichtet werden; zudem ist der optimale Zeitpunkt, wann im Trainingszyklus wieder vermehrt Kohlenhydrate zugeführt werden sollen, noch nicht abschließend geklärt [1, 7, 14]. Hier sind noch weitere Studien mit optimiertem Studiendesign notwendig.

Im Hinblick auf metabolische Effekte einer kohlenhydratreichen Ernährung im Sport ist auch der glykämische Index von Bedeutung.

Der glykämische Index gibt Hinweise über das Ausmaß des Blutglucoseanstiegs nach Zufuhr kohlenhydrathaltiger Mahlzeiten im Vergleich zur Zufuhr eines Standards, z. B. Weißbrot oder Glucoselösung. Neben dem Blutglucoseanstieg ist auch die Höhe des postprandialen Insulinstiegs vom glykämischen Index abhängig [20]. Über die Höhe der Insulinkonzentration im Blut wird u. a. das relative Verhältnis der Kohlenhydrat- zur Fettoxidation entscheidend mitreguliert [21]. Je höher der glykämische Index, umso höher ist auch die postprandiale Insulinkonzentration. Dies könnte auch zu einer umso geringeren Fettoxidation führen [22, 23]. Dieser Zusammenhang konnte auch bei SportlerInnen unter körperlicher Belastung nachgewiesen werden [24]. Ob sich jedoch durch eine Betonung von Kohlenhydraten mit niedrigem glykämischen Index auch die Trainingsadaptation im Ausdauerbereich verbessern lässt, wird derzeit kontrovers diskutiert [25, 26]

Unmittelbare Wettkampfvorbereitung

Bei einer Wettkampfdauer von unter 90 Minuten wird derzeit keine Änderung des in ♦ Tabelle 1 dargestellten täglichen Zufuhrregimes empfohlen [1, 23]. Liegt die Wettkampfdauer über 90 Minuten, kann oft durch eine Steigerung der Kohlenhydratzufuhr in den Tagen vor dem Wettkampf eine Leistungsoptimierung induziert werden [27]. Sinn dieser Maßnahme ist eine weitere Erhöhung der Glycogenspeicher. Diese Methoden werden auch als *carbohydrate loading* oder „Superkompensation“ bezeichnet. Derzeit wird ein *carbohydrate loading* bei einer Wettkampfdauer von über 90 Minuten empfohlen.

Die aktuell gängigste Variante des *carbohydrate loading* sieht eine relativ deutliche Erhöhung der Kohlenhydratzufuhr auf 10–12 g Kohlenhydrate/kg Körpergewicht pro Tag (kg KG/d) für einen Zeitraum von 36–48 Stunden vor dem Wettkampf vor. Hierdurch können der Muskelglycogengehalt um ca. 10–15 % gesteigert und die Kohlenhydratoxidation während anhaltender Ausdauerbelastung länger aufrechterhalten werden. Eine weitere Methode beinhaltet eine Steigerung der Kohlenhydratzufuhr in der Woche vor einem Wettkampf (z. B. 9–10 g Kohlenhydrate/kg KG/d) bei gleichzeitiger Reduktion der Trainingsumfänge und Intensität.

Ein anderes Verfahren sieht eine intensive, glycogenentleerende Ausdauerbelastung 72 Stunden vor dem Wettkampf vor. Durch die vorangehende Belastung soll die Aktivität von GLUT-4 hochreguliert werden, wodurch dann, unterstützt durch eine kohlenhydratreiche Ernährung (z. B. 9–10 g Kohlenhydrate/kg KG/d) in den nachfolgenden Tagen bis zum Wettkampf, eine supramaximale Füllung der Glycogenspeicher gewährleistet werden soll.

Welcher dieser Methoden individuell der Vorzug zu geben ist, sollte nicht vor einem wichtigen Wettkampf ausgetestet werden. Nicht jede(r) SportlerIn verträgt sehr hohe Kohlenhydratmengen, und die Leistung bei wichtigen Wettkämpfen darf nicht durch Magen-Darm-Probleme gemindert werden. Es wird in der Literatur immer wieder betont, dass SportlerInnen eine hohe Kohlenhydratzufuhr trainieren können und sollen. Inwiefern dies individuell notwendig, umsetzbar und verträglich ist, muss noch durch weitere Untersuchungen geklärt werden [28].

Ernährung am Wettkampftag

Neben der Betonung eines hohen Kohlenhydratanteils in der täglichen Ernährung wird AusdauersportlerInnen eine kohlenhydrat-

reiche Mahlzeit (1–4 g Kohlenhydrate/kg KG, je nach Dauer und Intensität) 2–3 Stunden vor einem Wettkampf mit über 60-minütiger Belastungsdauer empfohlen [1]. Hierdurch werden die muskulären und insbesondere die hepatischen Glycogenspeicher, die seit der letzten Nahrungszufuhr über Nacht bereits signifikant reduziert sein können, wieder aufgefüllt [7]. Viele, wenn auch nicht alle Untersuchungen haben durch eine kohlenhydratreiche Vorbelastungsmahlzeit eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit nachgewiesen [1].

Die Empfehlung, die Vorbelastungsmahlzeit 2–3 Stunden vor Belastungsbeginn einzunehmen, gründet neben dem gastrointestinalen Völlegefühl v. a. auf der postprandialen hormonellen Stoffwechselregulation: Nach einer kohlenhydratreichen Vorbelastungsmahlzeit besteht eine gesteigerte Metabolisierung von Kohlenhydraten bei gleichzeitig verminderter Fettoxidation, da die Lipolyse und Fettoxidation bereits durch geringe Insulinkonzentrationen im Blut gehemmt werden. Der vermehrte Anteil der Kohlenhydrate am Stoffwechsel wird jedoch durch die höhere Verfügbarkeit nach der Kohlenhydratmahlzeit voll kompensiert, sodass hierdurch keine schnellere Erschöpfung der Glycogenspeicher induziert wird. Bei sehr kurzem Vorbelastungsintervall von weniger als 60–90 Minuten sind die Blutglucosekonzentration sowie insbesondere die Insulinkonzentration bei Belastungsbeginn noch relativ hoch. Die hierdurch induzierte deutliche Betonung der Kohlenhydratverstoffwechselung durch die Arbeitsmuskulatur kann bei kürzeren, intensiveren Belastungen im Bereich der anaeroben Schwelle durchaus erwünscht sein. Bei langen Ausdauerdistancen im eher moderaten Intensitätsbereich (60–70 % VO_2max^1) ist jedoch ein höherer Stoffwechselanteil an Fett zu bevorzugen, da hierdurch auch die Glycogenspeicher geschont werden. Daher sollte bei längeren Ausdauerbelastungen das Intervall zwischen Nahrungszufuhr und Wettkampfbeginn so gewählt werden, dass die initiale Verdauungsphase abgeschlossen ist und die Insulinkonzentration wieder weitgehend im Nüchternbereich liegt.

Auch der glykämische Index der Vorbelastungsmahlzeit kann die Substratoxidation während der Belastung beeinflussen. In Un-

¹ VO_2max : maximale O_2 -Menge, die von eingeatmetem Atemgas pro Zeiteinheit während der maximalen Belastung aufgenommen wird.

tersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass ein niedriger glykämischer Index der Vorbelastungsmahlzeit zu einer gesteigerten Fettoxidation in der nachfolgenden Belastung führt [24, 29]. Bedingt durch eine niedrigere Insulinkonzentration werden somit bei gleicher Belastungsintensität bevorzugt Fettsäuren im Vergleich zu Kohlenhydraten verstoffwechselt. Ein möglicher Vorteil wäre, dass bei längeren Ausdauerbelastungen durch den relativ höheren Anteil an Fettsäuren an der Energiegewinnung die Glycogenspeicher geschont werden.

Aussagen zur Wirkung und Bedeutung des glykämischen Index in der Vorbelastungsphase sind jedoch widersprüchlich. Abhängig von den eingeschlossenen Studien und dem gewählten Prüfalgorithmus kommt die Metaanalyse von Heung-Sang et al. zu der Einschätzung, dass ein niedriger glykämischer Index der Vorbelastungsmahlzeit einen Leistungsvorteil erbringt [26], während in der Metaanalyse von Burdon et al. kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden konnte [25].

Kohlenhydratzufuhr während körperlicher Belastung

Allgemeine Empfehlungen

Durch eine kontinuierliche Kohlenhydratzufuhr während intensiver, langanhaltender Belastung konnte in den meisten Untersuchungen die Oxidation von Kohlenhydraten aufrechterhalten und somit eine Hypoglykämie mit nachfolgendem Belastungsabbruch verhindert werden [30]. Mittels markierter Glucose wurde zudem die unmittelbare Beteiligung oral zugeführter Kohlenhydrate am Energiestoffwechsel unter Belastung nachgewiesen. Übersichtsarbeiten und Metaanalysen haben darüber hinaus eine signifikante Verlängerung der Belastungszeit bei kontinuierlicher Kohlenhydratgabe während der Belastung untersucht und bestätigt [1, 6].

Eine verlängerte Leistungsfähigkeit durch Kohlenhydratzufuhr beruht u. a. auf einer Einsparung von Muskelglycogen, der Schonung der hepatischen Glycogenreserven, der Verhinderung von Hypoglykämien und der Aufrechterhaltung einer hohen Energieflussrate [1, 7, 8, 31]. Die nachgewiesene Schonung der Glycogenreserven in der Leber ist v. a. bei Belastungen mit intensiven „Schlusspurts“ von Bedeutung, da auf diese hepatischen Gly-

cogenspeicher als „Schlussreserve“ gegen Ende hochintensiver Belastungen noch zurückgegriffen werden kann [27, 32, 33].

Aus praktischen Gründen werden Kohlenhydrate während der Belastung zumeist in Form von Getränken zugeführt. Aktuell wird empfohlen, dass in Abhängigkeit von Intensität, individueller Verträglichkeit und klimatischen Bedingungen bei Belastungen mit einer Dauer von über 60 Minuten alle 15 Minuten 150–350 mL eines Getränks mit einem Kohlenhydratanteil von ca. 6 % getrunken werden sollen [34].

Sehr häufig wird von SportlerInnen die Frage gestellt, ob bestimmte Darreichungsformen der Kohlenhydrate (z. B. Getränk, Riegel oder Gel) einen unterschiedlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Kohlenhydratoxidation unter Belastung haben. Trotz der sicherlich gegebenen schnelleren Verfügbarkeit von Kohlenhydraten in flüssiger Form scheint es bei längeren Belastungen keine Rolle zu spielen, in welcher Darreichungsform die Kohlenhydrate zugeführt werden. Hier können SportlerInnen also ganz nach persönlichen Vorlieben verfahren [35]. Es ist jedoch zu betonen, dass zusätzlich auf eine ausreichende Trinkmenge geachtet werden muss, damit die Magenpassage nicht verlängert und die osmotische Last nicht zu groß wird.

Die Oxidationsrate exogen zugeführter Glucose während der Belastung beträgt ca. 1–1,2 g/min und kann auch durch eine höhere Glucose- oder Maltodextrinzufuhr nicht weiter gesteigert werden. Als limitierender Faktor bei submaximaler Belastung wird weniger die Magenentleerungsrate oder die Aufnahmekapazität der Skelettmuskulatur, sondern vielmehr die Absorption im Dünndarm gesehen [28]. Die Glucosetransportproteine im Dünndarm weisen ein Kapazitätslimit auf. Studien haben jedoch gezeigt, dass unterschiedliche Kohlenhydrate, die über verschiedene Carriersysteme aufgenommen werden, zu einer gesteigerten Absorption und damit erhöhten Kohlenhydratoxidation führen. In der Tat konnte durch eine Kombination von Glucose und Fructose die Oxidationsrate auf Werte von 1,5–1,7 g/min gesteigert werden [11, 23].

Aus der aktuellen Literatur ist abzuleiten, dass v. a. bei extrem intensiven Ausdauerbelastungen über 2,5 Stunden der Einsatz verschiedener Kohlenhydrate mit unterschiedlichen Transportmechanismen sinnvoll sein könnte [36, 37]. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass SportlerInnen große Kohlenhydratmengen während körperlicher Belastung häufig nicht vertragen. Es wird vielfach darüber berichtet, dass die Zufuhr großer Kohlenhydratmengen trainiert werden könne; dies muss individuell ausgetestet werden [28]. Da in vielen Präparaten mit Kohlenhydratmischungen Fructose enthalten ist, muss eine Fructoseunverträglichkeit im Vorfeld ausgeschlossen werden, da ansonsten negative Effekte auf die Leistungsfähigkeit zu erwarten sind.

In den vergangenen Jahren wurde häufig darüber spekuliert, ob die zusätzliche Gabe von Protein im Sinne eines Kohlenhydrat-Proteingemisches die Leistungsfähigkeit noch weiter verbessern kann. Die Studienlage hierzu ist eher spärlich [38]. Es herrscht jedoch weitgehend Übereinstimmung, dass bei ausreichender Glucosezufuhr eine zusätzliche Proteinbeimengung keinen leistungsfördernden Effekt hat [13]. In einigen Studien konnte bei Zufuhr

Belastungsdauer	Kohlenhydrat-zufuhrmenge	Art der Kohlenhydrate	Empfehlungen
< 45 Minuten	keine Notwendigkeit		
45–75 Minuten	geringe Mengen oder evtl. Mund ausspülen	Monosaccharide einzeln oder Monosaccharide, die über verschiedene Carriersysteme aufgenommen werden, kombiniert (z. B. Gluc/Frc)	
1–2,5 Stunden	ca. 30–60 g/h	Monosaccharide einzeln oder Monosaccharide, die über verschiedene Carriersysteme aufgenommen werden, kombiniert (z. B. Gluc/Frc)	Austestung und evtl. „Training“ empfohlen
> 2,5 Stunden	bis zu 90 g/h	Monosaccharide, die über verschiedene Carriersysteme aufgenommen werden, kombiniert (z. B. Gluc/Frc)	Austestung und evtl. „Training“ essenziell

Tab. 2: Vom ACSM empfohlene Zufuhrmenge an Kohlenhydraten während intensiver körperlicher Belastung (mod. nach [1])

ACSM = American College of Sports Medicine; Frc = Fructose; Gluc = Glucose; h = Stunde

eines Kohlenhydrat-Proteingemisches eine geringere Freisetzung von Muskelenzymen (z. B. Creatinkinase) und eine verminderte Müdigkeit der Muskulatur nachgewiesen werden [38, 39]. Die Relevanz dieser Befunde für Belastbarkeit und Trainingserfolg ist jedoch nicht gesichert, sodass bei bedarfsgerechter Gabe von Kohlenhydraten kein zusätzlicher Nutzen einer Proteinzufuhr während Ausdauerbelastungen erkennbar ist [38].

♦ Tabelle 2 zeigt die empfohlene Zufuhrmenge an Kohlenhydraten während sportlicher Aktivität in Abhängigkeit von Belastungsdauer und Belastungsintensität.

Zentralnervöse Stimulation durch Kohlenhydrate

Eine eingeschränkte Energieversorgung und eine damit verminderte Blutglucosekonzentration können zu einer zentralen Ermüdung beitragen. Es wird vermutet, dass hierbei – unter anderem – eine erhöhte Serotoninkonzentration im zentralen Nervensystem (ZNS) beteiligt ist [40]. Gesicherte Erkenntnisse zur leistungsrelevanten Beeinflussung eines bestimmten zerebralen Stoffwechselweges gibt es jedoch noch nicht [41]. Dennoch konnten Studien nachweisen, dass schon das alleinige Ausspülen des Mundes mit kohlenhydrathaltigen Getränken die Leistungsfähigkeit, v. a. bei Kurzzeitbelastung zwischen 30 und 60 Minuten, positiv beeinflussen kann [42]. Dieser Effekt wird durch eine Stimulation oraler Kohlenhydratrezeptoren ausgelöst und wirkt über eine zentralnervöse Aktivierung von Belohnungszentren mit nachfolgender Stimulation von Motoneuronen leistungsfördernd [43]. Diese Studien sind v. a. aus physiologischer Sicht für das bessere Verständnis der Wirkung von Kohlenhydraten auch bei Kurzzeitbelastungen interessant. Ein Vorteil des alleinigen Ausspülens gegenüber dem Ausspülen und nachfolgendem Herunterschlucken konnte nicht nachgewiesen werden. Aus Sicht der SportlerInnen sind diese Erkenntnisse in der Praxis wohl nur bei Unverträglichkeit von Kohlenhydraten vor Wettkampfbelastungen relevant.

Kohlenhydratzufuhr in der unmittelbaren Nachbelastungsphase

Nach Belastungsende spielen sowohl die Menge als auch der Zeitpunkt der Kohlenhydratzufuhr eine wichtige Rolle für eine rasche und komplette Wiederauffüllung der Glycogendepots. Kohlenhydratgaben unmittelbar nach einer intensiven Belastung führen zu einer höheren Glycogenresynthese als eine vergleichbare Menge Kohlenhydrate, die erst nach 2 Stunden zugeführt wurde. Dies ist auf eine kontraktionsinduziert erhöhte Expression des GLUT-4 sowie der Glycogensynthetase in der Skelettmuskelzelle zurückzuführen [44]. Nach diesem initialen Zeitfenster mit hoher Syntheserate erfolgt die Glycogenresynthese insulinabhängig und langsamer [44, 45]. Inwiefern diese beiden Phasen physiologisch voneinander abzutrennen sind, ist nicht sicher nachgewiesen. Da die Höhe der postprandialen Insulinkonzentration mit dem glykämischen Index eng korreliert, wird empfohlen, in der unmittelbaren Nachbelastungsphase Kohlenhydrate mit hohem glykämischen Index zuzuführen [46].

Es wird daher empfohlen, dass in den ersten 2–4 Stunden nach Belastungsende ca. 1–1,2 g Kohlenhydrate/kg KG/h konsumiert werden [1]. Höhere Mengen Kohlenhydrate führen nicht zu einer deutlich erhöhten Glycogenresynthese. Dieser Effekt hat jedoch nur dann Bedeutung, wenn zwischen Belastungsende und nachfolgender erneuter Belastung weniger als 8–10 Stunden liegen. Bei einem längeren Zeitintervall scheint – bei ausreichenden

Situation		Kohlenhydratzufuhr
tägliche Auffüllung der Glycogenspeicher	Vorbereitung für Belastungen/ Wettkämpfe < 90 Minuten Dauer	7–12 g/kg KG über 24 Stunden
<i>carbohydrate loading</i>	Vorbereitung für Belastungen/ Wettkämpfe > 90 Minuten Dauer	während 36–48 Stunden 10–12 g/kg KG über 24 Stunden
Vorbelastungsmahlzeit	vor Belastungen > 60 Minuten Dauer	1–4 g/kg KG (konsumiert 2–3 Stunden vor Belastung)
kurze Belastungen	< 45 Minuten	keine Notwendigkeit
hochintensive Belastungen	45–75 Minuten	geringe Mengen (evtl. Mund ausspülen)
Ausdauerbelastungen (auch intermittierende)	1–2,5 Stunde(n)	30–60 g/h
Ultraausdauererevents	2,5–3 Stunden oder länger	bis zu 90 g/h mit kombinierten Kohlenhydraten
schnelle Wiederauffüllung der Glycogenspeicher	< 10 Stunden Pause zwischen 2 inten- siven, längeren Ausdauerbelastungen	1–1,2 g/kg KG jede Stunde nach Belas- tungsende über eine Dauer von 4 Stunden

Tab. 3: Zusammenfassung der Zufuhrempfehlungen für Kohlenhydrate [1]

h = Stunde; KG = Körpergewicht

der Kohlenhydratzufuhr – der Zeitpunkt der Zufuhr das Ausmaß der Glycogenresynthese nach 24 Stunden nicht zu beeinflussen [1].

Es ist weitgehend akzeptiert, dass Kohlenhydrate in der unmittelbaren Nachbelastungsphase möglichst rasch verfügbar sein und einen hohen glykämischen Index aufweisen sollten. Die Kombination aus Glucose und Fructose erhöht nach der aktuellen Studienlage die Glycogenresynthese nicht, da der glykämische Index von Fructose niedrig ist und damit die geringere Insulinfreisetzung nicht zu einer erhöhten Resyntheserate beiträgt [47].

In Analogie zur kombinierten Zufuhr von Kohlenhydraten und Proteinen während der Belastung wurde lange diskutiert, ob die Kombination auch in der Nachbelastungsphase Vorteile erbringt. Durch die gemeinsame Zufuhr von Kohlenhydraten und Proteinen soll v. a. die Wiederauffüllung der Glycogenspeicher optimiert werden. In Abhängigkeit von Zeitpunkt und Menge der kombinierten Zufuhr zeigten sich jedoch unterschiedliche Ergebnisse. Die aktuellen Erkenntnisse lauten, dass bei einer Kohlenhydratzufuhr von ca. 1,2 g/kg KG/h in der Nachbelastungsphase kein weiterer positiver Effekt von Proteinen auf die Glycogenspeicher zu erwarten ist. Wenn aus Gründen der Trainingsmethodik oder aufgrund gastrointestinaler Unverträglichkeiten die Kohlenhydratmenge niedriger als 1,2 g/kg KG/h sein sollte, dann können durch die zusätzliche Gabe von Proteinen die Glycogenspeicher besser gefüllt werden als bei alleiniger Zufuhr einer Kohlenhydratmenge von unter 1,2 g/kg KG/h [27].

In einer aktuellen Metaanalyse wurde der zusätzliche Nutzen einer kombinierten Kohlenhydrat-Proteingabe bei geringem Zeitintervall zwischen den Belastungseinheiten untersucht. Die AutorInnen der Studie kommen zu dem Schluss, dass im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit v. a. die Zufuhr von Kohlenhydraten in der Nachbelastungsphase relevant ist und dass die gleichzeitige Proteingabe keine weiteren Vorteile erbringt [13].

Zusammenfassung

In Abhängigkeit von Belastungsdauer und Belastungsintensität wird AusdauersportlerInnen eine Zufuhr von 6–12 g Kohlenhydraten/kg KG/d empfohlen [1].

Diese Empfehlung basiert auf folgenden Grundlagen (s. auch ♦ Tabelle 3):

1. Im Vergleich zu Fetten und Proteinen ermöglicht die Nutzung von Kohlenhydraten eine höhere Energieflussrate sowie eine gesteigerte Energieausbeute/Liter Sauerstoff in der Muskulatur. Länger anhaltende Ausdauerbelastungen (> 75–90 Minuten) im Bereich von ca. 70–75 % VO₂max sind daher nur über einen hohen Anteil von Kohlenhydraten an der muskulären Energiebereitstellung möglich.
2. Die Höhe der Glycogenspeicher in Leber und Muskulatur (ca. 1 600–2 400 kcal) ist begrenzt. Durch eine kohlenhydratreiche Ernährung in der Vorbelastungsphase wird eine optimale Auffüllung der muskulären und hepatischen Glycogenspeicher zwischen den Trainingseinheiten bzw. Wettkämpfen gewährleistet.
3. Durch die intermittierende Zufuhr von kohlenhydratreichen Getränken bzw. Snacks kann die Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten auch bei anhaltender Ausdauerbelastung aufrechterhalten werden. Durch eine vermehrte muskuläre Metabolisierung von exogen zugeführter Glucose während der Belastung kann die Belastungszeit signifikant verlängert werden. Die Oxidationsrate exogen zugeführter Glucose während der Belastung beträgt ca. 1–1,2 g/min und

kann auch durch eine höhere Glucose- oder Maltodextrinzufuhr nicht weiter gesteigert werden. Der limitierende Faktor ist die Absorption im Dünndarm. Bei Zufuhr verschiedener Kohlenhydrate, die über unterschiedliche Carriersysteme aufgenommen werden, kann eine gesteigerte Absorption und damit eine erhöhte Kohlenhydratoxidation (1,5–1,7 g/min) erreicht werden. Diese Maßnahmen machen jedoch nur bei extrem langen und intensiven Ausdauerbelastungen Sinn.

4. Vor allem bei einem kurzen Intervall zwischen wiederholten Belastungen sollten in der unmittelbaren Nachbelastungsphase in den ersten 2–4 Stunden 1–1,2 g Kohlenhydrate/kg KG/h bevorzugt mit hohem glykämischen Index konsumiert werden, um eine schnelle Wiederauffüllung zu gewährleisten. Bei einer längeren Zeitspanne sind 6–10 g Kohlenhydrate/kg KG/d für eine Wiederauffüllung der Glycogenspeicher ausreichend. Hinsichtlich der Glycogenresynthese ist die zusätzliche Gabe von Proteinen nur sinnvoll, wenn deutlich weniger als 1,2 g Kohlenhydrate/kg KG/h zugeführt werden.

Korrespondierender Autor

Klaus Schäbenthal
schaebenthal@dge.de

Prof. Dr. Daniel König¹
Hans Braun²

Prof. Dr. Anja Carlsohn³

Dr. Mareike Großhauser⁴

Prof. Dr. Dr. Alfonso Lampen⁵

Dr. Stephanie Mosler⁶

Prof. Dr. Andreas Nieß⁷

Dr. Helmut Oberitter⁸

Klaus Schäbenthal⁸

Dr. Alexandra Schek⁹

Prof. Dr. Peter Stehle¹⁰

Dr. Kiran Virmani⁸

Dr. Rainer Ziegenhagen⁵

Prof. Dr. Helmut Heseke¹¹

¹ Institut für Sport und Sportwissenschaft
Arbeitsbereich Ernährung
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

² Institut für Biochemie
Deutsches Forschungszentrum für Leistungssport –
momentum; Deutsche Sporthochschule Köln

³ Fakultät Life Sciences/Department Ökotrophologie
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

⁴ Olympiastützpunkt Rheinland-Pfalz/Saarland

⁵ Abteilung Lebensmittelsicherheit (Abt. 5)
Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR)

⁶ Institut für Gesundheitswissenschaften
Abteilung Ernährung, Konsum und Mode
Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd
Olympiastützpunkt Stuttgart

⁷ Abteilung Sportmedizin
Medizinische Klinik
Universitätsklinikum Tübingen

⁸ Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE)

⁹ Redaktion Leistungssport (DOSB)

¹⁰ Institut für Ernährungs- und Lebensmittelwissenschaften
Ernährungsphysiologie
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

¹¹ Institut für Ernährung, Konsum und Gesundheit
Fakultät für Naturwissenschaften Universität Paderborn

Danksagung

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bedanken sich die AutorInnen bei Dr. Angela Bechthold und Birte Peterson-Sperlich vom Referat Wissenschaft der DGE.

Interessenkonflikt

Die AutorInnen erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

1. Thomas DT, Erdman KA, Burke LM (2016) American College of Sports Medicine joint position statement. Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 48: 543–568
2. Berg A, Klock B, König D (2006) [Dietary modification in hypertensives]. *MMW Fortschr Med* 148: 36–37, 39
3. Burke LM (2015) Re-examining high-fat diets for sports performance: did we call the 'nail in the coffin' too soon? *Sports Med* 45 (Suppl 1): S33–S49
4. Howald H, Decombaz J (1983) Nutrient intake and energy regulation in physical exercise. *Experientia Suppl* 44: 77–88
5. Hargreaves M (1991) Carbohydrates and exercise. *J Sports Sci* 9 Spec No: 17–28
6. Pochmüller M, Schwingshackl L, Colombani PC, Hoffmann G (2016) A systematic review and meta-analysis of carbohydrate benefits associated with randomized controlled competition-based performance trials. *J Int Soc Sports Nutr* 13: 27
7. Hearn MA, Hammond KM, Fell JM, Morton JP (2018) Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise: implications for endurance performance and training adaptations. *Nutrients* 10: 298
8. Murray B, Rosenbloom C (2018) Fundamentals of glycogen metabolism for coaches and athletes. *Nutr Rev* 76: 243–259
9. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (Hg). Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. (2017) URL: www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/10-regeln-der-dge/ Zugriff 27.08.19
10. Deutsche Gesellschaft für Ernährung (Hg). Der DGE-Ernährungskreis – Beispiel für eine vollwertige Lebensmittelauswahl. (2019) URL: www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/ernaehrungskreis/ Zugriff 27.08.19
11. Burke LM, van Loon LJC, Hawley JA (1985) Postexercise muscle glycogen resynthesis in humans. *J Appl Physiol* 122: 1055–1067
12. Beelen M, Burke LM, Gibala MJ, van Loon LJ (2010) Nutritional strategies to promote postexercise recovery. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 20: 515–532
13. McCartney D, Desbrow B, Irwin C (2018) Post-exercise ingestion of carbohydrate, protein and water: a system-

- atic review and meta-analysis for effects on subsequent athletic performance. *Sports Med* 48: 379–408
14. Jeukendrup AE (2017) Periodized nutrition for athletes. *Sports Med* 47: 51–63
 15. Schek A, Braun H, Carlssohn A et al. (2019) Fats in sports nutrition. Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE). *Ernährungs Umschau* 66(9): 181–188
 16. Chang CK, Borer K, Lin PJ (2017) Low-carbohydrate-high-fat diet: can it help exercise performance? *J Hum Kinet* 56: 81–92
 17. Burke LM (2010) Fueling strategies to optimize performance: training high or training low? *Scand J Med Sci Sports* 20 (Suppl 2): 48–58
 18. Hawley JA, Lundby C, Cotter JD, Burke LM (2018) Maximizing cellular adaptation to endurance exercise in skeletal muscle. *Cell Metab* 27: 962–976
 19. Wojtaszewski JF, MacDonald C, Nielsen JN et al. (2003) Regulation of 5'AMP-activated protein kinase activity and substrate utilization in exercising human skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 284: E813–E822
 20. Trussardi Fayh AP, Lopes AL, Fernandes PR et al. (2013) Impact of weight loss with or without exercise on abdominal fat and insulin resistance in obese individuals: a randomised clinical trial. *Br J Nutr* 110: 486–492
 21. Kahlhofer J, Lagerpusch M, Enderle J et al. (2014) Carbohydrate intake and glycemic index affect substrate oxidation during a controlled weight cycle in healthy men. *Eur J Clin Nutr* 68: 1060–1066
 22. Stevenson EJ, Williams C, Mash LE et al. (2006) Influence of high-carbohydrate mixed meals with different glycemic indexes on substrate utilization during subsequent exercise in women. *Am J Clin Nutr* 84: 354–360
 23. Kaur B, Quek Yu CR, Camps S, Henry CJ (2016) The impact of a low glycaemic index (GI) diet on simultaneous measurements of blood glucose and fat oxidation: a whole body calorimetric study. *J Clin Transl Endocrinol* 4: 45–52
 24. Chen YJ, Wong SH, Wong CK et al. (2008) Effect of preexercise meals with different glycemic indices and loads on metabolic responses and endurance running. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 18: 281–300
 25. Burdon CA, Spronk I, Cheng HL, O'Connor HT (2017) Effect of glycemic index of a pre-exercise meal on endurance exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 47: 1087–1101
 26. Heung-Sang WS, Sun FH, Chen YJ et al. (2017) Effect of pre-exercise carbohydrate diets with high vs low glycemic index on exercise performance: a meta-analysis. *Nutr Rev* 75: 327–338
 27. Cermak NM, van Loon LJ (2013) The use of carbohydrates during exercise as an ergogenic aid. *Sports Med* 43: 1139–1155
 28. Jeukendrup AE (2017) Training the gut for athletes. *Sports Med* 47: 101–110
 29. Stevenson E, Williams C, Nute M (2005) The influence of the glycaemic index of breakfast and lunch on substrate utilisation during the postprandial periods and subsequent exercise. *Br J Nutr* 93: 885–893
 30. Moseley L, Lancaster GI, Jeukendrup AE (2003) Effects of timing of pre-exercise ingestion of carbohydrate on subsequent metabolism and cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 88: 453–458
 31. Gonzalez JT, Fuchs CJ, Betts JA, van Loon LJ (2016) Liver glycogen metabolism during and after prolonged endurance-type exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 311: E543–E553
 32. Coyle EF, Coggan AR (1984) Effectiveness of carbohydrate feeding in delaying fatigue during prolonged exercise. *Sports Med* 1: 446–458
 33. Graham TE, Adamo KB (1999) Dietary carbohydrate and its effects on metabolism and substrate stores in sedentary and active individuals. *Can J Appl Physiol* 24: 393–415
 34. Jeukendrup AE, Jentjens R (2000) Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med* 29: 407–424
 35. Rowlands DS, Wallis GA, Shaw C et al. (2005) Glucose polymer molecular weight does not affect exogenous carbohydrate oxidation. *Med Sci Sports Exerc* 37: 1510–1516
 36. Rowlands DS, Houltham SD (2017) Multiple-transportable carbohydrate effect on long-distance triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 49: 1734–1744
 37. Wallis GA, Wittekind A (2013) Is there a specific role for sucrose in sports and exercise performance? *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 23: 571–583
 38. Jager R, Kerkick CM, Campbell BI et al. (2017) International Society of Sports Nutrition position stand: protein and exercise. *J Int Soc Sports Nutr* 14: 20
 39. Romano-Ely BC, Todd MK, Saunders MJ, Laurent TS (2006) Effect of an isocaloric carbohydrate-protein-antioxidant drink on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 38: 1608–1616
 40. Meeusen R (2014) Exercise, nutrition and the brain. *Sports Med* 44 (Suppl 1): S47–S56
 41. Davis JM, Alderson NL, Welsh RS (2000) Serotonin and central nervous system fatigue: nutritional considerations. *Am J Clin Nutr* 72: S73S–S78S
 42. Peart DJ (2017) Quantifying the effect of carbohydrate mouth rinsing on exercise performance. *J Strength Cond Res* 31: 1737–1743
 43. de Ataíde e Silva T, Di Cavalcanti Alves de Souza ME et al. (2013) Can carbohydrate mouth rinse improve performance during exercise? A systematic review. *Nutrients* 6: 1–10
 44. Jentjens R, Jeukendrup A (2003) Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Med* 33: 117–144
 45. Millard-Stafford M, Childers WL, Conger SA (2008) Recovery nutrition: timing and composition after endurance exercise. *Curr Sports Med Rep* 7: 193–201
 46. Stevenson E, Williams C, Biscoe H (2005) The metabolic responses to high carbohydrate meals with different glycemic indices consumed during recovery from prolonged strenuous exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 15: 291–307
 47. Rosset R, Lecoultre V, Egli L et al. (2017) Postexercise repletion of muscle energy stores with fructose or glucose in mixed meals. *Am J Clin Nutr* 105: 609–617

DOI: 10.4455/eu.2019.044