

Christof Mannhart¹, Paolo Colombani²

¹ Sportwissenschaftliches Institut (SWI), Bundesamt für Sport (BASPO), Magglingen

² INW Ernährungsbiologie, Departement für Agrar- und Lebensmittelwissenschaften, ETH Zürich

Grundlagen der Sporternährung – die elementare Bedeutung der Energie-, Makronährstoff- und Flüssigkeitszufuhr

Zusammenfassung

Prinzipiell soll sich eine auf leistungsorientierte Personen zugeschnittene Ernährungsweise auch an den langfristigen, präventiven Ernährungsgrundsätzen (z.B. Schweizer Ernährungspyramide) ausrichten. In Abhängigkeit von diversen Faktoren wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Sportart, Trainingsvolumen, Trainingshäufigkeit, Leistungsintensität, Regenerationszeit und äusseren klimatischen Bedingungen muss allerdings versucht werden, kurz- und mittelfristig die Bilanzen im Bereich Energie-, Makronährstoff- und Flüssigkeitszufuhr ausgeglichen zu gestalten. Dadurch kann das Auftreten stark leistungslimitierender Faktoren wie Glykogenepletion, Hypoglykämie, Dehydratation minimiert werden. Eckpfeiler einer solchen Ernährung sind dabei in qualitativer Hinsicht eine bedarfsadäquate Zufuhr von Kohlenhydraten (ca. 6–10 g pro Kilogramm Körpermasse), Fetten (ca. 1.5 g pro Kilogramm Körpermasse) und Protein (ca. 1.5 g pro Kilogramm Körpermasse), die sinnvollerweise zeitlich auf die Vorleistungs-, Leistungs- und Regenerationsphase abgestimmt werden.

Summary

A diet for physically active and performance-oriented people must also allow for any long-term preventive aspects of a healthy nutrition (e.g. according to the Swiss nutrition pyramid). Additionally, the energy, macronutrient and fluid balances must be met in a short- and medium-term range according to factors such as for example age, gender, sport type, exercise volume, exercise frequency, exercise intensity, regeneration, and environmental circumstances. In this way, the occurrence of performance limiting factors as glycogen depletion, hypoglycemia, or dehydration can be minimized. Cornerstones of such a diet are the consumption of about 6 to 10 grams of carbohydrates and each 1.5 grams of fat and protein per kilogram body mass. The nutrition must of course be closely timed with the exercise periods.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 49 (3), 125–130, 2001

Einleitung

Auf der Suche nach der definitiven Leistungssteigerung im Sport wird allzu häufig auf die Karte Supplemente gesetzt, während die wissenschaftlich fundierten, die Leistungsphysiologie beeinflussenden Ernährungsfaktoren nicht konsequent umgesetzt werden. Aus diesem Grund möchten wir in den folgenden Ausführungen anhand der neuesten relevanten Literatur bewusst auf die oft bekannten, häufig aber vernachlässigten ernährungsabhängigen, leistungslimitierenden Faktoren hinweisen. Die Empfehlungen für die Ernährung einer physisch aktiven Person unterscheiden sich qualitativ kaum von den Empfehlungen für weniger aktive gesunde Personen. Quantitativ können zwar durchaus Unterschiede vorhanden sein, diese kommen aber erst bei grossen Leistungsumfängen oder extremen klimatischen Bedingungen zum Tragen. Die Grundlage einer Sporternährung stellt somit eine Ernährungsweise dar, die sich grundsätzlich an den präventionsorientierten Grundsätzen beispielsweise der Schweizer Ernährungspyramide [1] ausrichtet. Zusätzlich verdienen aber die in *Tabelle 1* aufgeführten Faktoren, welche aus ernährungsphysiologischer Sicht die physische Leistung am stärksten beeinflussen, besonderes Augenmerk. Erschöpfte Glykogenspeicher, Hypoglykämie, Dehydratation, Hyponatriämie sowie gastrointestinale Probleme sind anerkannte, leistungslimitierende Aspekte unter Normalbedingungen. Spezifischen Extremsituationen wie beispielsweise Ultra-Ausdauerleistungen oder extremen äusseren Bedingungen (Hitze, Kälte, Höhe) mögen sie aber nicht immer vollends gerecht

werden. Trotzdem erlauben wir uns, in den folgenden Ausführungen relevante Grundlagen der Energie-, Makronährstoff- und Flüssigkeitszufuhr für täglich physisch aktive Personen vor, während und nach Leistungen zu erörtern.

Energie

Im Stoffwechsel erfolgt die Umsetzung von substratgebundener in mechanische Energie ausschliesslich über das ubiquitäre Adenosinriphosphat (ATP). Da die Menge an ATP im Körper minimal ist (knapp 100 g [2]), muss es stets neu synthetisiert werden. Dies geschieht durch Mobilisation und Oxidation endogener Reserven sowie Oxidation exogener energieliefernder Nährstoffe (bei phy-

Erschöpfte Glykogenspeicher in der aktiven Muskulatur

Hypoglykämie

Dehydratation

Hyponatriämie

Gastrointestinale Probleme

Andere, die zentrale Ermüdung betreffende Faktoren (inkl. Neurotransmitter)

Tabelle 1: Allgemeine ernährungsabhängige leistungslimitierende Faktoren [27].

sischer Aktivität praktisch ausschliesslich durch Kohlenhydrate und Lipide). Die dabei entstehende Menge an ATP ist einerseits abhängig von der Art des Nährstoffes und andererseits von der zur Verfügung stehenden Sauerstoffmenge (aerober bzw. anaerober Abbau).

Anhand *Abbildung 1* nach Hawley und Hopkins [3] kann die relative Energiebereitstellung aus den energieliefernden Nährstoffen in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt werden. Die y-Achse entspricht dabei der maximal geleisteten Arbeit zum entsprechenden Zeitpunkt. Bei einer maximalen Belastung von etwa einer Minute stammt die Energie somit je zur Hälfte aus aerober und anaerober Glykolyse. Lipide können dagegen nur aerob abgebaut werden. Bei einer maximalen Belastung im Bereich von drei bis fünf Stunden stammt die Energie je zur Hälfte aus aerober Glykolyse und aerober Lipolyse. Im Stoffwechsel erfolgt die Energiebereitstellung aus den verschiedenen Nährstoffen niemals nacheinander, sondern stets gleichzeitig, jedoch in variierendem Verhältnis. Die oft erwähnte Behauptung, die Oxidation von Fettsäuren beginne erst nach 30 Minuten Belastung bei niedriger Intensität, ist nicht haltbar. Wäre dies nur annähernd richtig, müsste bei einer Belastung bei niedriger Intensität von etwa 30 Minuten Dauer vorwiegend Glucoseoxidation erfolgen. Die Messung der Energiebereitstellung bei einer solchen Belastung zeigt aber, dass diese zu etwa 90% aus Fettsäureoxidation stammt [4].

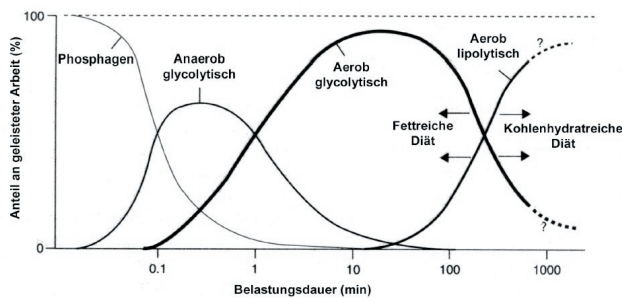


Abbildung 1: Energiebereitstellung in Abhängigkeit von der Belastungsdauer [3].

Kohlenhydrate

Kohlenhydrate stellen die wichtigste Energiequelle dar. Sowohl das Zentralnervensystem als auch die Erythrozyten sind obligat auf die Zufuhr von Glucose angewiesen, und ohne eine genügende Zufuhr an Kohlenhydraten kann auch die Fettsäureoxidation nicht vollständig ablaufen. Eine vermehrte Produktion an Ketonkörpern und Mobilisation und Oxidation von endogenem Protein sind die Folge. Unter physischer Belastung nehmen Glykogen und Glucose ebenfalls eine zentrale Rolle ein. Einerseits ist es nur bei Glucoseoxidation möglich, hohe Leistungen zu erbringen, und andererseits sind die Glykogenspeicher im Gegensatz zu den Fettreserven begrenzt. Idealerweise sollte eine Sporternährung aus etwa 60 Energieprozenten Kohlenhydrate bestehen, doch ist ein solch hoher Anteil in der Basisernährung nicht einfach zu erreichen. Gemäss dem letzten schweizerischen Ernährungsbericht betrug die Kohlenhydrataufnahme in der schweizerischen Bevölkerung etwa 48% und liegt demzufolge deutlich unter den Empfehlungen für eine sportgerechte Ernährung [5]. Für eine Bevölkerungsgruppe macht eine Empfehlung in Form von Energieprozenten durchaus Sinn, für ein Individuum führt eine solche Art der Empfehlung oft zu Missverständnissen. Deshalb wird seit geraumer Zeit neben der Empfehlung für die Proteinaufnahme auch die Empfehlung für die Kohlenhydrataufnahme in Gramm pro Kilogramm Körpermasse angegeben. Im Gegensatz zu den Proteinen ist aber die Kohlenhydrataufnahme wesentlich stärker von der jeweiligen Situation bzw. dem unmittelbaren Ziel einer physisch aktiven Person abhängig. Deshalb werden die in *Tabelle 2* aufgelisteten Empfehlungen für die Kohlenhydrateinnahme ziel- und situationsorientiert definiert.

Glykämischer Index

Kurzfristig auf Einzelleistung ausgerichtet:	Empfohlene Kohlenhydratzufuhr
Täglich optimale Glykogenspeicherung (z.B. Regeneration nach Leistungen oder gezielte Kohlenhydratladung vor Leistungen)	7–10 g/kg KM/Tag
Schnelles Wiederauffüllen der Glykogenspeicher bei Erholungszeiten < 8 h zwischen den Einzelleistungen	1 g/kg KM, alle 2 h
Vorleistungsmahlzeit zur Steigerung der Kohlenhydratverfügbarkeit vor Langzeitleistungen	1–4 g/kg KM, 1–4 h vor Leistungsbeginn
Kohlenhydratzufuhr während Leistungen mittlerer Intensität oder intermittierenden Leistungen > 1 h	0,5–1 g/kg KM/h (30–60 g/h)
Längerfristig auf den Alltag ausgerichtet:	
Täglicher Bedarf bei niedriger Leistungsintensität und niederem Leistungsumfang (< 1 h pro Tag)	5–7 g/kg KM/Tag
Täglicher Bedarf bei höheren Leistungsintensitäten und -umfängen im Ausdauersport (1–3 h mittel- bis hochintensive Leistung pro Tag)	7–10 g/kg KM/Tag
Täglicher Bedarf bei Höchstleistungen (> 4–5 h mittel- bis hochintensive Leistung pro Tag)	10–>12 g/kg KM/Tag

KM = Körpermasse h = Stunde(n)

Tabelle 2: Richtlinien der Kohlenhydratzufuhr für leistungsorientierte aktive Personen [28].

Neben der quantitativen Betrachtungsweise gilt es auch stoffwechselspezifische Aspekte in die Beurteilung der Kohlenhydrate miteinzubeziehen. Dabei gibt der glykämische Index (GI) eines Lebensmittels Auskunft über dessen Einfluss auf den Blutglucosegehalt im Vergleich zur Einnahme einer entsprechenden Referenzmenge an Glucose (oder Weissbrot) [6]. Ein Lebensmittel mit einem niedrigen GI verursacht keine starke Blutglucoseantwort, ein Lebensmittel mit einem hohen GI bewirkt dagegen eine starke Veränderung des Blutzuckerspiegels. Die frühere ernährungsphysiologische Einteilung in einfache und komplexe Kohlenhydrate und die darauf beruhende Aussage, einfache Kohlenhydrate würden rasch absorbiert (starke Blutglucoseantwort) und komplexe Kohlenhydrate dagegen nur langsam (keine starke Blutglucoseantwort), ist nicht haltbar. Kartoffeln und Reis, welche hauptsächlich aus komplexen Kohlenhydraten bestehen, müssten gemäss der früheren Meinung keine starke Blutglucoseantwort verursachen. Beide haben aber einen hohen GI (*Tabelle 3*). Zum GI muss noch erwähnt werden, dass er bei isolierter Einnahme des entsprechenden Lebensmittels bestimmt wird. Werden mehrere Lebensmittel gleichzeitig eingenommen, wie beispielsweise bei einer Mahlzeit, so lässt sich der GI der gesamten Mahlzeit aus den GI der einzelnen Lebensmittel mehr oder weniger proportional berechnen. In der Basisernährung im Zustand körperlicher Inaktivität ist die vorwiegende Einnahme von Lebensmitteln mit niedrigem bis moderatem GI bzw. die Vermeidung der isolierten Einnahme von Lebensmitteln mit hohem GI von grosser Bedeutung. Sie trägt zu einem konstanteren Glucose- und somit Insulinstoffwechsel bei, was langfristig Einfluss auf diverse Stoffwechsellaspekte haben kann. In *Tabelle 3* sind ausgewählte Lebensmittel mit ihrem glykämischen Index und mit der 50 Gramm Kohlenhydrate enthaltenden Menge aufgelistet. Während und direkt nach intensiven Leistungen (Regeneration) werden im Gegensatz zum Zustand der physischen Inaktivität sinnvollerweise Lebensmittel mit hohem GI eingesetzt [7].

Fett

Fett liefert etwa das 2.5-fache an Energie pro Masseneinheit verglichen mit Kohlenhydraten und Proteinen. Bei vielen inaktiven Personen ist nicht nur der Energieverbrauch niedriger als die Energieaufnahme, sondern es liegt parallel auch eine positive Fettbilanz vor. Dem Entstehen von Übergewicht sind somit die besten

Hoher glykämischer Index (> 70)		50 g Kohlenhydrate enthaltende Menge
Glucose	100	50 g
Sportgetränke	95	0,7 l
Reis, gekocht	88	170 g
Gebackene Kartoffeln	85	200–300 g
Honig	73	65 g
Brot	70	200 g
Mittlerer glykämischer Index (55 bis 70)		
Müsli	68	60 g
Soft Drinks	68	0,5 l
Saccharose	65	50 g
Mars	63	75 g, 1,5 Riegel
Tiefer glykämischer Index (< 55)		
Reife Banane	52	250 g, 2–3 Stück
Schokolade	49	80 g
Orange	43	400–600 g, 3–4 Stück
Teigwaren, gekocht	41	200 g
Apfel	36	400 g, 3–4 Stück
Unreife Banane	30	250 g, 2–3 Stück
Milch	27	1,1 l
Fructose	23	50 g

Table 3: Beispiele von Lebensmitteln, aufgelistet nach ihrem glykämischen Index [29].

Voraussetzungen gegeben. Auf der anderen Seite kann in vielen Sportarten eine ungenügende Energieaufnahme beobachtet werden (z.B. Ausdauer, Tanz, Kunstturnen, Gymnastik, Sportarten mit Gewichtslimiten), was langfristig zwingend mit gesundheitlichen Problemen einhergeht. Bei einer zu geringen Fettaufnahme (< 25 Energieprozent) ist die Zufuhr an essentiellen Fettsäuren nicht mehr sichergestellt. Es darf auch nicht vergessen werden, dass die Aufnahme der fettlöslichen Vitamine nur gewährleistet ist, wenn auch genügend Fett in der entsprechenden Mahlzeit vorhanden ist. Zusätzlich ist in über Tage dauernden Leistungsphasen (Training und Wettkampf) mit sehr hohen zeitlichen Belastungsumfängen die Energieaufnahme zeitlich und bezüglich Verträglichkeit (z.B. Nahrungsvolumen, Nahrungsfasern usw.) limitiert. Eine nur auf Kohlenhydrate fixierte Ernährungsweise kann in derartigen Situationen zu sehr hohen, nicht mehr ess- und verdaubaren Nahrungsmengen führen, während die Kombination einer bedarfsadäquaten Kohlenhydratmenge mit hochwertigen Fetten das Nahrungsvolumen reduziert und Wesentliches zu einer ausgeglichenen Energiebilanz (auch in Extremsituationen) beitragen kann. Die Empfehlungen für die Fettaufnahme liegen bei etwa 30% der gesamten Energieaufnahme oder ungefähr 1,5 Gramm pro Kilogramm Körpermasse in Abhängigkeit von der Sportart, dem Trainingsvolumen und der Leistungsintensität [8]. Gemäss dem Schweizerischen Ernährungsbericht betrug die durchschnittliche Fettaufnahme in der Schweiz etwa 35% [5] der gesamten Energiezufuhr. Auch bei der Fettzufuhr ist nicht nur die Quantität der Fette von grosser Bedeutung, sondern auch deren Qualität. So wird auch für aktive Personen empfohlen, in Relation zur Gesamtenergiezufuhr ein Verhältnis von etwa 10% gesättigten, 10% einfach ungesättigten und 10% mehrfach ungesättigten Fettsäuren anzustreben [9]. Zusätzlich wird versucht, über eine höhere Zufuhr von n-3-Fettsäuren (v.a. EPA, DHA) den Zellmembranstoffwechsel über diverse Veränderungen im Stoffwechsel der Gewebeshormone (Leukotriene, Prostaglandine, Thromboxane) aktiv zu modulieren. Ob sich allerdings eine den Bedarf übersteigende n-3-Fettsäurezufuhr über die potentiell antiaggregatorischen, vasodilatatorischen, antiinflammatorischen und immunmodulierenden Effekte direkt positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirkt, ist sehr fraglich [10–12].

Protein

Lange wurde dem Protein nur im Bereich des Kraftsports eine grosse Bedeutung zugesprochen. Heute ist jedoch klar anerkannt,

dass diese Ansicht nicht richtig ist [13]. Gegenüber physisch inaktiven Personen haben physisch Aktive praktisch aller Sportarten einen erhöhten Proteinbedarf (genau genommen ist es ein Bedarf an Stickstoff und essentiellen Aminosäuren). Der Proteinbedarf liegt sowohl im Kraft- wie auch im Ausdauersport bei etwa 1,5 Gramm je Kilogramm Körpermasse. Empfehlungen von über zwei Gramm je Kilogramm Körpermasse sind aus wissenschaftlicher Sicht nicht haltbar. Der erhöhte Proteinbedarf bedingt aber nicht zwangsläufig, dass Proteinpräparate eingenommen werden müssen. Einerseits liegt die Proteinaufnahme in der Schweiz bereits über den Empfehlungen [5] und andererseits wird durch die erhöhte Energieaufnahme bei einer ausgewogenen Ernährungsweise automatisch mehr Protein aufgenommen. Während physischer Aktivität kommt es zu einem Anstieg der Proteolyse, wobei die Herkunft des abgebauten Proteins noch unklar ist (vermutlich eher aus Splanchnikus und Leber als Muskulatur) [13]. In der Nachbelastungsphase steigt die Muskelproteinsynthese an. Unter der Voraussetzung, dass in dieser Phase ausreichend Nährstoffe zugeführt werden, geht man heute davon aus, dass die Muskelproteinsynthese den -abbau übersteigt, so dass gesamthaft eine positive Nettomuskelproteinbilanz vorliegt [14, 15]. Die unter Belastung metabolisierten Aminosäuren dienen nicht direkt der Energiegewinnung. Ihre Funktion ist eher im Abtransport von metabolischen Endprodukten (v.a. Ammoniak) und der Bereitstellung von intermediären Substanzen des Tricarbonsäurezyklus (Anaplerosis) zur Aufrechterhaltung des oxidativen Abbaus von Acetyl-CoA-Einheiten zu sehen [16]. Momentan grosse Beachtung findet eine gezielte Proteinzufuhr vor und nach einer physischen Leistung. Über eine erhöhte zelluläre Aminosäurenverfügbarkeit und Hyperinsulinämie kann sie zu einer Nettomuskelproteinakkumulation [15, 17, 18] führen und parallel dazu auch die Glykogenresynthese günstig beeinflussen. Allerdings scheint bei einer isoenergetischen Gabe von Kohlenhydraten allein oder in Kombination mit Protein keine verstärkte Glykogenresynthese einzusetzen, obwohl bei der Verabreichung von Kohlenhydrat-Eiweiss-Gemischen eine Hyperinsulinämie beobachtet wurde [19]. Zu hohe Eiweisszufuhren (> 2 g pro kg Körpermasse pro Tag) wirken aber calciuretisch, können die endogene Glutaminsynthese reduzieren und Hyperammonämien induzieren. Letztere werden als leistungsmindernd diskutiert [20]. Auch Aminosäuredysbalancen sind bei exzessiven Proteinzufuhren nicht auszuschliessen. Bei Nutztieren können solche Dysbalancen unter anderem zu Wachstumsstörungen führen [21].

Flüssigkeitszufuhr

Wasser ist der erstlimitierende Nährstoff jeder Ernährung und zudem der wichtigste leistungsbegrenzende Faktor bei einer physischen Aktivität. Bereits eine Dehydratation von ein bis zwei Prozent der Körpermasse kann die physische Leistungsfähigkeit messbar vermindern [22]. Bei einer etwa 70 kg schweren Person dürfte dieser Verlust bereits nach etwa einer Stunde «Sport» eintreffen (durchschnittlicher Schweißverlust etwa ein Liter pro Stunde).

Thermoregulation

Die Energiegewinnung aus den Nährstoffen ist ein energetisch ungünstiger Prozess. Nur etwa 20 bis 25% der chemischen Energie können in mechanische Energie umgewandelt werden. Aus den restlichen 75 bis 80% entsteht Wärme. Der Energieverbrauch für eine Stunde moderaten Joggings beträgt grob gesehen 3000 bis 4000 kJ. Davon werden etwa 2200 bis 3200 kJ als Wärme abgegeben. Werden dem Körper etwa 3,5 kJ pro kg Körpermasse zugeführt, so erhöht sich dessen Temperatur um etwa ein Grad Celsius, d.h. es sind etwa $70 \times 3,5 \text{ kJ} = 240 \text{ kJ}$ nötig, um bei einer 70 kg schweren Person die Temperatur um ein Grad anzuheben [23]. Eine Stunde Jogging würde somit die Temperatur um etwa 10 bis 15 Grad anheben, falls die Wärme nicht abgeführt würde. Das Verdunsten von Wasser ist ein sehr effizienter Kühlungsmechanismus. Beim Verdunsten von einem Liter Wasser werden dem Körper etwa 2400 kJ Energie (= Wärme) entzogen. Es müssen somit etwa 1 bis 1,5 l Schweiß von der Körperoberfläche verdunsten, um dem Körper die Menge an

Wärme zu entziehen, die ihm durch die Energiegewinnung während einer Stunde moderaten Joggings zugeführt wurde. Die Schweissrate ist somit eine Funktion der Wärmebildung. Sie beträgt im Durchschnitt etwa einen Liter pro Stunde. Neben der Verdunstung von Schweiß kann der Körper auch durch Abstrahlung, Leitung und Konvektion Wärme abgeben, doch sind diese Mechanismen unter Leistung weit weniger effektiv als die Verdunstung.

Flüssigkeitsbilanz

Der tägliche Wasserbedarf beträgt etwa 2 bis 3 Liter oder etwa 0.8 l pro 4 MJ aufgenommener Energie (Schweissverluste nicht berücksichtigt). Er wird in der Regel zu etwas mehr als der Hälfte durch die Einnahme von Getränken gedeckt (idealerweise Wasser, Mineralwasser, ungesüßter Tee oder verdünnte Fruchtsäfte). Der Rest stammt aus fester Nahrung sowie Oxidationswasser (Wasser, das bei Nährstoffoxidation entsteht). Zusätzlich zur basalen Aufnahme bedarf es einer Zufuhr von gegen 1.5 Liter Flüssigkeit pro Liter Schweißverlust, um die Flüssigkeitsbilanz ausgeglichen zu halten. Erfolgt eine physische Belastung unter extremen Klimabedingungen, können auch grosse Flüssigkeitsverluste durch die Atmung entstehen. In der Lunge wird die eingeatmete Luft mit Wasserdampf gesättigt, so dass schliesslich pro Kubikmeter ausgeatmeter Luft 45 Gramm Wasser verloren gehen. Bei kalter oder heisser trockener Umgebungsluft verdunsten somit etwa 0.2 bis 0.3 l pro Stunde moderater physischer Aktivität. Bei einer langen Bergtour können demnach etwa 2 bis 3 Liter Wasserdampf über die Lunge verloren gehen.

Kohlenhydrat-Elektrolytgetränke

In Abhängigkeit von der Belastungsdauer und -intensität, klimatischen Verhältnissen und individuellen Faktoren (Verträglichkeit, Schweißverluste) können unterschiedlichste Kohlenhydrat-Elektrolytvarianten für physisch aktive, leistungsorientiert Sport treibende Personen empfohlen werden. In einem solchen Getränk ist der Zusatz der Elektrolyte (Natrium, eventuell Kalium) sinnvoll.

Aus *Tabelle 4* wird ersichtlich, wie derartige Getränke situationspezifisch zusammengesetzt sein sollten. Allerdings bleibt zu erwähnen, dass über die Zufuhr von Kohlenhydrat-Elektrolytgetränken während und nach Leistungen nicht nur die Gefahr direkt leistungslimitierender Faktoren wie Dehydratation, Hypoglykämie und Hyponatriämie reduziert, sondern auch über erhöhte Glucose- und Insulinspiegel sowie reduzierte Cortisolspiegel und Entzündungsmediatoren die Regeneration positiv beeinflusst werden kann [24].

Regeneration

Die Regeneration dient physiologisch gesehen der Adaptation an die vorausgegangene Belastungsphase. Im weiteren Sinn bedeutet Regeneration Restabilisierung belastungsadaptierter Systeme hin zur Homöostase (z.B. Hormon-, Immunsystem) in Ruhe, Wiederauffüllen der Energieträger (Glykogen, intramyozelluläre Triglyzeride), Wiederaufbau beschädigter funktioneller Strukturen, Rehydratation usw. Leider wird unter Regeneration allzu häufig nur die Regeneration der Glykogenspeicher verstanden. Aus *Abbildung 2* ist ersichtlich, dass die Glykogendepletion sehr stark von der Leistungsintensität und Leistungsdauer abhängt. Hochintensiv Belastungen (< 1 Stunde) vermögen die Glykogenspeicher auf unter 30% des Ausgangswertes zu reduzieren. Demgegenüber kann die Regeneration dieser stark entleerten Glykogenspeicher v.a. in Abhängigkeit von der sofortigen Kohlenhydratzufuhr und den adäquaten Kohlenhydratmengen (ca. 10 g pro Kilogramm Körpermasse) und vielen weiteren Faktoren (*Tabelle 5*) im optimalen Fall in 24 Stunden abgeschlossen sein. Wie oben erwähnt, darf aber neben der nur auf das Glykogen fokussierten Sichtweise künftig nicht vergessen werden, dass beispielsweise eine gezielte Rehydratation, eine gezielte Vor-/Nachleistungsproteinaufnahme zur gezielten Modulation der Proteinsynthese (Hyperinsulinämie,

Intensität: Leistungsdauer:	80–130% VO ₂ max < 1h	60–90% VO ₂ max >1 h < 3 h	30–70 % VO ₂ max > 3 h
a) Prähydratation*			
– Kohlenhydratgehalt	0% bis 6–10%		6–10%
– Kohlenhydratart	Glucosepolymere (Glu, Saccharose)		Glucosepolymere (Glu, Saccharose)
– Elektrolyte	–		–
– Einnahmemenge	300–500 ml		300–500 ml
– Einnahmezeitpunkt	Minuten vor der Leistung in aufgewärmtem Zustand		Minuten vor der Leistung in aufgewärmtem Zustand
b) Hydratation*			
– Kohlenhydratgehalt	Wasser		6–8%
– Kohlenhydratart	Wasser		Glucosepolymere (Glu, Saccharose)
– Elektrolyte	–		1–1.5 g NaCl·l ⁻¹
– Einnahmemenge/h	500–1000 ml		500–1000 ml
– Einnahmezeitpunkt	verteilt auf ca. 5 Einnahmen		verteilt auf ca. 5 Einnahmen
– Osmolalität	< 300 mmol·kg ⁻¹		< 300 mmol·kg ⁻¹
c) Rehydratation, Glykogenresynthese Regeneration			
– Kohlenhydratgehalt		6–10%	
– Kohlenhydratart		Glu, Saccharose, Glucosepolymere (Minimalmenge 25 g·h ⁻¹)	
– Elektrolyte		ca. 1–1.5 g NaCl·l ⁻¹ (+ eventuell K)	
– Einnahmemenge		in Abhängigkeit von Rehydratation	
– Einnahmezeitpunkt		sofort nach der Leistung beginnen	
– Osmolalität		< 300 mmol·kg ⁻¹	

* Im Bereich Spitzensport werden bei intensiven Leistungen unterhalb 1 Stunde weit geringere Flüssigkeits- und Kohlenhydratmengen eingenommen als in der Literatur empfohlen.

Tabelle 4: Kohlenhydrat-Elektrolytgetränke: Anwendung, Dosierung (9;24)

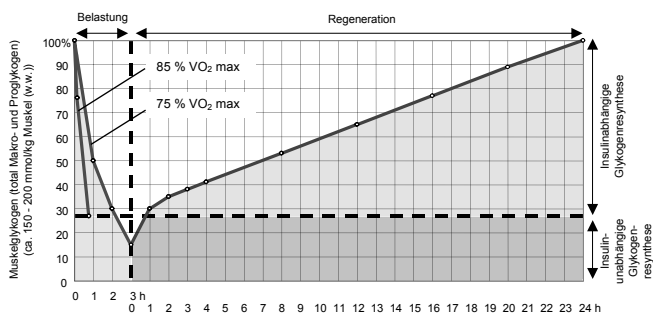


Abbildung 2: Glykogenepletion und hypothetischer Verlauf der Regeneration unter optimalen Ernährungsbedingungen^{1) 2)} (adaptiert nach [31–37]).

- 1) 1–1.5 g Kohlenhydrate (Glucose, niederosmolare Glucose-Polymere, Saccharose²⁾, Fruktose³⁾) pro kg Körpermasse möglichst schnell nach Belastung und alle 2 h bis ca. 6 h nach Belastung, eventuell in Kombination mit ca. 0.3 g Protein pro kg Körpermasse, in den 24 h nach Belastung > 600 g Kohlenhydrate.
- 2) Fruktose eventuell entscheidend zur optimalen Regeneration vom Leberglykogen.

Hyperaminoacidämie) und eventuell sogar die gezielte Zufuhr von Fetten zur Auffüllung der intramyozellulären Triglyzeride [25, 26] sowie von Mikronährstoffen die Gesamtkörperregeneration positiv beeinflussen können.

Schlussbemerkung

Die oben aufgeführten Grundlagen der Energie-, Makronährstoff- und Flüssigkeitszufuhr sollen als Basis zur Zusammenstellung von Menüplänen für physisch sehr aktive Personen dienen, die täglich einmal oder mehrmals trainieren. Diese Grundlagen beeinflussen leistungslimitierende Faktoren direkt und sollen sinnvollerwei-

Resyntheserate steigernd

1. Entleerte Speicher - je höher der Entleerungsgrad, desto rascher die Wiedereinlagerung
2. Unmittelbare Kohlenhydrataufnahme nach Belastungsende 3. Adäquate Kohlenhydratmengen:
 - a) 1–1.5 g · kg⁻¹ Körpermasse (KM) sofort nach Belastung
 - b) 7–10 g · kg⁻¹ KM pro 24 h
 - c) Einnahme von kohlenhydratreichen Lebensmitteln mit hohem glykämischen Index (flüssig + fest)

Resyntheserate kaum beeinflussend

- Leichtes Training während Erholungsphase
- Zeitliche Verteilung und Häufigkeit von Mahlzeiten oder Snacks (vorausgesetzt, die gesamte Kohlenhydratmenge ist ausreichend)
- Protein- oder fettreiche Lebensmittel (vorausgesetzt, die gesamte Kohlenhydratmenge ist ausreichend)

Resyntheserate verzögernd

- Muskelschaden (verursacht durch exzentrische Belastung)
- Kohlenhydrataufnahme nicht unmittelbar nach Belastungsende beginnend
- Aufnahme unzureichender Kohlenhydratmenge
- Aufnahme von Lebensmittel mit vorwiegend niedrigem glykämischen Index
- Intensives Training während Erholungsphase

Tabelle 5: Die Muskelglykogenresynthese beeinflussende Faktoren (30)

se als Eckpfeiler erkannt und in der Basisernährung umgesetzt werden. Allerdings nützt die alleinige Umsetzung dieser Grundlagen wenig, wenn nicht auch weitere Aspekte wie Nahrungspräferenzen, individuelle Verträglichkeit (z.B. gastrointestinale Probleme), zeitliche Umsetzbarkeit und psychosoziales Wohlbefinden berücksichtigt werden. Bei allem Respekt den oben aufgeführten Grundlagen gegenüber entspricht die leistungs- und situations-adaptierte Ernährung jedoch nur einem Steinchen im Gesamtmosaik der körperlichen Leistungsfähigkeit...

Korrespondenzadresse:

Christof Mannhart, Ernährungswissenschaftler, Sportwissenschaftliches Institut, Bundesamt für Sport, CH-2532 Magglingen, Tel. 032 327 64 57, E-Mail: christof.mannhart@baspo.admin.ch

Literaturverzeichnis

- 1 SVE.: Schweizer Lebensmittelpyramide – Empfehlungen für Erwachsene. Hrsg. Schweizerische Vereinigung für Ernährung Bern, 1999.
- 2 McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L.: Exercise physiology. 102. Baltimore, Williams & Wilkins.
- 3 Hawley J.A., Hopkins W.G.: Aerobic glycolytic and aerobic lipolytic power systems. A new paradigm with implications for endurance and ultraendurance events. Sports Med. 19: 240–250, 1995.
- 4 Romijn J.A., Coyle E.F., Sidossis L.S., Gastaldelli A., Horowitz J. F., Endert E., Wolfe R.R.: Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. Am. J. Physiol. 265: E380–391, 1993.
- 5 BAG.: Vierter Schweizerischer Ernährungsbericht. Bern, EDMZ, 1998.
- 6 Jenkins D.J., Wolever T.M., Taylor R.H., Barker H., Fielden H., Baldwin J.M., Bowling A.C., Newman H.C., Jenkins A.L., Goff D.V.: Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. Am. J. Clin. Nutr. 34: 362–366, 1981.
- 7 Walton P., Rhodes E.C.: Glycaemic index and optimal performance. Sports Med. 23: 164–172, 1997.
- 8 Miller S.L., Wolfe R. R.: Physical exercise as a modulator of adaptation to low and high carbohydrate and low and high fat intakes. Eur. J. Clin. Nutr. 53 Suppl. 1: S112–119, 1999.
- 9 Joint Position Statement: nutrition and athletic performance. American College of Sports Medicine, American Dietetic Association, and Dietitians of Canada. Med. Sci. Sports. Exerc. 32: 2130–2145, 2000.
- 10 Toft A.D., Thorn M., Ostrowski K., Asp S., Moller K., Iversen S., Hermann C., Sondergaard S.R., Pedersen B.K.: N-3 polyunsaturated fatty acids do not affect cytokine response to strenuous exercise. J. Appl. Physiol. 89: 2401–2406, 2000.
- 11 Ayre K.J., Hulbert A. J.: Dietary fatty acid profile affects endurance in rats. Lipids 32: 1265–1270, 1997.
- 12 Oostenbrug G.S., Mensink R.P., Hardeman M.R., De Vries T., Brouns F., Hornstra G.: Exercise performance, red blood cell deformability, and lipid peroxidation: effects of fish oil and vitamin E. J. Appl. Physiol. 83: 746–752, 1997.
- 13 Hargreaves M.H., Snow R.: Amino acids and endurance exercise. Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 11: 133–145, 2001.
- 14 Viru A.: Postexercise recovery period: carbohydrate and protein metabolism. Scand. J. Med. Sci. Sports 6: 2–14, 1996.
- 15 Tipton K.D., Wolfe R.R.: Exercise, protein metabolism, and muscle growth. Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 11: 109–132, 2001.
- 16 Wagenmakers A. J.: Muscle amino acid metabolism at rest and during exercise: role in human physiology and metabolism. Exerc. Sport Sci. Rev. 26: 287–314, 1998.
- 17 Rennie M.J., Tipton K.D.: Protein and amino acid metabolism during and after exercise and the effects of nutrition. Annu. Rev. Nutr. 20: 457–483, 2000.
- 18 Tipton K.D., Rasmussen B.B., Miller S.L., Wolf S.E., Owens-Stovall S.K., Petrini B.E., Wolfe R.R.: Timing of amino acid-carbohydrate ingestion alters anabolic response of muscle to resistance exercise. Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 281: E197–206, 2001.
- 19 Jentjens R.L., van Loon L.J., Mann C.H., Wagenmakers A.J., Jeukendrup A.E.: Addition of protein and amino acids to carbohydrates does not enhance postexercise muscle glycogen synthesis. J. Appl. Physiol.

- 91: 839–846, 2001.
- 20 *Banister E.W., Cameron B.J.*: Exercise-induced hyperammonemia: peripheral and central effects. *Int. J. Sports Med.* 11 Suppl. 2: 129–142, 1990.
- 21 *Harper A. E.*: Amino acid toxicities and imbalances. In: Munro, H. N. and Allison, J. B. *Mammalian protein metabolism (Volume II)*. 87–134. 1964. New York, Academic Press.
- 22 *Sawka M.N., Pandolf, K.B.*: Effects of body water loss on physiological function and exercise performance. In: Gisolfi, C. V. and Lamb, D. R. *Perspectives in exercise science and sports medicine. Fluid homeostasis during exercise*. 1–30. 1990. Carmel, Cooper Publishing Group.
- 23 *Williams M. H.*: Ernährung, Fitness und Sport. Ullstein Mosby Verlag, 1997.
- 24 *Mannhart C., Kamber M.*: Supplementguide. Hrsg. Eidgenössische Sportschule Magglingen, 1998.
- 25 *Decombaz J., Schmitt B., Ith M., Decarli B., Diem P., Kreis R., Hoppeler H., Boesch C.*: Postexercise fat intake repletes intramyocellular lipids but no faster in trained than in sedentary subjects. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 281: R760–769, 2001.
- 26 *Decombaz J., Fleith M., Hoppeler H., Kreis R., Boesch C.*: Effect of diet on the replenishment of intramyocellular lipids after exercise. *Eur. J. Nutr.* 39: 244–247, 2000.
- 27 *Burke L.*: Preparation for competition. In: Burke, L. and Deakin, V. *Clinical sports nutrition*. 342. 2000. Australia, McGraw-Hill Book Company.
- 28 *Burke L.M., Cox G.R., Culmings N.K., Desbrow B.*: Guidelines for daily carbohydrate intake: do athletes achieve them? *Sports Med.* 31: 267–299, 2001.
- 29 *Foster-Powell K., Miller J. B.*: International tables of glycemic index. *Am. J. Clin. Nutr.* 62: 871S–890S, 1995.
- 30 *Burke L.*: Nutrition for recovery after competition and training. In: Burke, L. and Deakin, V. *Clinical sports nutrition*. 399. 2000. Australia, McGraw-Hill Book Company.
- 31 *Ivy J. L.*: Role of carbohydrate in physical activity. *Clin. Sports Med.* 18: 469–484, v, 1999.
- 32 *Costill D. L.*: Carbohydrates for exercise: dietary demands for optimal performance. *Int. J. Sports Med.* 9: 1–18, 1988.
- 33 *Graham T.E., Adamo K.B., Shearer J., Marchand I., Saltin B.*: Pro- and macroglycogenolysis: relationship with exercise intensity and duration. *J. Appl. Physiol.* 90: 873–879, 2001.
- 34 *Price T.B., Rothman D.L., Taylor R., Avison M.J., Shulman G.I., Shulman R.G.*: Human muscle glycogen resynthesis after exercise: insulin-dependent and -independent phases. *J. Appl. Physiol.* 76: 104–111, 1994.
- 35 *Ivy J. L.*: Optimization of glycogen stores. In: Maughan, R. J. *Nutrition in sport*. 97ff. 2000. Blackwell-Science.
- 36 *Ivy J.L.*: Glycogen resynthesis after exercise: effect of carbohydrate intake. *Int. J. Sports Med.* 19 Suppl. 2: S142–145, 1998.
- 37 *Casey A., Mann R., Banister K., Fox J., Morris P.G., Macdonald I.A., Greenhaff P.L.*: Effect of carbohydrate ingestion on glycogen resynthesis in human liver and skeletal muscle, measured by (^{13}C) MRS. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 278: E65–75, 2000.
-