

# Metabolisches Training

Variation der Ernährung als Basis einer metabolischen Adaption zur Steigerung der muskulären Leistungsfähigkeit

**Dr. rer. nat. Johannes F. Coy,**

**Biologe und Vorstand der TAVARLIN AG, Darmstadt**

**Dr. med. Thomas May, Praxis Dr. May, Seelbach**

**Die Leistungsfähigkeit von Sportler(inne)n wird durch ein komplexes Zusammenspiel von exogenen und endogenen Faktoren bedingt. Eine der wichtigsten exogenen Faktoren ist das Training, das sowohl physische Eigenschaften wie Kraft und Schnelligkeit beeinflusst als auch den Metabolismus verändert und so die metabolische Adaption an erhöhte Anforderungen möglich macht.**

Die metabolische Adaption betrifft dabei unterschiedliche Bereiche wie Maximalleistung im aeroben und anaeroben Bereich und auch Anpassung an die Ausdauerleistung des Stoffwechsels. Sowohl die Maximalleistung als auch die Ausdauerleistung werden durch multiple Parameter beeinflusst. Da die Grundlagen der Energiefreisetzung im Menschen, genau wie in allen anderen Lebewesen, durch thermodynamische und biochemische Prozesse vorgegeben sind, kann man dieses Wissen im Training berücksichtigen, um eine maximale Leistung zu ermöglichen. Durch Variation der Ernährung in Hinsicht auf deren Zusammensetzung und die aufgenommene Kalorienmenge lassen sich dabei die beiden grundsätzlich möglichen Wege der Energiefreisetzung als Basis der muskulären Leistung gezielt beeinflussen.

## Die zwei Wege der Energiefreisetzung

Dem Menschen stehen aufgrund der vorhandenen Stoffwechselwege prinzipiell zwei Möglichkeiten der Energiefreisetzung zur Verfügung: der aerobe (sauerstoffabhängige) und der anaerobe (sauerstoffunabhängige) Weg. Während die aerobe Energiefreisetzung mit Hilfe der Mitochondrien durch den Prozess der oxidativen Phosphorylierung von der Verfügbarkeit von Sauerstoff abhängig ist, bietet die anaerobe Energiefreisetzung (Vergärung) die Möglichkeit, auch bei Abwesenheit von Sauerstoff Energie freizusetzen. In Abhängigkeit von der Sportart kommt es daher zu einer unterschiedlichen Nutzung der beiden Wege zur Energiefreisetzung. So hat z.B. ein 400-Meter-Läufer einen kurzfristig enorm hohen Energiebedarf, der auch auf Kosten einer Produktion von Milchsäure (Laktat) durch einen hohen Beitrag an anaerober Energiefreisetzung generiert werden kann. Ein Langstreckenläufer dagegen kann diese Strategie der anaeroben Energiefreisetzung nicht wählen, da die metabolische Belastung durch das gebildete Laktat auf Dauer zu hoch ist und zudem nicht genügend Glukose als Substrat der Vergärung verfügbar ist.

## Die anaerobe Energiebereitstellung als Überlebensprogramm

Da nur Metaboliten des Kohlenhydratstoffwechsels für eine Energiefreisetzung ohne Sauerstoff nutzbar sind, spielen Kohlenhydrate als Bestandteil der Ernährung von Sportlern traditionell eine wichtige Rolle. Die anaerobe Energiefreisetzung lässt sich mittels der Messung des Endproduktes, dem Laktat, im Blut auf einfache Weise bestimmen. Die Vergärung als Form der Energiefreisetzung ist auch dann noch möglich, wenn kein Sauerstoff mehr für eine Energiefreisetzung mittels einer Verbrennung von Wasserstoff in den Mitochondrien vorhanden ist. Mit der Vergärung von Glukose kann kurzfristig auf Kosten einer Laktatproduktion Energie freigesetzt werden. Bei unseren Jäger- und Sammlervorfahren war dies ein entscheidender Überlebensvorteil in Kampf- und Fluchtsituationen, um kurzfristig mehr Energie bereitstellen zu können. Das Umschalten auf die Kohlenhydratverbrennung erfolgt dabei innerhalb von Sekunden und die Leistungsfähigkeit dieses Systems, bezogen auf die Bereitstellung von Energieträgern (ATP  $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), ist etwa doppelt so effektiv wie das der oxidativen Energiebereitstellung. Ein weiterer Vorteil der Kohlenhydratverbrennung im Wettkampf oder in der Fluchtreaktion ist die Tatsache, dass pro Liter Sauerstoff ca. 10% mehr Energie ( $5,05 \text{ kcal/Liter O}_2$  vs.  $4,48 \text{ kcal/Liter O}_2$ ) freigesetzt werden. Dieses Überlebensprogramm ist auch heute noch immer in uns aktivierbar. Die Ausschüttung des Stresshormons Adrenalin aktiviert den Abbau der Glykogenspeicher, wodurch Glukose bereitgestellt wird, die sowohl für die Verbrennung als auch für die Vergärung als Substrat genutzt werden kann. Glukose ist damit im Vergleich zu Fettsäuren und ketogenen Aminosäuren ein Substrat, das für eine duale Energieproduktion genutzt werden kann. Adrenalin führt des Weiteren zu einer Umverteilung des Blutflusses weg vom Verdauungstrakt hin zu den Skelettmuskeln, so dass die muskuläre Leistungsfähigkeit erhöht wird. Innerhalb der Zelle wird das Adrenalin-Signal über zyklisches AMP (cAMP) in zelluläre und biochemische Prozesse übersetzt. Naturstoffe wie das Koffein (Trimethylxanthin) greifen in diesen Prozess ein, indem die Abbaurate von cAMP verlängert wird und Adrenalin eine höhere und länger andauernde Wirkung hat. Der damit einhergehende stärkere und schnellere Abbau der Glykogenspeicher

kann dann allerdings in Abhängigkeit von der Sportart auch zu Nachteilen führen, insbesondere dann, wenn es sich um Ausdauersportarten handelt. Bei Sportarten mit einem großen Einfluss der kognitiven Fähigkeiten sollte man auch berücksichtigen, dass Adrenalin eine Aktivierung von evolutionär alten und angeborenen Verhaltensmustern zu Lasten von vom Großhirn gesteuerten Verhaltensmustern induziert, was zwar in Kampf- und Fluchtreaktionen sinnvoll war, aber in Sportarten mit einem hohen Anteil an Großhirnaktivitäten negativ ist.

## Ausdauerleistung und die Bedeutung von Laktat

Da die Vergärung als zusätzliche Möglichkeit der Energiefreisetzung ohne Sauerstoff nur kurzfristig eine höhere muskuläre Leistungsfähigkeit erlaubt, nimmt deren Bedeutung in Abhängigkeit der Dauer der muskulären Belastung ab. Bei mittel- und langfristig andauernder muskulärer Belastung stellt die Vergärung ab einem Schwellenbereich keine Alternative dar, weil die Produktion von Laktat und  $\text{H}^+$  Ionen auf Dauer zu hoch wird und es zu einer Übersäuerung des Blutes kommt. Laktat, das quasi als Stoffwechselmetabolit in Skelettmuskeln produziert und ins Blut abgegeben wird, kann allerdings von anderen Geweben wie dem Herzmuskel als Substrat für die Verbrennung in den Mitochondrien genutzt werden. Laktat wird somit zu einer bedeutenden Kohlenhydratquelle und konkurriert mit der Glukose als Substrat, die für andere Gewebe, z. B. die Nervenzellen eingespart werden kann. Da der Herzmuskel aufgrund der Nähe zur Lunge und der damit sehr guten Sauerstoffversorgung bei seiner Energiefreisetzung nicht Sauerstofflimitiert ist, ergänzen sich Herz- und Skelettmuskel ideal, da der Herzmuskel durch Nutzung des energiereichen Laktats dem Laktatanstieg und der damit verbundenen Übersäuerung des Blutes entgegenwirkt. Bei ansteigender Belastung und somit ansteigender Blut-Laktatkonzentration werden bis zu 60% des Energiebedarfs des Herzens über Laktat gedeckt. Laktat kann aber auch von den Skelettmuskeln selbst aufgenommen und oxidativ in Energie umgewandelt werden. Es findet ein Laktatfluss von glykolytischen Fasern zu oxidativen Fasern statt, der durch einen Konzentrationsgradient zwischen den Fasern bestimmt wird. Dieser Gradient wird durch verschiedene Faktoren im Muskel beeinflusst (Durchblutung, LDH-Aktivität und deren Isoform, pH-Gradient, Laktatproduktionsraten und Laktateliminationsraten der einzelnen Fasertypen). Dadurch können von dem unter Belastung gebildeten Laktat 55 bis 70% im Muskel wieder oxidiert werden. Diese Effekte der Laktatutilisation werden durch körperliches Training optimiert und können indirekt über Veränderungen in der Laktat-Leistungskurve dargestellt werden.

Neben dem Laktat, das auch von langsamen Muskelfasern und dem Herzen als Energiequelle genutzt wird, wird dieses auch zur Neusynthese von Glukose in der Leber verwendet, wodurch zum einen wieder dem Anstieg der Laktatkonzentration im Blut entgegengewirkt wird und vor allem auch aus Laktat Glukose gebildet werden kann, die dann wiederum sowohl für die Verbrennung als auch für die Vergärung im Skelettmuskel verwendet werden kann.

## Glukoseaufnahme und Glukoneogenese

Eine Glukose Neubildung, die auch als Glukoneogenese bezeichnet wird, erleichtert auch die Wiederauffüllung der Glukosespeicher in Form des



Glykogens, wodurch später folgende Phasen der aeroben und anaeroben Energiefreisetzung erleichtert werden. In Sportarten mit Spielphasen mit geringerer Muskelbelastung, die eine Bildung von Glykogen möglich machen, können somit mit der Glukoneogenese spätere hohe Muskelbelastungen insbesondere im anaeroben Bereich wie Sprints wieder besser durchgeführt werden. Das Ausmaß der Glukoneogenese ist von verschiedenen Enzymen und der von ihnen durchgeführten biochemischen Reaktionen abhängig. Die Bildung der Enzyme wird in starkem Maße von deren Bedarf gesteuert. Dies erlaubt eine Anpassung des Stoffwechsels an aktuell notwendige Situationen. Wird konstant viel Zucker in Form von Glukose oder Stärke aufgenommen, kann Glukose ständig für die Bildung von Glykogen als Speicherform der Glukose verwendet werden. In dieser Situation des Glukoseüberschusses besteht keine Notwendigkeit, Glukose aus Aminosäuren zu synthetisieren. Für unsere Vorfahren war diese Form der Regulation von großem Vorteil. Da die Glukose Neubildung mit einem erheblichen Aufwand von Energie verbunden ist, konnte diese vermieden werden, wenn genug Glukose durch die Nahrung aufgenommen wurde. Erst bei einer Einschränkung des Kohlenhydratanteils in der Nahrung oder einer Einschränkung der Menge an aufgenommenen Kalorien werden die Enzyme der Glukoneogenese induziert, wodurch die Glukosebildung einsetzt. Aufgrund dessen ist es möglich, mit der Zusammensetzung der Nahrung und auch durch die Einschränkung der aufgenommenen Kalorienmenge die Bildung der Enzyme zur Glukoneogenese anzuschalten. Eine konstant hohe Menge an aufgenommenen Kohlenhydraten verhindert dagegen die Bildung der Enzyme der Glukoneogenese, da in diesem Falle genügend Glukosemoleküle vorhanden sind.

### Die Bedeutung der Glykogenspeicher

Ein Training mit vollen Glykogenspeichern hat im Vergleich zu einem Training mit leeren Glykogenspeichern große Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Sportler(inne)n im Wettkampf. Fast bei allen Sportarten kommt es im Wettkampf zu einer Depletion der Glykogenspeicher. Der Zeitpunkt der Depletion hat eine große Bedeutung, weil leere Glykogenspeicher eine spätere Leistung im aeroben, aber insbesondere im anaeroben Bereich extrem erschweren. Glykogenspeicher stellen eine Form von Energiespeicher dar, die Maximalleistungen möglich machen, wie z.B. Sprints gegen Ende eines Spieles. Mit einem frühzeitigen Verbrauch der Glykogenspeicher verspielt man dagegen diese zusätzliche, auch im anaeroben Bereich abrufbare Energie- und Leistungsreserve. Die Reduktion der Glykogenspeicher wird zum einen durch die Abbaurate und zum anderen durch die Auffüllreaktion in Form der Glukoneogenese bestimmt. Glykogenspeicher bestehen normalerweise aus Glukosemolekülen. Man konnte allerdings zeigen, dass beim Vorhandensein von Galaktose auch dieses Monosaccharid neben Glukose in die Glykogenspeicher eingebaut wird. Hierdurch wird einerseits der spätere Glykogenabbau verzögert und andererseits der protektive Zucker Galaktose für die Entgiftung von Ammoniak in einer Phase des akuten Energiebedarfes freigesetzt. Da es in einer Situation des Energiemangels auch zur Nutzung von Aminosäuren für die Freisetzung von Energie kommen kann, werden in diesem Fall Aminogruppen freigesetzt, da diese nicht für eine Energiegewinnung genutzt werden können. Damit führt die Verwendung von Aminosäuren als Energiequelle

zu potentiell toxischen Metaboliten. Eine elegante und effektive Weise der Entgiftung der dann freigesetzten Aminogruppe besteht in der Übertragung der Aminogruppe auf Galaktose, wodurch eine Aminosäure gebildet wird. Damit stellt die Freisetzung von Galaktose aus Glykogenspeichern genau in der Phase eines erhöhten Energiebedarfes, bei dem es auch zu einer Nutzung von Aminosäuren zur Energieproduktion kommen kann, eine clevere Möglichkeit dar, wie eine Zelle sich schützen kann. Ein langsamer Glykogenabbau sowie eine gute Glukoneogenese führen zu besser gefüllten Glykogenspeichern gegen Ende eines Wettkampfes. Verbessert wird dies durch Glykogenspeicher, bei denen auch Galaktose eingebaut ist, da diese Galaktose enthaltenden Glykogenspeicher verzögert abgebaut werden.

### Gefüllte Glykogenspeicher als Trumpfkarte bei einigen Sportarten

Die Wichtigkeit von gefüllten Glykogenspeichern gegen Ende eines Wettkampfes variiert in Abhängigkeit von der Sportart und von der gewählten Strategie in der jeweiligen Sportart. Schwimmer etwa können die Geschwindigkeit so auswählen, dass die Glykogenspeicher am Ende des Wettkampfes vollständig aufgebraucht sind. Im Fußball oder Hockey ist dies dagegen schwerer möglich, da es nicht klar ist, wie hoch der Energiebedarf während des Spieles und speziell am Ende des Spieles ist. So könnte man eine Strategie im Fußball wählen, die während der letzten 15 Minuten einen erhöhten Energiebedarf auslöst, indem das Pressing oder das Tempo des eigenen Spieles in den letzten 15 Minuten deutlich erhöht wird. Die gegnerische Mannschaft hätte im Falle von aufgebrauchten Glykogenspeichern keine Energie- und Leistungsdepots, um dann insbesondere im anaeroben Bereich mithalten zu können. Die Bedeutung der Glykogenspeicher zeigt sich durch die Tatsache, dass bei hohen Belastungsintensitäten (Glykolyse über 2 g/min) die Zuckerbereitstellung nur über Entleerung der Glykogenspeicher erfolgen kann. Dadurch haben Sportler mit besser gefüllten Glykogenspeichern, z. B. am Spielende einen Vorteil, da sie körperliche Spitzenleistungen noch abrufen können und im entscheidenden Moment schneller sind. Die eingesparte Blutglukose steht zudem für andere Gewebe, z.B. Nervenzellen und Gehirn zur Verfügung, was die kognitive Leistung der Sportler in diesen Spielphasen erhöht. Viele spielentscheidende Tore gegen Ende eines Fußballspieles können auch als Indiz für eine in dieser Hinsicht bessere metabolische Fitness als Basis für diesen Erfolg gewertet werden. In Sportarten wie Fußball oder Hockey, in denen die erbrachte muskuläre Arbeit pro Zeiteinheit (muskuläre Leistung) stark variiert, spielt die Fähigkeit zur phasenweisen starken Energiefreisetzung im anaeroben Bereich eine wichtige, wenn nicht gar eine entscheidende Rolle. Die Basis für phasenweise hohe Energieleistungen im anaeroben Bereich während des Wettkampfes wird durch das Vorhandensein von Glykogenspeichern entscheidend mitbestimmt. Die Glykogenabbau- und die -neubildungsrate werden auch durch die Leistungsfähigkeit im aeroben Bereich bestimmt, da ein schnellerer Übergang vom aeroben in den anaeroben Bereich einen Glykogenabbau auslöst, weil nur Glukose für eine anaerobe Energiefreisetzung nutzbar ist. Das Ausmaß der oxidativen Energiefreisetzung durch Nutzung von Fettsäuren, Glukose oder Laktat ist entscheidend für den Wechsel von aerober zu anaerober Energiefreisetzung. Je später

diese Schwelle überschritten wird, desto länger kann ein Sportler im aeroben Bereich Leistung bringen, wodurch es gleichzeitig auch möglich ist, Glykogenspeicher zu schonen, die für später eventuell notwendige Leistungsspitzen im anaeroben Bereich benötigt werden.

### **Gezielte Ernährung und richtiges Training für eine optimale Glukoneogenese**

Da Sportarten wie Fußball oder Hockey sehr stark von phasenweise erbrachten Leistungsspitzen im anaeroben Bereich abhängen, ist es sinnvoll, für diese Sportarten ein Training durchzuführen, das eine Optimierung sowohl der aeroben als auch der anaeroben Energiefreisetzung möglich macht. Dies kann nur durch eine Kombination und eine Interaktion aus muskulärem und metabolischem Training erreicht werden. Die Wirkung von aeroben wie auch anaeroben Trainingseinheiten auf die Leistungsfähigkeit kann gezielt durch die Ernährung beeinflusst werden. Bei einer phasenweisen Einschränkung der aufgenommenen Menge an Kohlenhydraten kann hierdurch eine Stoffwechsellage induziert werden, bei der aus der Nahrung aus bestimmten Aminosäuren (glukogene Aminosäuren) und dem Glycerinanteil der Fette mittels der Glukoneogenese Glukose gebildet wird. Damit kann man die Glukoneogenesefähigkeit trainieren. Bei einer zeitweisen Einschränkung der aufgenommenen Menge an Kalorien kann auch ohne die relative Einschränkung der Kohlenhydrate eine Stoffwechselsituation erzeugt werden, die zur Glukoneogenese führt. Da dies jedoch schließlich zum Abbau und zur Verwendung von glukogenen Aminosäuren aus dem Muskelgewebe und zur Verwendung dieser für die Energiefreisetzung wie auch zur möglichen Glukoneogenese führt, muss das Mittel der Einschränkung der Kalorienzufuhr sorgsam eingesetzt werden. Durch geeignetes Training ist es zudem möglich, das Training der Glukoneogenese mit dem Training der oxidativen Energiefreisetzung zu kombinieren. Ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel hierfür ist die Messung der Bildung von Ketonkörpern. Durch Urin- oder Bluttests kann man diese nachweisen und damit überprüfen, ob die Glykogenspeicher geleert sind und der Stoffwechsel sich in der Fettverbrennung befindet. Durch ein moderates aerobes Training im Zustand von geleerten Glykogenspeichern kann man dann sowohl die Glukoneogenesekapazität trainieren als auch diejenigen Enzyme und Stoffwechselprozesse induzieren, die an der Energiefreisetzung mittels aerobem Stoffwechsel beteiligt sind. Es ist bekannt, dass durch ein konsequentes Ausdauertraining über 24 Monate folgende Adaptionen der Muskulatur erreicht werden können: Erhöhung der Querschnittsgröße der ST-Fasern, Erhöhung der muskulären Kapillarendichte (40%), Umwandlung von FTb- zu FTa-Muskelfasern, Vermehrung der Mitochondrienzahl, die mit einer deutlichen Erhöhung der Krebs-Zyklus-Enzyme (Zitronensäurezyklus) einhergeht, sowie ein erhöhter Glykogenspeicher und die Vermehrung funktioneller Fettreserven im Muskel. Erreicht wird dies durch Training im aeroben Bereich. Optimiert werden diese Vorgänge zum Beispiel durch eine Einschränkung der Kohlenhydrate am Abend. Am darauf folgenden Morgen kann dann durch ein moderates Ausdauerlaufen im aeroben Bereich vor dem Frühstück (also nüchterner Zustand) die Fettverbrennung und die damit einhergehende metabolische Adaption stimuliert werden. Da im Zustand der leeren Glykogenspeicher keine Glukosefreisetzung aus diesen Speichern stattfinden kann, muss der Organismus alle

Prozesse optimieren, die eine Fettverbrennung mittels oxidativer Phosphorylierung möglich machen. Durch diese Fokussierung auf den Fettstoffwechsel zwingt man die Skelettmuskelzelle, Fettsäuren zu verwenden statt den bequemeren Weg der Verwendung von Glukose zu gehen. Da aus Fettsäuren nur mit Hilfe der oxidativen Phosphorylierung Energie freigesetzt werden kann, trainiert man hiermit die aerobe Energiefreisetzung mit allen daran beteiligten biochemischen Prozessen. Aus evolutionärer Sicht war dies ein normaler, aber lebenswichtiger Zustand bei unseren Jäger- und Sammler-Vorfahren. Da die gebildeten Ketonkörper zudem stabilisierende und angstlösende Wirkung auf das Gehirn haben, trug dies wesentlich dazu bei, dass der Erfolg des Jägers und Sammlers auch in entscheidenden, lebensbedrohlichen Situationen nicht durch Unsicherheit und Angst gefährdet wurde. Nicht nur in Sportarten wie dem Biathlon oder Schießen, bei denen man beim Schuss hochkonzentriert eine Kombination aus geringer Muskeltätigkeit mit hoher geistiger Anspannung ausführen muss, profitieren Sportler(innen) von der leistungssichernden Wirkung von Ketonkörpern. Auch die Fähigkeit, bei hohen Laktatwerten gute geistige Leistungen zu erbringen und zum Beispiel taktische Vorgaben des Trainers umzusetzen, hängt von der metabolischen Adaption des Sportlers an solche Situationen ab.

### **Essen wie Jäger und Sammler**

Durch kohlenhydratarme Mahlzeiten in Kombination mit moderater aerober muskulärer Leistung kann man eine Stoffwechsel- und Leistungssituation erzeugen, die sehr ähnlich dem Zustand eines Jägers und Sammlers ist. Da ein Mindestmaß an Glukose für besonders wichtige Zellen wie Nervenzellen vorhanden sein muss, wird in dieser Situation des Glukosemangels sehr schnell eine Insulinresistenz ausgeprägt, so dass Glukose nicht mehr von Skelettmuskeln verwendet wird und die in dieser Situation äußerst wertvolle Glukose nur noch den wichtigsten Zelltypen wie z.B. dem Gehirn, den Nerven und der Retina zur Verfügung gestellt wird. Sowohl die Steigerung der Glukoneogenesefähigkeit als auch die Optimierung der Energiefreisetzung über Verbrennung mittels Fettsäuren lassen sich sehr effektiv durch moderate muskuläre Aktivitäten mit leeren Glykogenspeichern induzieren. Teilweise findet diese Form des Trainings bereits erfolgreich Anwendung, etwa in den vorhin angesprochenen Nüchternläufen. Hierbei ist es nicht notwendig, jeden Tag dieses aerobe Training mit leeren Glykogenspeichern durchzuführen, sondern man kann durch wiederkehrendes phasenweises Training die Enzyme der Glukoneogenese und der oxidativen Phosphorylierung immer wieder aktiv trainieren. Vor einem Wettkampf können dann durch eine erhöhte Aufnahme von Kohlenhydraten die Glykogenspeicher aufgefüllt werden. Entscheidend ist aber, dass es durch das vorherige Training der Glukoneogenese auch möglich ist, während des Wettkampfes schneller Glykogenspeicher zu bilden, wodurch im Wettkampf folgende anaerobe Phasen besser überstanden werden. Gleichzeitig werden auch Wettkampfphasen besser überstanden, bei denen bei leeren Glykogenspeichern die Energie aus der oxidativen Phosphorylierung gewonnen werden muss. Die maximale aerobe Energiefreisetzung mittels oxidativer Phosphorylierung in Kombination mit optimal trainierter Fähigkeit zur Glukoneogenese und Glykogenspeicherbildung als Basis der anaeroben Energiefreisetzung erlaubt sowohl eine konstant hohe Energiefreiset-



zung im aeroben Bereich als auch phasenweise Spitzenbelastungen im anaeroben Bereich. Diese Spitzenbelastungen gilt es im Training ebenfalls zu simulieren. Denn außer der Optimierung der Glukoneogenese ist auch die verbesserte Verteilung des Laktats wichtig, die durch ein hochintensives Intervalltraining (HIT) erreicht werden kann. Ein HIT erhöht die Monocarboxylat-Transporter-Konzentration. Diese spielt eine wichtige Rolle bei der Verteilung des Laktats als Energiesubstrat zwischen den einzelnen Geweben und Kompartimenten. Bei konstanter lang anhaltender muskulärer Belastung im aeroben Bereich wie zum Beispiel beim Marathon minimiert sich der Vorteil einer guten Glukoneogenesefähigkeit sehr stark, da die Belastung fast ausnahmslos im aeroben Bereich liegt. Trotzdem bietet die Erhöhung der Glukoneogenesekapazität moderate Vorteile für alle Sportarten, da die Bildung von Glukose auch eine bessere Versorgung von Nerven und Gehirn mit Glukose möglich macht, wodurch die kognitive Leistungsfähigkeit unterstützt wird und auch Glukose für die aerobe Energiefreisetzung genutzt werden kann – womit die Energiefreisetzung aus Fettsäuren entlastet wird.

### Der Preis der Verbrennung

Die Form der Energiefreisetzung hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Bildung von zellschädigenden Substanzen wie Radikalen. Die aerobe Energiefreisetzung (Verbrennung von Wasserstoff) mit Hilfe der Mitochondrien stellt eine evolutionär gesehen neue Erfindung dar, die als Folge der Photosynthese-bedingten Sauerstoffbildung möglich wurde. Nur durch die aerobe Energiefreisetzung ist ein hoch effizienter Abbau der drei Hauptbestandteile unserer Ernährung – den Kohlenhydraten, den Eiweißen und den Fetten – möglich geworden. Biochemisch und thermodynamisch gesehen wird dabei Wasserstoff aus den Kohlenhydraten, den Eiweißen und den Fetten abgespalten und mit Hilfe von Sauerstoff in den Mitochondrien verbrannt. Dieser Verbrennungsprozess läuft dabei mit

Hilfe eines Wasserstoff- und Elektronengradienten innerhalb der Mitochondrienmembranen ab, wobei die durch den Elektronenfluss freigesetzte Energie zur Bildung von ATP genutzt wird. Dieser Transfer von thermodynamischer Energie in biochemisch nutzbare Energie in Form des ATP kann dann letztlich im Muskel in Muskelbewegung überführt werden. Selbst bei optimal funktionierenden Mitochondrien kommt es allerdings immer wieder zur Freisetzung von energiereichen Elektronen, wodurch Radikale gebildet werden, die Zellstrukturen schädigen können. Damit stellt die aerobe Energiefreisetzung zwar eine hocheffiziente Energiefreisetzung dar, aber gleichzeitig auch eine, bei der potentiell Radikalstress und Zellschäden ausgelöst werden, wodurch wiederum entzündliche Prozesse initiiert werden können. Besonders hoch sind die Radikalproduktion und die dadurch ausgelösten Zellschäden, wenn Mitochondrien Dysfunktionen aufweisen. Die mitochondriale Funktion kann in den Bereichen Funktionalität der Mitochondrienmembran in Bezug auf Struktur und Fluidität, aber auch durch Unterstützung der Fettsäureoxidation und des Zitratzyklus (z.B. durch Alpha-Liponsäure, Coenzym Q10, Glutathion, L-Carnitin, Vitamine B1, B2, Niacin, Pantothenäure, Magnesium) sowie zur Unterstützung der Elektronen-Transport-Kette (z.B. durch Eisen, Kupfer, Mangan, Selen, Coenzym Q10) optimiert werden. Selbst wenn die Energiefreisetzung in Mitochondrien optimal ist, kann es zu einer Einschränkung der muskulären Leistungsfähigkeit kommen, wenn die ATP-Bildung aus Adenosindiphosphat (ADP) aufgrund eines Mangels an Phosphokreatin eingeschränkt ist. Aufgrund dessen ist es notwendig, dass ausreichend Kreatin mit der Nahrung oder über Nahrungsergänzungsmittel aufgenommen wird. Da Kreatin vor allem im Fleisch und Fisch vorkommt, kann ein hoher Anteil an vegetarischer Ernährung und insbesondere ein hoher Anteil an stärkehaltigen Lebensmitteln zu einer Einschränkung der Kreatinaufnahme führen.

### Neue Strategien zur Radikalneutralisation

Da auch bei optimal funktionierenden Mitochondrien und optimaler ATP-Produktion Radikale gebildet werden, ist es zur Vermeidung von Radikalstress, Zellschäden und schneller Alterung wichtig, gebildete Radikale mit Hilfe von hocheffizienten Antioxidantien zu neutralisieren. Bisher wurden hierzu insbesondere die gesättigten Formen des Vitamin E (Tocopherole) empfohlen. Inzwischen werden verstärkt die ungesättigten Vitamin E-Formen (Tocotrienole) eingesetzt, da speziell von Gamma- und Delta-Tocotrienolen sehr positive Wirkungen ausgehen. Sie neutralisieren Radikale besser als die Tocopherole und wirken Entzündungsreaktionen sehr effizient entgegen. Im Vergleich zu den Tocopherolen führen die Tocotrienole zudem noch zu einer Steigerung der muskulären und kognitiven Leistungsfähigkeit.

### Stimulation der Bildung neuer Mitochondrien

Eine immer größere Bedeutung erlangen Erkenntnisse sowohl über den gezielten Ersatz von defekten Mitochondrien (Mitophagie) als auch die Möglichkeit, die Neubildung von Mitochondrien (Biogenese) durch Polyphenole induzieren zu können. In Studien konnte gezeigt werden, dass durch das Polyphenol Quercetin die Neubildung von Mitochondrien in Muskel- und Gehirnzellen induziert werden kann, wodurch die muskuläre Ausdauerleistung auch ohne Training gesteigert werden kann. Dies macht



## Verbrennung

Vorteil	Nachteil
// Komplette und damit effiziente Nutzung der Energie aus Kohlenhydraten, Eiweißen und Fetten	// Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Sauerstoff  // Produktion von Radikalen und damit der Gefahr von Zellschäden und schneller Alterung

## Vergärung

Vorteil	Nachteil
// Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit von Sauerstoff  // Keine Produktion von Radikalen und keine dadurch induzierte Zellschädigung	// Nur teilweise Nutzung der Energie aus Kohlenhydraten, glukogenen Aminosäuren und Glycerin aus dem Fett

deutlich, dass die Leistungsfähigkeit der aeroben Energiefreisetzung nicht nur durch die Präsenz von ausreichend Substrat und Sauerstoff bestimmt wird, sondern auch sehr stark von der Funktionalität und Bildungsrate der Mitochondrien abhängt.

## Sportartspezifische Ernährung als Basis des Erfolges

Da der Anteil der aeroben und anaeroben Energiefreisetzung wie auch die Bedeutung der Glukoneogenese in Bezug auf die jeweilige Sportart unterschiedlich sind, muss ein Sportart-spezifisches Training durchgeführt werden, das auch von einer Sportart-spezifischen Ernährung begleitet wird. Neben der Form der Energiefreisetzung und der Glukoneogenesekapazität spielen weitere unabhängige Parameter eine entscheidende Bedeutung für die Leistungsfähigkeit von Sportler(inne)n, die sich direkt oder indirekt aus der Ernährung ableiten.

Die oxidative Energiefreisetzung basiert normalerweise auf langkettigen Fettsäuren, die aus Fetten beim Abbau freigesetzt werden. Durch Verwertung mittelkettiger Fettsäuren (C6 bis C12) kann man die Energiefreisetzung durch Fettsäuren im aeroben Bereich erleichtern, da Fettsäuren mit einer mittleren Kettenlänge in moderaten Mengen im Blut löslich sind und damit ohne Lipoproteine transportiert werden können. Darüber hinaus erleichtern sie die Energiefreisetzung in Mitochondrien. Durch den Konsum von mittelkettigen Fettsäuren enthaltenden Lebensmitteln wie Kokosöl, Palmkernöl oder Butter lässt sich die oxidative Energiefreisetzung mittels der Mitochondrien erhöhen. Parallel hierzu erhöhen mittelkettige Fettsäuren die Bildung von Ketonkörpern, die auch vom Gehirn als Energieträger akzeptiert werden, wodurch diese die kognitive Leistungsfähigkeit auch in Situationen erleichtern, in denen die Glykogenspeicher depletiert sind und Glukose zu einem kostbaren Gut geworden ist.

## Verfügbarkeit von Glukose am Zielort

Selbst bei ausreichend hohem Glukosespiegel im Blut kann es zu Glukoseversorgungsproblemen kommen, da der Übergang der Glukose aus dem Blut in die Zelle ein Problem darstellt, wenn z.B. aufgrund einer Insulinresistenz Glukose nicht mehr über diesen insulinvermittelten Prozess aufge-

nommen werden kann. Galaktose eignet sich für die insulinunabhängige Versorgung auf sehr gute Weise. Darüber hinaus können auch - wie oben erwähnt - schädliche Metaboliten wie Ammoniak, das bei dem Abbau von Aminosäuren unter muskulärer Belastung auftreten kann, mit Hilfe von Galaktose entgiftet werden.

## Gute und schlechte Kohlenhydrate

Obwohl Kohlenhydrate ein wesentliches und wichtiges Substrat der Energiefreisetzung in Zellen darstellen, besteht bei dem Konsum von Kohlenhydraten, die schnell den Blutzuckerspiegel erhöhen, die Gefahr, die Leistungsfähigkeit zu reduzieren, da die Sauerstofftransportfähigkeit des Hämoglobins reduziert wird. Die Blutzucker steigernde Eigenschaft von Kohlenhydraten wird durch den glykämischen Index beschrieben (GI). Da eine Ernährung mit Kohlenhydraten wie Glukose oder Stärke (Lebensmittel mit hohem GI) sehr schnell zu einem Anstieg des Blutzuckerspiegels führt, kommt es aufgrund der chemischen Eigenschaften der Glukose zu einer Reaktion mit dem Hämoglobinmolekül in den roten Blutkörperchen. Die zunächst reversible Verbindung des Glukosemoleküls geht dann in eine irreversible Reaktion mit dem Hämoglobin über, wodurch die Sauerstofftransportfähigkeit des Hämoglobins verringert wird. Die chemische Modifikation des Hämoglobins (Glykierung) ist über Labortests in Form des HbA1c-Wertes detektierbar. Selbst bei einer großen Menge an verfügbarem Substrat zur Energiegewinnung in Form eines ausreichend hohen Blutglukosespiegels und intrazellulären Glukosespiegels können Hämoglobinmoleküle, die aufgrund der Glykierung mit Glukose (HbA1c-Werte > 5) eine eingeschränkte Sauerstofftransportfähigkeit aufweisen, nicht mehr ausreichend Sauerstoff an den Ort der Energiefreisetzung transportieren. Eine Muskelzelle muss dann aufgrund des fehlenden Sauerstoffs die vorhandene Glukose in Form der anaeroben Energiefreisetzung (Vergärung) in Laktat überführen. Dies führt zu einer Ansäuerung des Gewebes und des Blutes und zu einer damit verbundenen weiteren Einschränkung der Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes.

Die Glykierung des Hämoglobins führt zu einer Erniedrigung der Schwelle des Übergangs vom aeroben in den anaeroben Stoffwechsel, d.h. die Muskelzelle muss früher mit dem anaeroben Stoffwechsel beginnen, wodurch die Leistungsfähigkeit im Belastungsbereich reduziert wird. Neben der verringerten Sauerstoffversorgung der Muskelzelle kann eine Ernährung mit hohem glykämischen Index auch zur Ausbildung einer Insulinresistenz führen. Dies verringert den Übergang des Substrates Glukose aus dem Kompartiment Blut in die Zelle, wodurch die Fähigkeit zur Energiefreisetzung in Muskelzellen, aber auch in Zellen, die für kognitive Fähigkeiten verantwortlich sind, reduziert wird. Gerade bei Sportarten mit einem hohen Anteil an kognitiven Aufgaben führt der frühere Übergang zu einem anaeroben Stoffwechsel zu Konzentrationsverlusten und weiteren mentalen Defiziten.

Ein weiterer Nachteil des Verzehrs von Kohlenhydraten mit hohem glykämischen Index (GI) ist ein deutlicher Anstieg des Insulinspiegels. Die hohe Insulinkonzentration führt als Reaktion zur Hemmung der Lipolyse, d.h. Speicherfette können nicht abgebaut werden. Bei einem Verzehr von Kohlenhydraten mit niedrigem glykämischen Index sind diese Veränderungen deutlich schwächer ausgebildet, zudem sinkt der Blutzuckerspiegel

durch körperliche Belastung nicht so stark ab. Aufgrund des geringeren Insulinausstoßes wird auch ein gefährliches Absinken des Blutzuckers unter den Normalwert (Unterzucker) vermieden. Als Folge dieser Stoffwechselveränderungen ist die Belastungszeit nach Aufnahme einer Kohlenhydratmahlzeit mit niedrigem GI signifikant höher. Das bedeutet: Kohlenhydrate mit niedrigem GI haben einen positiven Effekt auf die Ausdauerleistung. Ein abendlicher Verzehr von Kohlenhydraten mit niedrigem GI bzw. eine reduzierte abendliche Kohlenhydratzufuhr haben zudem einen entscheidenden Vorteil auf die Regenerationsfähigkeit. Dabei spielen die Hormone Insulin und Somatotropin (STH) eine große Rolle. Beim abendlichen Verzehr von KH mit niedrigem GI bzw. Kohlenhydratreduktion wird weniger Insulin ausgeschüttet. Dadurch steigt der Wachstumshormonspiegel früher an. Beide Hormone, Insulin und Somatotropin, haben zwar wachstumsfördernde Effekte, der größere Effekt hinsichtlich der Regeneration wird jedoch durch Somatotropin erreicht. Ein kohlenhydratreiches Abendessen mit hohem Insulinausstoß fördert die Umwandlung von Kohlenhydraten in Fett, während bei niedrigem Insulinspiegel die höheren STH-Spiegel die Regeneration fördern und zudem ein muskelwachstumsfördernder Effekt auftritt.



### **Mono- oder Disaccharide mit einem niedrigen GI**

Inzwischen konnte durch Studien gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Zuckern mit niedrigem glykämischen Index eine deutlich bessere und langfristige Versorgung einer Zelle mit Substrat möglich ist als mit Glukose oder Glukosederivaten wie Stärke. Dies erhöht nicht nur die muskuläre, sondern auch die kognitive Leistungsfähigkeit. Eine Strategie zur Umsetzung dieser positiven Effekte auf muskuläre und kognitive Leistungsfähigkeit besteht hierbei in der Verwendung von Glukosederivaten wie der Trehalose und der Isomaltulose oder der Verwendung von Galaktose. Während Trehalose aus zwei Glukosemolekülen besteht, besteht das Disaccharid Isomaltulose aus Glukose und Fruktose. Beiden Disacchariden ist eigen, dass die Spaltung der Disaccharidbindung deutlich langsamer ist als die von Saccharose (Rohrzucker oder Rübenzucker) und der folgende Insulinausstoß auch geringer ist als der von Saccharose. Aufgrund der deutlich verzögerten Spaltung von Isomaltulose setzt dieses Disaccharid über einen langen Zeitraum Glukose- und Fruktosemoleküle frei und führt damit nicht zu einem schnellen und starken Blutzuckeranstieg. Hierdurch wird die Glykierung des Hämoglobinmoleküls vermindert und so eine erhöhte Sauerstofftransportkapazität geschaffen. Studien haben gezeigt, dass Isomaltulose im Vergleich zu Maltodextrin (hydrolysierte Stärke) die muskuläre Leistungsfähigkeit in Bezug auf Ausdauer und Schnelligkeit erhöht. Isomaltulose hat darüber hinaus einen positiven Effekt auf die kognitiven Fähigkeiten, weil u.a. die insulinbedingte Unterzuckerung vermieden und die Energiebereitstellung aus Fett erleichtert wird. Trehalose hat gegenüber Isomaltulose den Vorteil, dass keine Fruktose, sondern nur Glukose freigesetzt wird. Damit muss Fruktose nicht in Glukose überführt werden, sondern es steht direkt Glukose für Stoffwechselprozesse zur Verfügung. Hiermit werden auch die negativen Effekte von Fruktose vermieden, die bei hoher Konzentration den Leberstoffwechsel negativ beeinflusst. Der Nachteil von Trehalose ist allerdings, dass der Blutzuckerspiegel aufgrund der höheren Freisetzungsrates von Glukose schneller erhöht wird als von Iso-

maltulose. Der Insulinausstoß aufgrund des Konsums von Trehalose ist dagegen ähnlich niedrig wie der von Isomaltulose. Damit eignen sich beide Disaccharide für eine gleichmäßige Glukoseversorgung, ohne dabei eine Insulinresistenz zu induzieren. Ein weiterer sehr vorteilhafter Zucker stellt das Monosaccharid Galaktose dar. Galaktose führt nicht zu einem Anstieg des Blutzucker- oder Insulinspiegels. Galaktose wird insulinunabhängig aufgenommen und kann, wie oben erwähnt, auch in Glykogenspeicher eingebaut werden. Neben den Disacchariden Trehalose und Isomaltulose, die sehr gut geeignet sind, dem Sportler gleichmäßig Zucker als Energiequelle zur Verfügung zu stellen, gibt es neben Galaktose mit Ribose auch noch einen weiteren Zucker mit protektiver Wirkung. So konnte gezeigt werden, dass Ribose Herzmuskelzellen schützt.

### **Falsche Kohlenhydrate induzieren Verletzungsanfälligkeit**

Die Fokussierung auf Kohlenhydrate, die nach dem Verzehr sehr schnell den Blutzuckerspiegel erhöhen, stellt aus evolutionärer Sicht ein neuzeitliches Phänomen dar, auf das der menschliche Metabolismus nicht adaptiert ist. Obwohl oder gerade weil Glukose der entscheidende Bestandteil des Energiestoffwechsels des Menschen ist, ist der Konsum von großen Mengen Kohlenhydraten mit einem hohen glykämischen Index wie Glukose oder Stärke leistungsmindernd und gesundheitsschädigend, weil sowohl Glukose als auch der für die Glukoseverwertung im aeroben Bereich notwendige Sauerstoff nicht mehr ausreichend an den Ort der Verwendung transportiert werden können und die hohen Blutzuckerwerte zudem Zellschäden auslösen. Neben der Glykierung des Hämoglobins kommt es auch zu einer Glykierung von Proteinen des Binde- und Stützgewebes. Als Folge dessen kommt es leichter zu Zerreißen des Gewebes wie z.B. Kreuzbandrupturen, Bänder- und Muskelfaserrissen. Der Konsum von falschen Kohlenhydraten hat daher nicht nur eine verminderte Sauerstofftransportfähigkeit des Hämoglobins und die Ausbildung einer Insulinresistenz zur Folge, sondern führt auch zu häufigeren und schweren Verletzungen. Als Folge entsteht eine fatale Kombination aus Leistungsreduktion und aus Verletzungen, die einer positiven Entwicklung der Karriere entgegensteht.

### **Die Sauerstoffkonkurrenten der Skelettmuskeln**

Neben diesen biochemischen und biologischen Parametern der Energiefreisetzung im aeroben und anaeroben Bereich wird der aerobe Bereich bekanntermaßen auch noch durch physikalische Parameter wie dem Lungenvolumen begrenzt. Selbst bei großem Lungenvolumen und großer Menge an verfügbarem Sauerstoff in der Lunge kann der Sauerstofftransfer von der Lunge in das Blut aufgrund einer starken Glykierung des Hämoglobins (hoher HbA1c-Wert) gehemmt sein, wodurch es zu einer Leistungsreduktion kommt bzw. die maximal mögliche Leistung nicht abrufbar ist. Da die aerobe Leistungsfähigkeit von der Verfügbarkeit von Sauerstoff für die Skelettmuskulatur abhängt, führt zudem ein Verbrauch von Sauerstoff in der glatten Muskulatur des Herzens und anderen Organen dazu, dass weniger Sauerstoff für die Skelettmuskeltätigkeit zur Verfügung steht. Ähnliches trifft auf die Entnahme von Glukose von anderen Organen zu, da dadurch die Verfügbarkeit von Glukose für die Skelettmuskeln reduziert wird. Wenn zum Beispiel der Herzmuskel einen Teil

seiner Energiefreisetzung mit Hilfe von Glukose bestreitet, reduziert er die Menge an Glukose, die für die Skelettmuskeln zur Verfügung steht. Obwohl der Herzmuskel gerne Substrate wie Fettsäuren und Laktat für die oxidative Energiefreisetzung verwendet, nutzt er auch im Falle des Glukoseüberschusses die Glukose aus dem Blut. Der Herzmuskel kann besonders auf die Nutzung von Fettsäuren, Laktat und Ketonkörpern und auf die Nichtnutzung von Glukose trainiert werden, indem die oben beschriebene Kombination aus Förderung der aeroben Energiefreisetzung und Förderung der Glukoseneogenese angewendet wird. Hierdurch erhöht sich die Glukosemenge im Wettkampf für Skelettmuskeln, wodurch dort mehr Glukose für die Energiefreisetzung aus aerober und/oder anaerober Energie zur Verfügung steht.

### Essentielle Nahrungsbestandteile

Oftmals ist die muskuläre Leistungsfähigkeit eines Sportlers durch ein Fehlen von lebensnotwendigen Nahrungsbestandteilen (essentielle Aminosäuren, essentielle Fettsäuren, Vitamine, Mineralien) eingeschränkt. Dies ist zum einen durch die Veränderungen bei der Produktion von Lebensmitteln bedingt. Die Jahrhunderte bis Jahrtausende lange Bewirtschaftung europäischer Böden hat zu einer Auszehrung der Böden in Hinsicht auf Mineralstoffe geführt, die nur teilweise von Kunstdüngern kompensiert werden. Aufgrund dessen weisen viele Lebensmittel nicht mehr ausreichend hohe Mengen an Mineralien auf. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Lebensmittel aufgrund von Pflanzenzüchtung und Produktionsprozessen Zusammensetzungen aufweisen, die nicht mehr ausreichend viele Vitamine und essentielle Aminosäuren und essentielle Fettsäuren aufweisen. Weiter verschlimmert wird die Situation dadurch, dass Sportler(innen) Kohlenhydrate häufig gerne in Form von Weizenmehlprodukten wie Nudeln, Brot, Backwaren und Pizza konsumieren. Dies führt dazu, dass hierdurch mit dem hohen Anteil an Stärke eine Kohlenhydratform aufgenommen wird, die einen negativen Effekt auf den Blutzucker- und Insulinspiegel hat und zudem lebensnotwendige Substanzen wie essentielle Aminosäuren und essentielle Fettsäuren, Vitamine und Mineralien in sehr geringen Konzentration im Vergleich zu anderen Lebensmitteln aufweist. Diese lebensnotwendigen Substanzen wie Vitamine und Mineralien sowie essentielle Fettsäuren und essentielle Aminosäuren sind allerdings für die generelle Funktionsfähigkeit der Zelle notwendig und damit auch für die Fähigkeit, Energie aus Substraten zu gewinnen. Damit Sportler(innen) überhaupt die Chance haben, Zell- und Körperfunktionen aufrechterhalten und optimal Energie freisetzen zu können, bedarf es einer ausreichend hohen Grundversorgung mit essentiellen Lebensmittelbestandteilen und des Konsums von Kohlenhydraten mit positiven Eigenschaften. Weizenmehlprodukte haben darüber hinaus noch den gravierenden Nachteil, dass viele Menschen aufgrund des Weizenglutens (Weizenkleberprotein) Immunreaktionen entwickeln, die zu Entzündungen und Leistungsminderung führen.

Da eine erhöhte Kohlenhydrataufnahme, wie sie von vielen Sportlern praktiziert wird, in vielen Fällen zu einer Reduktion des Eiweißanteils und damit einhergehend einer Reduktion der Aufnahme von essentiellen Aminosäuren kommt, ist es wichtig, Lebensmittel mit einem hohen Anteil an essentiellen Aminosäuren zu konsumieren, oder diese essentiellen Amino-

säuren direkt aufzunehmen. Gleichzeitig bietet dies die Möglichkeit, dem Körper Glukose in Form von glukogenen Aminosäuren zur Verfügung zu stellen, wodurch eine gleichmäßige Versorgung der Skelettmuskeln und anderer Zellen mit Glukose möglich wird, ohne dass es zu einer verstärkten Glykierung des Hämoglobins kommt. Vor allem ist es aber entscheidend, dass vorwiegend Kohlenhydrate konsumiert werden, die den Blutzucker- und Insulinspiegel stabil halten. Umgesetzt werden kann dies, indem der Stärkeanteil in der Nahrung zu Gunsten von Mono- und Disacchariden mit niedrigem glykämischen Index reduziert wird, wobei der Gesamtgehalt an Kohlenhydraten nicht reduziert werden muss. In Abhängigkeit vom Energiebedarf der gewählten Sportart sollte der Kohlenhydratanteil zudem angepasst werden. Mit Zunahme des Energiebedarfes sollte der Anteil von Kohlenhydraten in Form von Kohlenhydraten mit niedrigem glykämischen Index gesteigert werden, da ansonsten die Verwendung von Aminosäuren für die Energiegewinnung aufgrund des nichtverwertbaren und teilweise toxischen Abfallproduktes in Form der Aminogruppe negative Effekte auslöst.

### Fazit

Neben gezielten Trainingsmethoden, wie sie seit langer Zeit im Spitzen- und Breitensport für das Grundlagen- bzw. Intervalltraining eingesetzt werden, bietet eine gezielte Ernährung bzw. Nahrungsergänzung eine Adaption des Metabolismus an Sportart-spezifische Anforderungen, um optimale Trainings- bzw. Wettkampferfolge erzielen zu können. Hierbei kann durch die gezielte Variation der Zusammensetzung der Nahrung sowie durch Trainingseinheiten mit depletierten Glykogenspeichern in einer ketogenen Situation ein Training für Sportart-spezifische metabolische Anforderungen im aeroben wie im anaeroben Bereich durchgeführt werden. Das Ziel ist ein metabolisches Learning mit dem dadurch verbundenen Zugriff auf den jeweils richtigen Energiespeicher. Hoch intensive Trainingseinheiten (HIT) und Intervalltraining sind wichtig für eine verbesserte Laktatutilisation und dem damit verbundenen gezielten Zugriff auf Laktat als Kohlenhydrat-Speicher, womit die Schonung der Glykogen-Energiespeicher einhergeht. Ein Training, durch das die Stoffwechselwege für eine optimale Fettverbrennung induziert werden und eine optimale Laktatutilisation erreicht wird, kann durch eine gezielte und kalkulierte Zufuhr von Kohlenhydraten mit niedrigem glykämischen Index optimiert werden. Bisher nicht oder kaum genutzte Mono- oder Disaccharide mit niedrigem glykämischen Index wie Galaktose, Trehalose und Isomaltulose stellen Kohlenhydrate dar, die ernährungs- und leistungsphysiologisch der intensiv genutzten Stärke überlegen sind und neue Möglichkeiten für eine Steigerung der muskulären und kognitiven Leistung im Sport darstellen.

// [j.coy@tavarlin.de](mailto:j.coy@tavarlin.de)

// [doc@praxis-dr-may.de](mailto:doc@praxis-dr-may.de)

*Literatur bei den Autoren*

