

sehr schnell und ist bereits nach circa 10 Sekunden erschöpft. Die Dauer hängt davon ab, wie trainiert eine Person ist. Bei wenig trainierten Sportlern reicht der Prozess für circa 6 Sekunden, bei hoch trainierten Sportlern kann er bis circa 20 Sekunden anhalten. Dieses hohe Tempo, mit dem dieser Vorgang vonstattengeht, ist der Grund, warum der Kreatinphosphatspeicher eine bedeutende Rolle im Sprint bei einer Distanz von 100 bis 200 Metern spielt, aber eine untergeordnete Rolle bei längeren Belastungen wie dem Laufen.

2. Der nächstgrößere zur Verfügung stehende Speicher ist der **Kohlenhydratspeicher**. Hier unterscheidet man die frei im Blut zirkulierenden Kohlenhydrate, den Blutzucker, und die Speicherform der Kohlenhydrate, das Glykogen. Den kleineren Speicher von beiden bildet der Blutzucker und insbesondere die freie Glukose – Traubenzucker – im Blut. Ein Glukose-Molekül kann unter vollständiger Verbrennung zur Resynthese von 36 Molekülen ATP genutzt werden. Je nach Ernährungszufuhr befinden sich circa 4 bis 8 Gramm Zucker in unserem Blut.
3. Wenn nach einer Mahlzeit viel Glukose in unserem Blut zirkuliert, kann es in die Speicherform **Glykogen** überführt werden. Glykogen als Speicherform der Kohlenhydrate kann mit der Energie liefernden Stärke in Pflanzen verglichen werden, die die Pflanze braucht, um Zellwände aufzubauen und um zu wachsen. In unserem Körper gibt es zwei Glykogenspeicher, einen in der Leber und einen in der Skelettmuskulatur. Letzterer hat eine große Bedeutung für die Trainingsbelastung und den Leistungsaufbau im Laufsport. Während der Leberglykogenspeicher relativ konstant 100 bis 150 Gramm Glukose bei einem 75 Kilogramm schweren Mann speichern kann, variiert der Muskelglykogenspeicher zwischen 200 und 400 Gramm. Wie groß Letzterer tatsächlich ist, lässt sich beeinflussen, denn er kann trainiert werden. Dennoch reichen die Muskelglykogenspeicher bei Belastung im extensiven Bereich, das heißt unter Nutzung von Sauerstoff, also im aeroben Stoffwechsel, oft nur für 60 bis 90 Minuten. Diese Dauer ist unter anderem abhängig vom Trainingsstand.
4. Als letzter Energiespeicher im menschlichen Körper ist der **Fettspeicher** zu nennen. Der Fettspeicher kann für die Regeneration vieler Zehntausender ATP-Moleküle durch Verbrennung genutzt werden, genauer durch Beta-Oxidation, den oxidativen – unter Mithilfe von Sauerstoff – Abbau von Fettsäuren. Die Energie, die aus den Fettspeichern regeneriert wird, steht dem Organismus am langsamsten zur Verfügung, bleibt aber auch länger verfügbar. Selbst bei schlanken Läufern könnte dieser Speicher für mehrere Marathonläufe dienen.

In selteneren Fällen können auch Proteine zur Resynthese von ATP verstoffwechselt werden. Dieser Vorgang geschieht aber eher in Phasen von Krankheit, Unterernährung oder gegen Ende einer längeren und intensiven Laufbelastung ab einer Dauer von über 90 Minuten.

### Formen des Energiestoffwechsels

Zum tieferen Verständnis der Funktionsweise der Muskulatur sollen die verschiedenen Formen des Energiestoffwechsels noch genauer beleuchtet werden. Allgemein werden zwischen Stoffwechselprozessen in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerob) und in Anwesenheit von Sauerstoff (aerob) unterschieden.<sup>1</sup> Die anaeroben Stoffwechselprozesse sind dabei schneller verfügbar, aber auch schneller erschöpft. Für die aeroben Stoffwechselprozesse ist genau das Gegenteil der Fall: Sie zeichnen sich durch eine langsamere, aber auch längere Verfügbarkeit aus.

Die anaeroben Stoffwechselprozesse finden innerhalb einer Muskelzelle statt. Die erste und schnellste Form der Energiebereitstellung erfolgt über die Abspaltung eines energiereichen Phosphatrestes von Kreatinphosphat.<sup>2</sup> Kreatinphosphat liegt in jeder Muskelzelle in ungefähr drei- bis vierfacher Menge im Verhältnis zum ATP vor. Damit Kreatinphosphat abgespalten werden kann, ist das Enzym Kreatinkinase notwendig. Dieses Enzym kann beispielsweise durch Schnellkrafttraining gezielt vermehrt werden. Ebenso wird eine Vergrößerung des Kreatinphosphatspeichers durch Schnellkrafttraining erreicht.

Neben dieser schnellen Form der ATP-Regeneration läuft auch die anaerobe Glykolyse im Körper ab, also die Verstoffwechslung von Glukose ohne Sauerstoff. Hierbei wird die sowohl im Blut als auch im Glykogen vorhandene Glukose genutzt. Im ersten Schritt der Glykolyse wird Glukose zu Pyruvat, einem Salz der Brenztraubensäure und einem wichtigen Zwischenprodukt verschiedener Stoffwechselwege, aufgespalten, wovon zwei ATP-Moleküle regeneriert werden können.<sup>3</sup> Das Pyruvat verursacht hierbei allerdings eine negative Rückkopplung, das heißt Verlangsamung, in Bezug auf die Glykolyse und wird umgehend in Laktat, die Milchsäure, umgewandelt und von der Zelle in das Blut abgegeben. Das Laktat kann als Stoffwechselzwischenprodukt für verschiedene Prozesse im Körper genutzt werden, zum Beispiel für die erneute Energiebereitstellung. Sie wirkt jedoch leistungslimitierend, wenn sie im Übermaß vorhanden ist. In diesem Fall spricht man von »Übersäuerung«.

Die Glykolyse spielt eine wichtige Rolle dabei, das Leistungsvermögen über längere Zeit aufrechtzuerhalten, und wird beispielsweise über den gezielten Einsatz von Intervalltraining

verbessert. Gerade im Bereich des Langsprints und der Mittelstrecke bei einer Distanz von 400 bis 5000 Metern stehen die Vermehrung der für die anaerobe Glykolyse notwendigen Enzyme sowie die möglichst lange Aufrechterhaltung der Bewegung trotz Ansammlung von Laktat im Blut im Vordergrund des Trainings. Durch dieses Training werden die sogenannte Laktatschwelle und die Laktattoleranz, die Pufferkapazität, im Körper erhöht, wodurch die Leistungsfähigkeit steigt.

In Anwesenheit von Sauerstoff kann Glukose auch über den Zwischenschritt Pyruvat vollständig zu Kohlendioxid und Wasser verstoffwechselt werden. Dieser Prozess wird aerobe Glykolyse oder auch Zellatmung genannt und erfolgt in den Mitochondrien der Muskelzellen.<sup>4</sup> Hierbei können weitere circa 34 ATP-Moleküle aus einem Glukosemolekül regeneriert werden. Ein wesentliches Ziel von Ausdauertraining ist die Vermehrung der an diesem Stoffwechselschritt beteiligten Enzyme und die Vergrößerung der Glykogenspeicher.

Die langsamste, aber ausdauerndste Form der Energiegewinnung ist die aerobe Verstoffwechslung von Fettsäuren, die bereits erwähnte Beta-Oxidation. Dieser Prozess erfolgt in den Mitochondrien der Muskelzellen. Ein Mol Fettsäuren kann hier zur Resynthese von 130 Mol ATP genutzt werden. Dieser Stoffwechselprozess steht insbesondere bei langen Ausdauerbelastungen mit niedriger Intensität im Vordergrund, zum Beispiel beim Marathon.

Im Körper laufen alle Stoffwechselprozesse gleichzeitig ab, auch wenn ein Prozess zu bestimmten Zeitpunkten der Belastung je nach Intensität und/oder Dauer dominant ist. Körperliches Training führt generell zur Verbesserung und Vermehrung der Enzyme für die jeweiligen Stoffwechselprozesse und sorgt für die Vergrößerung der Energiespeicher, vor allem des Muskelglykogens.

### **Bedeutung und Funktion von ATP für die Muskulatur**

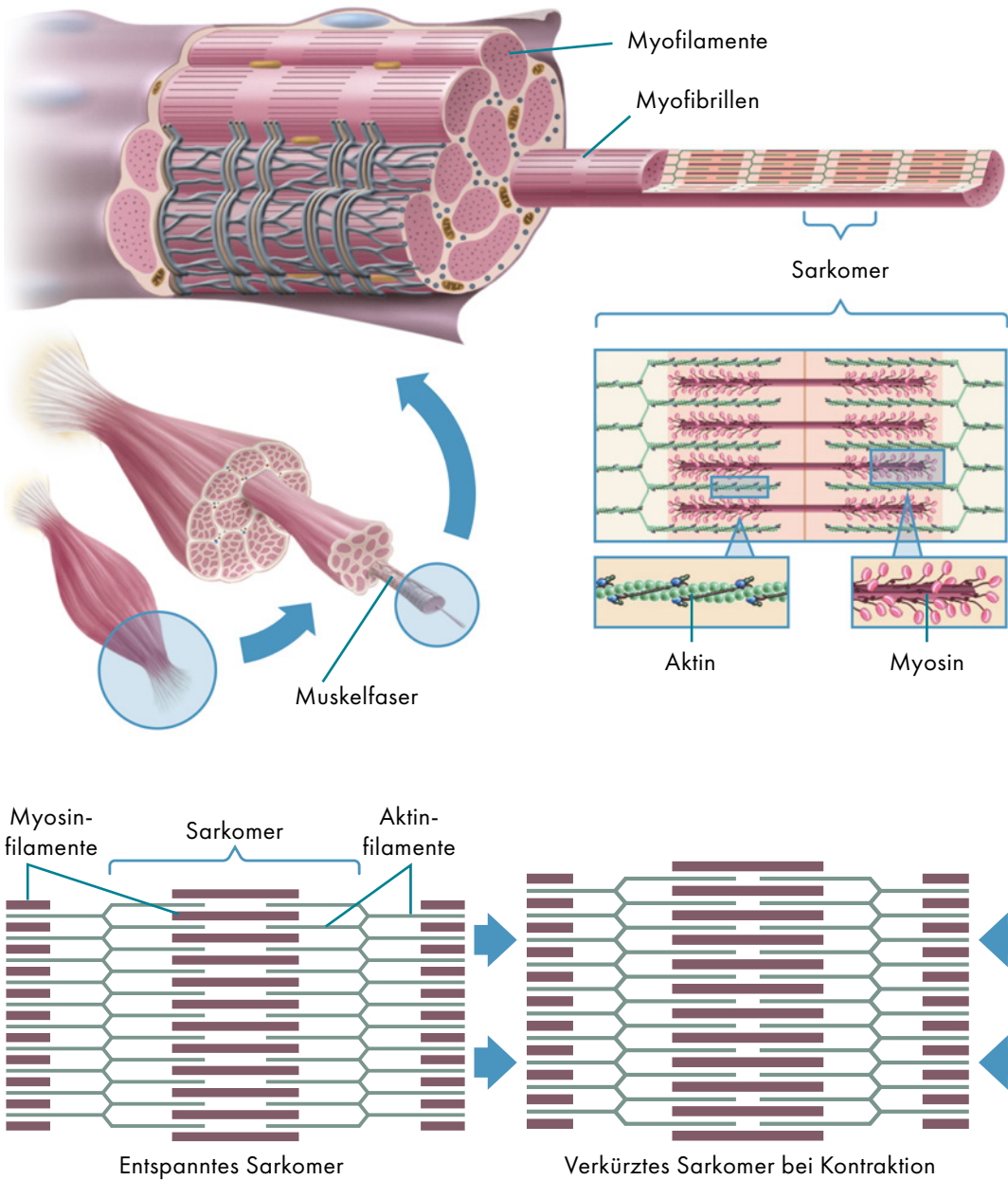
Für die Funktion der Muskulatur ist ATP von entscheidender Bedeutung. Die wesentliche Funktion der Muskulatur besteht in der Fähigkeit, sich zusammenziehen zu können, was Kontraktion genannt wird. Die Kraftentwicklung der Muskulatur entsteht durch das Zusammenspiel der Filamentproteine Aktin und Myosin in der Muskelzelle. Im Ruhezustand sind Aktin und Myosin nicht miteinander verbunden. ATP ist an kleinen Fortsätzen des Myosins, den Myosinköpfen, gebunden, die sich in einem 90-Grad-Winkel in einer Art Vorspannung zum Aktinfilament befinden. Bei einem ankommenden elektrischen Signal, das als Stimulus für die Kontraktion fungiert, werden Kalziumionen ausgeschüttet und aktivieren ein

ATP-spaltendes Enzym an den Myosinköpfen. Durch diese von Magnesium abhängige Aktivierung wird das energiereiche Phosphat vom ATP abgespalten und es entsteht ADP und damit Energie. Außerdem sorgt das Kalzium für die Freigabe der Myosinbindungsstelle des Aktinfilaments, wodurch eine Querverbindung zwischen Myosin und Aktin gebildet wird. Bei der Abgabe des Phosphates und der Energie vom Myosinköpfchen kippen Letztere um circa 45 Grad. Die Energie der 90-Grad-Vorspannung wird genutzt, um das Aktinfilament aktiv zwischen die Myosinfilamente zu schieben, sodass sich der Muskel kontrahiert. Dieser Vorgang wird als Filamentgleittheorie beziehungsweise Querbrückenzyklus bezeichnet. Bei einer erneuten Bindung von ATP löst sich die Bindung von Myosinköpfchen und Aktin wieder und es kann ein neuer Kontraktionszyklus vorbereitet werden.

Mehrere Kontraktionszyklen können so lange aufeinanderfolgen, solange genügend ATP in der Muskelzelle zur Verfügung steht. Eine starke körperliche Belastung mit damit einhergehendem ATP-Mangel kann jedoch zu einer vorübergehenden festen Bindung des Aktin-Myosin-Komplexes führen und somit zu einer reduzierten muskulären Funktionsfähigkeit. Dieser Vorgang wird unter anderem als eine mögliche Ursache für Muskelkater angesehen. Fest steht: Die Verfügbarkeit von ATP ist essenziell für die Funktionsweise der einzelnen Muskelzelle und damit auch der gesamten Muskulatur.

## Unterschiedliche Muskeltypen

Nach dem mikroskopischen Erscheinungsbild gibt es zwei Typen von Muskulatur im menschlichen Körper: die quer gestreifte und die glatte Muskulatur. Zur quer gestreiften Muskulatur zählen die Skelettmuskulatur und die Herzmuskulatur, wobei Letztere noch einmal eine Sonderrolle einnimmt. Die glatte Muskulatur ist vor allem an den inneren Organen und den Blutgefäßen zu finden, deren Funktionen über unwillkürliche Bewegungen gesteuert werden. Die Skelettmuskulatur ist für die willkürliche, das heißt, vom Willen gesteuerte, aktive Bewegung des Körpers zuständig. Insgesamt besitzt der gesunde Mensch über 650 Muskeln, die sich in ihrer Gestalt und Funktion teils deutlich unterscheiden. So ist beispielsweise der große Gesäßmuskel (*Musculus gluteus maximus*) in der Regel der volumenmäßig größte Muskel im menschlichen Körper, während sich der stärkste Muskel im Bereich des Gesichts vom Jochbein bis zum Unterkiefer zieht und, meist als Kaumuskel (*Musculus masseter*) bezeichnet, maßgeblich an der Kaufunktion beteiligt ist.



Zu sehen ist die Bauweise der Muskulatur von der Ultrastruktur über die Muskelfaser bis hin zur Myofibrille sowie der Aktivitätsvorgang der Aktin- und Myosinfilamente bei der Muskelkontraktion.