

DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT

Sieht man einmal von Schach, Dart und ähnlichen "Sportarten" ab, bedeutet sportliche Betätigung in der Regel körperliche Arbeit, sprich Muskelarbeit. Dazu bedarf es natürlich eines "Treibstoffes". Dieser heißt *ATP* (Adenosintriphosphat) und ist ein sog. "*energiereiches Phosphat*", welches durch seine Spaltung die Muskelkontraktion (Muskelverkürzung und/oder Muskelspannung) ermöglicht.

Da in der Muskelzelle nur eine sehr geringe Menge an ATP gespeichert ist, muss diese *chemische Energie* ständig im Muskelstoffwechsel erzeugt werden, damit sie in *mechanische Energie* umgewandelt werden kann.

Neben der mechanischen Energie, die z.B. der Fortbewegung dient, wird bei Muskelarbeit auch noch Energie in Form von Wärme erzeugt: Bei körperlicher Aktivität wird uns warm. Interessant dabei, dass nur ca. ein Viertel der umgesetzten Energie als mechanische Energie für die Muskelarbeit zur Verfügung gestellt wird und der Großteil des Energieumsatzes in Form von Wärme "verloren" geht. Betrachtet man den Muskel als Maschine, so ist sein Wirkungsgrad somit relativ gering.

- ***Bei Muskelarbeit wird chemische Energie (ATP) in mechanische Energie und Wärme umgewandelt.***

Welche Energiequellen stehen zur ATP-Bildung zur Verfügung ?

Wie schon erwähnt, ist in der Muskulatur nur eine sehr kleine Menge ATP gespeichert (ca. 2 kcal). Daneben gibt es noch ein zweites "energiereiches Phosphat", das *Kreatinphosphat*, welches durch seine Spaltung sofort ATP aus ADP regenerieren kann, aber auch nur in einem kleinen Ausmaß vorhanden ist (4 – 8 kcal). Die energiereichen Phosphate als direkt verfügbare chemische Energie ermöglichen durch eine maximal mögliche Energieflussrate (ATP-Bildung pro Zeit) zwar eine sofortige körperliche Höchstleistung, jedoch nur für einige Sekunden.

Daraus folgt, dass es Energiequellen mit größerer Kapazität zur ATP-Gewinnung geben muss.

- ***Die eigentlichen Energieträger sind die Nährstoffe Kohlenhydrate und Fette.***

Kohlenhydrate sind als *Glykogen* (Speicherform von Glukose=Traubenzucker) in der Muskulatur und zu einem kleinen Teil auch in der Leber (max. 100 Gramm) gespeichert. In Abhängigkeit von Trainingszustand und Ernährung können bis zu 500 Gramm Glykogen in die Muskelzellen eingelagert werden (entsprechend ca. 2000 kcal). Diese Energiequelle ermöglicht intensive Ausdauerbelastungen bis zu etwa eineinhalb Stunden.

Den weitaus größten Energiespeicher stellen die *Fette* dar, die nicht nur unter der Haut gespeichert sind (Unterhautfettgewebe), sondern auch im Bauchraum um die inneren Organe (viszerales oder abdominelles Fettgewebe). Bei schlanken Menschen beträgt die in den Fettdepots enthaltene Energie - sogar in der Muskulatur selbst ist etwas Fett gespeichert - das 30- bis 50-fache der in Form von Glykogen gespeicherten Energie (bei dicken Personen entsprechend mehr). Damit sind stundenlange, ja sogar tagelange Ausdauerleistungen (mit allerdings geringerer Intensität) möglich. Auch in Ruhe verbrennen wir in unseren Muskeln so gut wie ausschließlich Fett bzw. Fettsäuren ("Schlank im Schlaf").
[siehe [FETTVERBRENNUNG IM SPORT – MYTHOS UND WAHRHEIT](#)]

In welchem Ausmaß die Energiequellen "angezapft" werden, hängt davon ab, wie schnell, wie viel und wie lange im Muskel Energie bereitgestellt werden soll bzw. kann - mit anderen Worten, wie intensiv und wie lange die körperliche Belastung erfolgt.

Je höher die *Energieflussrate* (ATP-Gewinnung pro Zeit), also je schneller dem Muskel Energie (ATP) geliefert werden kann, desto höher ist die Leistung (Leistung ist Arbeit pro Zeit) (siehe unten)

Man unterscheidet **zwei Hauptmechanismen der Energiebereitstellung**:

1. Die **aerobe** (=oxidative) Energiebereitstellung: Bildung von ATP unter Verbrauch von Sauerstoff. Dieser Vorgang findet in den *Mitochondrien* statt.
2. Die **anaerobe** Energiebereitstellung: Bildung von ATP ohne Verbrauch von Sauerstoff. Dieser Vorgang findet im *Zytosol* (Zellplasma) statt.

zu 1: Die **aerobe Energiegewinnung** erfolgt durch vollständige Verbrennung (=Oxidation) von a) **Kohlenhydraten** (genauer: Glukose = Traubenzucker) und b) **Fetten** (genauer: Fettsäuren) = *Betaoxidation*

jeweils zu Kohlendioxid und Wasser ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), wobei die Glukose durch Glykogenabbau (*Glykolyse*) und die Fettsäuren durch Fettspaltung (*Lipolyse*) zur Verfügung gestellt werden.

zu 2: Die **anaerobe Energiegewinnung** erfolgt durch

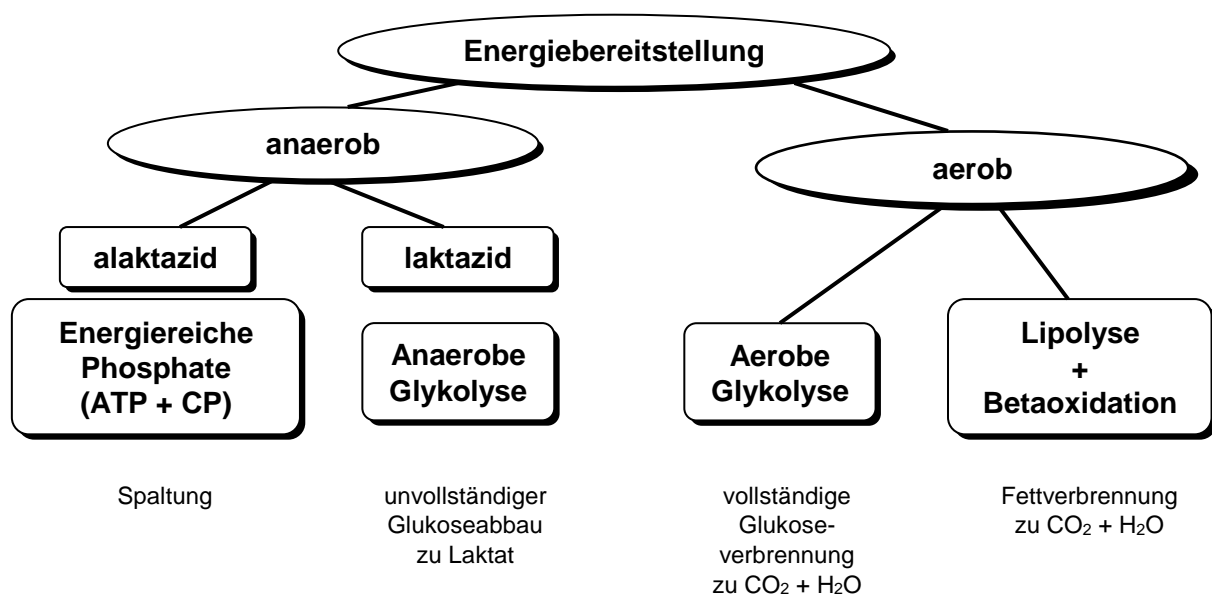
- a) Spaltung der gespeicherten energiereichen Phosphate **ATP** und **Kreatinphosphat** = **anaerob-alkalazide** Energiebereitstellung
- b) unvollständiger Abbau von Glukose unter Bildung von Laktat ("Milchsäure"): *anaerobe Glykolyse* = **anaerob-laktazide** Energiebereitstellung

Somit stehen dem Muskelstoffwechsel 4 Mechanismen der Energiegewinnung zur Verfügung, die je nach Intensität und Dauer der körperlichen Belastung beansprucht werden.

- **Primär bestimmt das Ausmaß der Belastungsintensität und nicht die Belastungsdauer die entsprechende Energiebereitstellung.**

Beispiel Joggen: niedrige Belastungsintensität, das bedeutet aerobe Energiebereitstellung durch vornehmlich Fettverbrennung, egal, ob nur für 5 Minuten oder 2 Stunden (Dies vorweg für alle, die dem weitverbreiteten Irrglauben unterliegen, die Fettverbrennung würde erst nach einer halben Stunde einsetzen).

Es besteht prinzipiell immer ein "Nebeneinander" der einzelnen Mechanismen der Energiebereitstellung mit fließenden Übergängen in Abhängigkeit von der Belastungsintensität und kein "Nacheinander", wie vielfach geglaubt wird.



Die Geschwindigkeit der Energiebereitstellung, die schon erwähnte *Energieflussrate* (ATP-Bildung pro Zeit), ist natürlich beim anaerob-alkalotischen Mechanismus am größten und nimmt bei der anaeroben Glykolyse (anaerob-laktotischer Mechanismus), der aeroben Glukoseverbrennung sowie Fettverbrennung um jeweils ca. die Hälfte ab. Dafür nimmt der Energiegehalt in der gleichen Reihenfolge zu.

- **Intensität und Dauer (Kapazität) der körperlichen Leistung verhalten sich entsprechend der jeweiligen Energiebereitstellung gegenläufig.**

Die maximal mögliche Leistung nimmt in der Reihenfolge anaerob-alkalotisch (Spaltung der energiereichen Phosphate) → anaerob-laktotisch (anaerobe Glykolyse, unvollständiger Glukoseabbau) → aerobe Glykolyse (vollständige Glukoseverbrennung) → Fettverbrennung ab, die mögliche Belastungsdauer in gleicher Reihenfolge zu.



Gehen wir nun genauer auf die einzelnen Mechanismen der Energiebereitstellung ein.

1. Anaerob-alkalotische Energiebereitstellung :

Wie bereits festgestellt, kann die mittels der "energiereichen Phosphate" (ATP, Kreatinphosphat) direkt verfügbare chemische Energie am schnellsten umgesetzt werden und ermöglicht damit die höchstmögliche Leistung. Jedoch ist diese Energiequelle sehr klein und reicht nur für kurze Zeit, nämlich 6 bis 10 (max. 15) Sekunden. Sie ist entscheidend für Maximal- und Schnellkraft sowie Schnelligkeit (Beispiele: 100m-Sprint, Gewichtheben, Kugelstoßen, Hochsprung usw.)

Die dabei verbrauchten energiereichen Phosphate sind aber auch sehr rasch wiederhergestellt (je nach Trainingszustand nach einigen Sekunden bis wenigen Minuten).

Seit einigen Jahren ist in Kraft- und Sprintsportarten die hochdosierte Einnahme von Kreatin üblich, um dadurch den Kreatinphosphatspeicher der Muskulatur zu vergrößern und damit die Leistung zu steigern. [siehe [KREATIN IM SPORT](#)]

2. Anaerob-laktazide Energiebereitstellung (Anaerobe Glykolyse) :

Dieser für die Kraftausdauer und Schnelligkeitsausdauer entscheidende Mechanismus stellt die nötige Energie für eine sehr intensive, maximal mögliche Leistung zwischen 15 und 45 (max. 60) Sekunden zur Verfügung. Für eine rein alaktazide Energiegewinnung ist in diesem Fall die Belastungsdauer bereits zu lang, für eine Mitbeteiligung der aeroben Glukoseverbrennung ist sie zu kurz und die Belastungsintensität zu hoch.

Dabei wird die aus dem Muskelglykogen stammende Glukose unvollständig abgebaut, wobei *Laktat* ("Milchsäure", genauer: das Anion der Milchsäure) entsteht, das sich infolge der Protonenbildung (H^+) in der beanspruchten Muskulatur anhäuft. Es kommt zu einer metabolischen Azidose ("Übersäuerung"), die nicht nur schmerzhaft, sondern letztendlich leistungslimitierend ist, da im sauren Milieu (die Grenze liegt bei einem pH von 7) durch eine Enzymhemmung die Muskelkontraktion gehemmt wird - man ist "blau", wie es im Fachjargon heißt.

Bei der anaeroben Glykolyse werden aus dem Abbau von 1 mol Glukose zu 2 mol Laktat nur 2 mol ATP gewonnen. Bei vollständiger Oxidation von 1 mol Glukose (siehe unten bei Punkt 3) werden 38 mol ATP gewonnen.

Für die, die es genauer wissen wollen:

Für die Übersäuerung (Azidose) ist die Bildung von Protonen (so nennt man die positiv geladenen Wasserstoffionen = H^+) verantwortlich.

Die weitverbreitete Auffassung, dass es die Bildung von Laktat sei, die für die metabolische Azidose verantwortlich ist, stimmt nicht. Richtiger ist es, von einer Azidose durch Milchsäurebildung zu sprechen, wenngleich auch das biochemisch nicht ganz korrekt ist, weil im anaeroben Energiestoffwechsel die Milchsäure nicht als solche, sondern in ihrer dissoziierten Form gebildet wird (Milchsäure = $Laktat^- + H^+$).

Laktat und Protonen entstehen also zu gleichen Teilen. Laktat ist somit nicht für die muskuläre Übersäuerung verantwortlich, vielmehr kann es als Anion der Milchsäure der Azidose sogar entgegenwirken, weil die Umwandlung von Pyruvat zu Laktat durch die Laktatdehydrogenase (LDH) einen Teil der Protonen aufnimmt, die bei der Umwandlung von Glukose zu Pyruvat freigesetzt werden. Laktat wirkt in diesem Fall sogar als Puffer. Eine weitere Freisetzung von Protonen tritt bei der Hydrolyse von ATP auf. Mit zunehmender Belastungsintensität und damit Energieflussrate kommt es durch die Glykolyse zu einer gesteigerten ATP-Hydrolyse und einer zunehmenden Protonenfreisetzung im Zytosol der Muskelzelle. Wenn deren Pufferkapazität erschöpft ist, kommt es zur Azidose.

Die zunehmende Laktatproduktion ist somit eine Folge und nicht die Ursache der metabolischen Azidose. Laktat ist also ein guter indirekter Marker für den veränderten Zellstoffwechsel, der zu einer Azidose führt, aber es ist nicht für diese verantwortlich.

[siehe "Belastungsbedingte metabolische Azidose: Woher kommen die Protonen?" von Robert A. Robergs und Markus Amann, Österr. Journal für Sportmedizin 03/2003,

siehe <http://biochemie-crashkurs.de/wp-content/uploads/2014/08/Muskelkater-Protonen.pdf>,

Zusammenfassung auf <https://www.bisp-surf.de/discovery/Record/PU200401000028>]

Klassisches Beispiel hierfür ist der 400m-Lauf (wo die Athleten auf den letzten Metern durch die extreme Übersäuerung auffallend langsamer werden), weiters der 500m-Eisschnellauf, das 1000m-Bahnzeitfahren, aber auch ein langgezogener Endspurt im Langstreckenlauf.

400m-Sprinter erreichen aufgrund ihrer großen anaeroben Kapazität und Säuretoleranz die höchsten Laktatwerte überhaupt (bis zu 30 mmol/l). Da die Protonen aus dem "sauren" Muskel in den Kreislauf gelangen, kommt es zu einer kurzzeitigen extremen Übersäuerung des Organismus, die normalerweise nicht mit dem Leben vereinbar wäre (metabolische Azidose mit pH-Werten im Blut bis knapp unter 7.0, im beanspruchten Muskel kann der lokale pH-Wert kurzfristig bis auf 6.4 absinken) [siehe auch [THEMA "ÜBERSÄUERUNG"](#)]

Nach Abbruch der anaeroben Ausbelastung spürt man aber durch Abpufferung und respiratorische Kompensation der Azidose ein rasches Nachlassen des "Muskelbrennens". Gleichzeitig wird das angehäuften Laktat nach Belastungsende parallel zu den Protonen (Laktat/ H^+ -Kotransport) innerhalb von Minuten wieder beseitigt, indem der in der Muskulatur verbleibende Anteil via Umwandlung zu Pyruvat aerob verstoffwechselt (vollständig verbrannt) wird. Das in den Blutkreislauf ausgeschwemmte Laktat wird einerseits von der

Herzmuskulatur und auch vom Gehirn (!) zur Energiegewinnung herangezogen, andererseits in der Leber und in unbelasteter Muskulatur über Glukose zu Glykogen aufgebaut. (Übrigens: Laktat hat nichts mit der Entstehung eines "Muskelkaters" zu tun, wie manche immer noch meinen.)

Laktat ist somit kein "Abfallprodukt", sondern dient sowohl der Energiespeicherung als auch als Energielieferant.

Deshalb ist es wichtig, nach einer intensiven anaeroben Belastung diese für mehrere Minuten langsam ausklingen zu lassen (Auslaufen, Ausradeln...), da damit der Laktat- bzw. Säureabbau und damit die muskuläre Erholung wesentlich rascher bewerkstelligt wird als im Falle körperlicher Ruhe. Man nennt dies *aktive Erholung*.

Intensive, mit "Übersäuerung" einhergehende Belastungen gehen zwangsläufig mit zunehmend vertiefter und beschleunigter Atmung einher (sog. Hyperventilation). Damit wird vermehrt CO₂ (und damit quasi Kohlensäure) abgeatmet, um einem weiteren Absinken des pH-Wert des Blutes entgegenzuwirken. Man nennt das die respiratorische Kompensation einer metabolischen Azidose (In diesem Fall einer Laktat-Azidose).

Auch nach Belastungsende ist die Atmung noch eine Zeitlang gesteigert, um die "Sauerstoffschuld" zu kompensieren.

3. Aerobe Energiebereitstellung (Glukose- und Fettsäureoxidation) :

Dieser Mechanismus der ATP-Gewinnung kommt bei den Ausdauersportarten zum Tragen, bei denen die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max) entscheidend ist.

[siehe [DIE MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME ALS BRUTTOKRITERIUM FÜR DIE AUSDAUERLEISTUNGSFÄHIGKEIT](#)]

Dauert die körperliche Belastung einer größeren Muskelgruppe länger als 90 Sekunden, beginnt die aerobe (=oxidative) Energiegewinnung die entscheidende Rolle zu spielen (Wie schon oben erwähnt, beginnt die Fettverbrennung nicht erst nach einer halben Stunde).

Es werden immer die beiden Nährstoffe Kohlenhydrate und Fette als Energielieferanten herangezogen ("*Die Fette verbrennen im Feuer der Kohlenhydrate*": damit ist die gemeinsame Bildung von Acetyl-CoenzymA gemeint, welches in den Citratzyklus eingeschleust wird), wobei je nach Belastungsintensität ein fließender Übergang in der anteilmäßigen Energiebereitstellung besteht, der vor allem vom Trainingszustand abhängt.

Bei sehr intensiven aeroben Anforderungen (z.B. 5000m-Lauf) werden so gut wie ausschließlich Kohlenhydrate (in Form von Glykogen bzw. Glukose), bei extensiveren, längerdauernden Belastungen (z.B. im Straßenradrennsport) umso mehr Fettsäuren verbrannt.

Bei intensiven Ausdauerbelastungen wird die Glukose zum Teil unvollständig verbrannt, ist also auch die anaerobe Glykolyse zu einem gewissen Prozentsatz an der ansonst aeroben Energiebereitstellung mitbeteiligt. In diesem Fall müssen sich aber Laktatbildung (anaerob) und Laktatabbau (aerob) die Waage halten, um eine Übersäuerung zu vermeiden. Dies entspricht dann der individuell maximal möglichen Intensität, die über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden kann, der sog. "Schwellenleistung" an der sog. anaeroben Schwelle (genauer: *aerob-anaerobe Schwelle* bzw. *Dauerleistungsgrenze*), dem entscheidenden Kriterium im Ausdauersport. Die anaerobe Schwelle wird oft mit 4 mmol/l Laktat angegeben, dies ist jedoch nur ein Durchschnittswert, weshalb sie im Leistungssport individuell ermittelt werden sollte (Bei z.B. MarathonläuferInnen oder Radrennsportlern liegt die Dauerleistungsgrenze meist deutlich unter 4 mmol/l, bei Untrainierten meist darüber).

Bei zu hoch gewählter Belastungsintensität (oberhalb der anaeroben Schwelle) würde die zunehmende muskuläre Übersäuerung mit entsprechender Anhäufung von Protonen und damit auch Laktat (Laktatbildung größer als Laktatelimination) zum vorzeitigen Abbruch der Belastung zwingen (siehe Punkt 2).

Eine Laktabestimmung hat bei der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im wettkampfmäßig betriebenen Ausdauersport eine Bedeutung, nicht aber im Breitensport.

Die muskulären Glykogenreserven sind bei intensiver Dauerbelastung je nach Trainingszustand nach 60 bis 90 Minuten weitgehend erschöpft. Bei Fortsetzung der Ausdauerbelastung ist der Muskelstoffwechsel nun auf eine vermehrte Fettverbrennung angewiesen, wobei diese Energiebereitstellung mehr Sauerstoff benötigt und nur halb so schnell wie bei der oxidativen Glukoseverbrennung erfolgt (niedrigere Energieflussrate, siehe oben). Das hat zur Folge, dass in der Regel eine Verminderung der Belastungsintensität (z.B. der Laufgeschwindigkeit) notwendig ist (Der berühmte "Mann mit dem Hammer" z.B. bei einem Marathonlauf, den man sich nicht gut eingeteilt hat bzw. wenn man auf eine regelmäßige Kohlenhydratzufuhr "vergessen" hat [siehe [TRINKEN IM SPORT](#)]). Noch schlimmer ist es, wenn durch ungenügende oder "vergessene" Kohlenhydratzufuhr auch der Glykogenspeicher der Leber zur Neige geht, weil es dann zu einem Abfall des Blutzuckerspiegels kommt. Dies kann zu einem "Hypo" (=Hypoglykämie, BZ unter 50mg/dl) führen, das in Radsportkreisen als "Hungerast" bekannt und gleichermaßen gefürchtet ist, weil es einen "Schwächeanfall" bewirkt [Erklärung: Der Blutzuckerspiegel wird durch den Glukosestoffwechsel der Leber aufrechterhalten (Glykogenolyse und Glukoneogenese). Das in den Muskelzellen gespeicherte Glykogen wird "vor Ort" verbraucht und trägt nichts zur Blutzucker-Homöostase, also zur Aufrechterhaltung des Blutglukosespiegels bei].

Die entleerten Glykogenspeicher der Muskulatur werden bei entsprechender Ernährung (kohlenhydratreich) und v.a. durch eine Kombination aus Kohlenhydraten mit hohem glykämischen Index [siehe [DER GLYKÄMISCHE INDEX...](#)] und Proteinen innerhalb der ersten zwei Stunden nach Belastung ("open window"), je nach Trainingszustand innerhalb von ein (bei gutem Trainingszustand und kohlenhydratreicher Kost) bis drei Tagen wieder aufgefüllt.

Um die Kapazität der muskulären Glykogenreserven vor einem Ausdauerwettkampf zu erhöhen ("Kohlenhydrat-Laden", "Tapering", Glykogen-Superkompensation), gibt es verschiedene Methoden, die man allerdings vorher ausprobieren muss. Zum Beispiel wird 6 bis 7 Tage vor dem Wettkampf durch eine intensive Trainingseinheit von ca. eineinhalb Stunden der muskuläre Glykogenspeicher geleert. Die nachfolgenden 3 bis 4 Tage wird die Muskulatur durch weitgehend kohlenhydratfreie Kost sowie weiterem Training regelrecht "ausgehungert" und anschließend ein bis zwei Tage bis zum Wettkampf mit ausgiebiger Kohlenhydratnahrung "gefüttert". Da ein Training unter kohlenhydratarmer Ernährung verständlicherweise nicht jedermanns Sache ist, gibt es auch eine weniger radikale Methode: Muskuläre Glykogen-Depletion am 4. Tag vor dem Wettkampf und dann 3 Tage kohlenhydratreiche Ernährung bis zum Wettkampf.

Unsere praktisch unerschöpflichen Fettreserven ermöglichen ultralange Ausdauerleistungen, die natürlich mit entsprechend niedriger Intensität ausgeführt werden müssen. Beispiele: Der Triple-Iron Man-Triathlon oder - noch extremer - das Race Across America (RAAM) <http://www.meneweger.at>

Bei Ausdauerbelastungen, die länger als eine Stunden dauern, ist ein gut trainierter Fettstoffwechsel entscheidend, damit er trotz der relativ langsamen Energiebereitstellung eine möglichst hohe Belastungsintensität bei gleichzeitiger Einsparung der wertvollen Glykogenreserven ermöglicht.

Abschließend noch ein paar Worte zu den Muskelfasertypen:

Man unterscheidet grob die langsam zuckenden "roten" von den schnell zuckenden "weißen" Muskelfasern.

Erstere sind durch ihren Gehalt an Myoglobin (rotem Muskelfarbstoff), das Sauerstoff speichern kann, sowie Mitochondrien ("Kraftwerke der Zelle", in denen die oxidative Verbrennung von Glukose und Fettsäuren stattfindet) und oxidativen Enzymen (Biokatalysatoren für die aerobe Glukose- und Fettverbrennung) auf die aerobe Energiebereitstellung und damit Ausdauerleistungen spezialisiert.

Die "schnellen" Muskelfasern hingegen sind gekennzeichnet durch einen hohen Gehalt an energiereichen Phosphaten und Enzymen, die diese spalten sowie Glykogen auch ohne Sauerstoff abbauen können und damit auf die anaerobe Energiebereitstellung, also Kraft und Schnelligkeit, spezialisiert.

Etwas genauer:

1. Typ I-Fasern = ST-Fasern: "langsame" bzw. "langsam zuckende" Muskelfasern (slow twitch) mit hoher Ermüdungsresistenz, hoher Konzentration an ATPase, relativ niedrigem Glykogengehalt und niedriger Konzentration an SDH (Succinatdehydrogenase) sowie neben oben erwähntem Myoglobingehalt auch einer hohen Anzahl an Mitochondrien (den "Kraftwerken der Zelle", in denen die oxidative Verbrennung von Glukose und Fettsäuren stattfindet). Sie finden sich vorwiegend in der "roten" Muskulatur und besitzen eine gute Energieversorgung durch eine gute Kapillarisation. Sie werden bei lang durchgeführten Bewegungen mit geringer Kraftentwicklung eingesetzt.
2. Typ II-Fasern: umgekehrtes Enzymmuster, weitere Unterscheidung in
 - Typ IIA-Fasern = FT-Fasern: "schnelle" bzw. "schnell zuckende" (fast twitch) Fasern mit hoher Ermüdungstendenz, hohem Gehalt an glykolytischen und oxidativen Enzymen, die bei länger ausgeführten Kontraktionen mit relativ hoher Kraftentwicklung benötigt werden.
 - Typ IIB-Fasern: schnelle, leicht ermüdbare Fasern mit hohem Glykogen- und niedrigem Mitochondriengehalt. Ihre Energiebereitstellung erfolgt sehr rasch, v.a. über die Glykolyse, wichtig für kurze bzw. intermittierende Belastungen mit hoher Kraftentwicklung.
 - Typ IIC-Fasern: sog. Intermediärfasern, die zwischen Typ I und II einzuordnen sind und je nach Training eher Typ I- oder eher Typ II-Eigenschaften entwickeln.

Allerdings muss gesagt werden, dass die Beziehung zwischen der histochemischen und der funktionellen Einteilung relativ locker zu sehen ist.

Das Verhältnis zwischen diesen Muskelfasertypen scheint weitgehend genetisch festgelegt zu sein und hält sich bei den meisten Menschen die Waage. Allerdings konnte bei farbigen Sprintern ein deutliches Überwiegen der schnellzuckenden Fasern festgestellt werden, was die Hypothese untermauert, dass man zum Sprinter geboren sein muss (Tatsächlich gibt es nur wenige weiße Weltklassesprinter).

Durch spezifisches Training kommt es zu einer funktionellen Anpassung der entsprechenden Muskelfasertypen (*selektive Hypertrophie*). So führt Ausdauertraining zu einer besseren Sauerstoffverwertung der "roten" Fasern und damit zu einer Verbesserung der VO_{2max} .

[siehe [DIE MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME ALS BRUTTOKRITERIUM FÜR DIE AUSDAUERLEISTUNGSFÄHIGKEIT](#)]. Die Hypertrophie der "weißen" Fasern bewirkt eine entsprechende Steigerung von Kraft und Schnelligkeit.

Eine echte Umwandlung zwischen "rot" und "weiß", sprich Typ I- und Typ II-Fasern ist nach dem derzeitigen Wissensstand nicht möglich. Es gibt aber die bereits genannten "intermediären" Muskelfasern, die zwar den schnell zuckenden Fasern ähnlich sind, aber auch "langsame" Eigenschaften besitzen und durch Ausdauertraining zu "roten" Fasern umgewandelt werden können. Die Tatsache, dass viele MittelstreckenläuferInnen im Lauf der Jahre auf immer längere Distanzen (bis zum Marathon) umsteigen, unterstreicht diese Beobachtung und zeigt die jahrelange Entwicklung im Ausdauersport auf, in dem man erst nach vielen Jahren des aufbauenden, konsequenten Trainings den individuellen Leistungszenit erreicht. Dafür kann man dieses Niveau noch relativ lange aufrecht erhalten (Man erinnere sich: 1984 wurde Carlos Lopez mit 38 Jahren Olympiasieger im Marathonlauf - mit einer Zeit von 2 Stunden 8 Minuten!).

Der umgekehrte Fall, nämlich die Umwandlung von "rot zu weiß" ist offensichtlich nicht möglich, die motorische Grundeigenschaft Schnelligkeit nimmt (wie auch die Kraft) mit zunehmendem Alter ab. Bis dato ist noch kein Langstreckenläufer zum Sprinter geworden.

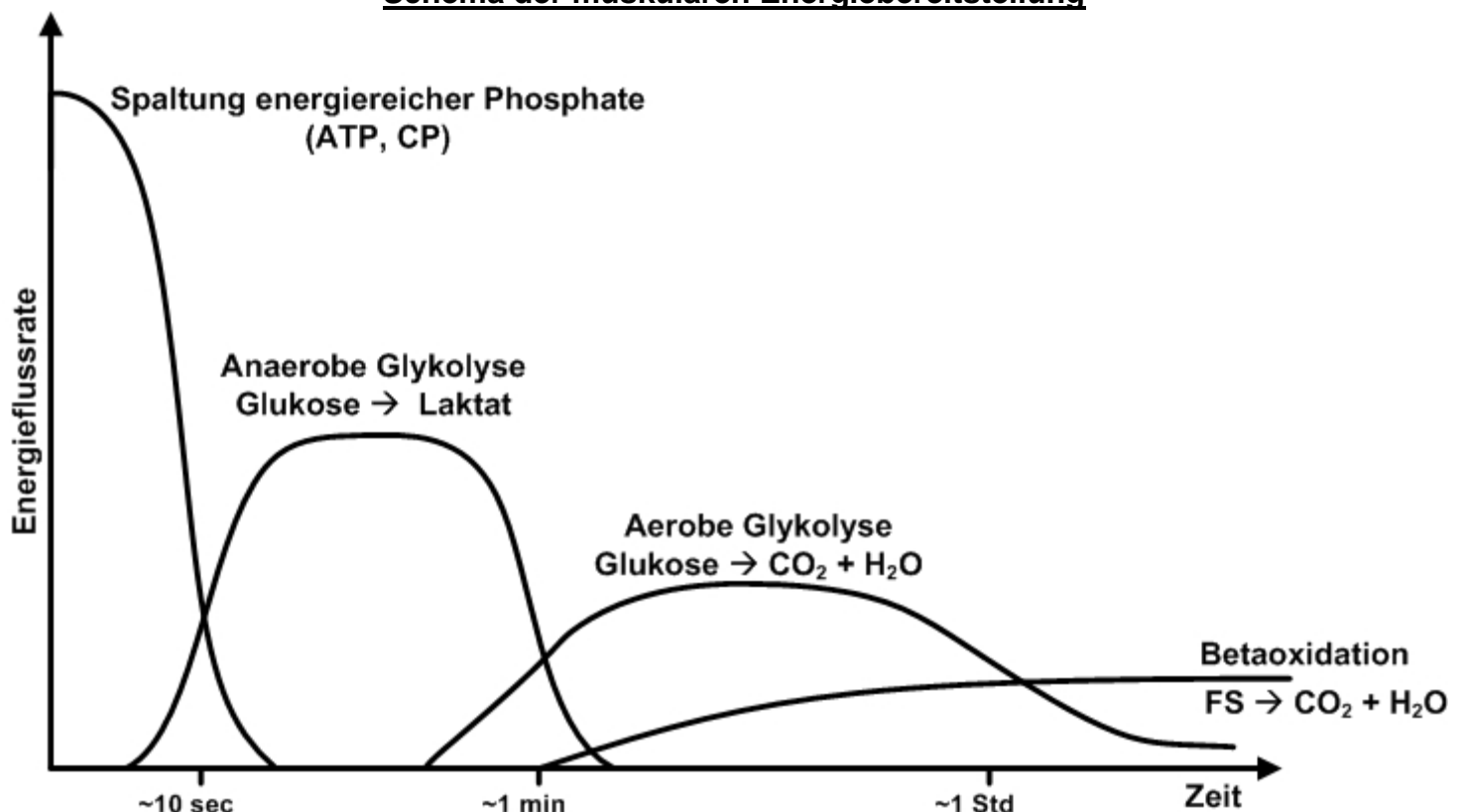
Anteilmäßige muskuläre Energiebereitstellung in Prozent (Durchschnittswerte, individuelle Schwankungen)

	Betaoxidation	Glykolyse aerob	Glykolyse anaerob	Kreatinphosphat
24-Std-Lauf	ca. 88	Muskelglykogen ca. 10 Leberglykogen (Blutglukose) ca. 2		
Doppelmarathon	ca. 60	Muskelglykogen ca. 35 Leberglykogen (Blutglukose) ca. 5		
Marathon	ca. 20	Muskelglykogen ca. 75 Leberglykogen (Blutglukose) ca. 5		
10000 m		ca. 95 - 97	ca. 3 - 5	
5000 m		ca. 85 - 90	ca. 10 - 15	
1500 m		ca. 75	ca. 25	
800 m		ca. 50	ca. 50	
400 m		ca. 25	ca. 60 - 65	ca. 10 - 15
200 m		ca. 0 - 10	ca. 60 - 70	ca. 20 - 30
100 m			ca. 30 - 50	ca. 50 - 70

Das Wichtigste

- Bei Muskelarbeit wird chemische Energie (ATP) in mechanische Energie und Wärme umgewandelt.
- Je höher die Energieflussrate (ATP-Bildung pro Zeit), desto höher die Leistung.
- Intensität und Dauer der maximal möglichen Leistung verhalten sich gegenläufig.
- Die Nährstoffe Kohlenhydrate und Fette sind unsere Energiespeicher, die je nach Intensität und Dauer der körperlichen Belastung auf unterschiedliche Art zur Energiegewinnung herangezogen werden.
- Jede Sportart benötigt eine spezifische Energiebereitstellung, die mit dem Muskelfasertyp zusammenhängt.
- Die Energiebereitstellung im Muskelstoffwechsel ist abhängig vom Trainingszustand und zum Teil auch von der Ernährung.
- Je besser der Fettstoffwechsel trainiert ist, desto sparsamer kann die Muskulatur mit den wertvollen Glykogenreserven umgehen.

Schema der muskulären Energiebereitstellung



Interessanter Link mit aktueller Information:

www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2003/pressemitteilung20031002/

Dr. Kurt A. Moosburger

www.dr-moosburger.at

Innsbruck, im November 1994 (veröffentlicht im SPORTMAGAZIN Jan. 1995)
(zuletzt überarbeitet im Dezember 2009)