Referats Handout

„Energiebereitstellung für muskuläre Arbeit“

Franz Lukasch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung....3
2 Die Energiespeicher....3
2.1 ATP....3
2.2 Kreatinphosphat (KP)....3
2.3 Glykogenspeicher zur Speicherung von Kohlenhydraten....4
2.3.1 Glykogenspeicher der Leber....4
2.3.2 Glykogenspeicher der Muskulatur....4
2.4 Fettspeicher....4
3 Die aerobe Energiebereitstellung....5
3.1 Die aerobe Energiegewinnung aus Glykogen....5
3.2 Die aerobe Energiegewinnung aus Fettsäuren....7
3.3 Verhältnis zwischen Fett- und Glykogenverwertung....8
4 Die anaerobe Energiegewinnung....10
4.1 Anaerobe Energiegewinnung aus energiereichen Phosphaten....10
4.2 Anaerobe Energiegewinnung aus Glukose....11
5 Vergleich der verschiedenen Energiebereitstellungsformen....13
6 Regeneration....14
6.1 Regeneration energiereicher Phosphate (ATP, Kreatinphosphat)....14
6.2 Regeneration durch Laktat Abbau....15
6.3 Regeneration der Glykogenspeicher....16
6.4 Regeneration der Fettspeicher....16
6.5 Hungerstoffwechsel....17
7 Einfluss der Ernährung auf die Energiespeicher....18
8 Literatur....19

1 Einführung

Jede Zelle im menschlichen Körper, egal ob es sich um Nervenzellen, die elektrische Impulse übertragen, oder Muskelzellen, die mechanische Arbeit leisten handelt benötigt Energie, um die ihr zugedachte Aufgabe zu erfüllen. Der Energieträger, der von der Zelle verwertet werden kann, wenn sie Energie benötigt ist ATP (Adenosintriphosphat). Verbraucht eine Zelle Energie, zerfällt ATP in ADP (Adenosindiphosphat) und einen Phosphatrest. Dabei wird Energie frei, die die Zelle nutzen kann. Bei Muskelzellen ist der Nutzen die muskuläre, also mechanische Arbeit. Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung liegt größenordnungsmäßig bei ca. 25-40%. Der Rest der Energie wird als Wärme abgegeben. Auch im Ruhezustand (z.B. Schlaf), oder bei geringen muskulären Aktivitäten (z.B. Büroarbeit) benötigen die Zellen ATP. Da nur ein sehr begrenzter Vorrat an ATP in den Muskeln gespeichert wird, muss ständig für Nachschub gesorgt werden. Der Nachschub erfolgt in Form von Regeneration von ADP zu ATP. Sämtliche energieliefernden Prozesse zielen darauf ab, das ATP aus dem ADP zu regenerieren. Der menschliche Körper gewinnt die notwendige Energie, die zur Regeneration des ATP notwendig ist überwiegend aus der aeroben (unter Verbrauch von Sauerstoff) Oxidation von Fetten und Kohlenhydraten, oder im Notfall (Hungerphasen) auch durch den Abbau von Eiweiß. Es existieren aber auch Mechanismen, die kurzfristig wesentlich höhere Energieflussraten (ATP Umsatz pro Zeit) ermöglichen, wie z.B. die anaerobe Verwertung von Kohlenhydraten oder die Spaltung von Kreatinphosphat für höchste Flussraten.

2 Die Energiespeicher

Für die Regeneration von ATP aus ADP wird Energie benötigt, die der menschliche Körper in verschiedenen Formen speichern kann.

2.1 ATP

Der ATP Vorrat in den Muskeln ist nur für einige wenige Kontraktionen ausreichend, und bei Belastung nach wenigen Sekunden verbraucht. Der ATP Vorrat in den Muskeln beträgt ca. 6 mmol/kg Muskel, was einem Energievorrat von ca. 1-2 kcal in der gesamten Muskulatur entspricht (abhängig vom Trainingszustand). Dabei entspricht 1 mol ATP 7,71 kcal.

2.2 Kreatinphosphat (KP)

Neben dem reinen ATP Vorrat, der sehr schnell erschöpft ist, ist in den Muskelzellen noch Kreatinphosphat (PCr oder KP) gespeichert. Die beim Zerfall des PCr in Kreatin und einen Phosphatrest frei werdende Energie wird dazu benutzt, aus dem Phosphatrest und ADP wieder ATP zu synthetisieren. Dies ist die schnellste Art der ATP Regeneration für den Muskel, wird aber durch den sehr limitierten KP Vorrat begrenzt. Der Vorrat an KP (25mmol/kg Muskel - einige kcal.) reicht belastungsabhängig bei hoher Belastung für knapp 10 Sekunden (Größenordnung) und variiert je nach Trainingszustand. Jeder Muskel hat seinen eigenen PCr Vorrat, wobei der PCr Vorrat der nicht arbeitenden Muskulatur unberührt bleibt.

2.3 Glykogenspeicher zur Speicherung von Kohlenhydraten

Der Körper kann Kohlenhydrate zur mittelfristigen Energieversorgung in Form von Glykogen, einem aus Glukosemolekülen aufgebauten Polysaccharid speichern. Ist ein Überschuss an Glukose vorhanden, der durch den Abbau von Kohlenhydraten nach einer Mahlzeit entsteht, kann dieser in Form von Glykogen in der Leber und in der Muskulatur mit Hilfe des Insulin gespeichert werden. Dabei haben diese beiden Energiespeicher unterschiedliche Aufgaben:

2.3.1 Glykogenspeicher der Leber

Der Glykogenspeicher der Leber wird dazu verwendet, die Glukosekonzentration (Blutzuckerspiegel) auf einem konstanten Level zu halten. Während das Insulin den Blutzuckerspiegel senkt, indem es den Aufbau von Glykogen fördert, bewirkt eine zu niedrige Glukosekonzentration im Blut die Ausschüttung von Glukagon, was die Leber dazu veranlasst, Glukose aus ihrem Glykogenspeicher zu synthetisieren und ins Blut abzugeben. Ein gewisser Glukosespiegel ist wichtig, weil nicht jeder Zelltyp wie z.B. die Muskelzellen ihren eigenen Speicher besitzen. Das ZNS (Zentralnervensystem) ist auf diese Art der Energieversorgung angewiesen, zumal der Glukoseabbau dessen einzige Möglichkeit ist, Energie zu gewinnen. (In langen Hungerperioden kann ein Teil der Versorgung auch durch Ketonkörper erfolgen) Die aus dem Glykogenspeicher der Leber stammende Energie steht über den Blutkreislauf dem gesamten Körper zur Verfügung und wird aerob in den einzelnen Zellen durch Verbrennung der Glukose gewonnen. In der Leber sind ca. 100g Glykogen gespeichert, was in etwa 410 kcal. entspricht. Durch Training lässt sich dieser Wert erheblich steigern.

2.3.2 Glykogenspeicher der Muskulatur

Die Muskulatur besitzt ihren eigenen Glykogenspeicher. Dies ist notwendig, weil die sie im Bedarfsfall rasch relativ viel Energie benötigt. Der Weg über den Blutkreislauf dauert dafür zu lange. Die Glykogenreserven der Muskulatur belaufen sich auf ca. 300-400g, was ca. 1400 kcal entspricht (Abhängig von Gewicht und Trainingszustand). Diese Energiereserve reicht für ca. 1 Stunde intensive Belastung. Je nach Intensität kann sich dieser Zeitraum entsprechend verlängern oder verkürzen. Die Glykogenspeicher der Muskulatur können ausschließlich dem Muskel, in dem sie gespeichert sind Energie zuführen. Die muskulären Glykogenspeicher können keine Glukose in den Blutkreislauf abgeben.

2.4 Fettspeicher

Während die Glykogenspeicher des Körpers bei Belastung relativ bald erschöpft sind, stellen die Fettspeicher einen quasi unerschöpflichen Energievorrat bereit. Dabei sind in einem g Fett 9,3 kcal. gespeichert, was ca. die doppelte Energiemenge von Kohlenhydraten oder Eiweiß ist. (4,1kcal) Nicht nur die Speicherdichte, auch die Menge ist wesentlich höher als die des Glykogens : Ein 70kg schwerer Mann mit einem Körperfettanteil von 12% speichert 8,4kg Fett und damit 76440 kcal. Der Speicherort dieser Reserven ist das Unterhautfettgewebe. Auch in der Muskulatur ist eine geringe Menge Fett eingelagert (ca. 100-200g), die bei Bedarf ebenfalls verbrannt werden kann. Der Nachteil an diesem riesigen Energievorrat ist, dass er nur eine etwa halb so große Energieflussrate wie der des Glykogenabbaus erlaubt, und zudem auch mehr Sauerstoff verbraucht. Außerdem benötigt der Abbau dieser Reserven einen geringen aber stetigen Glukosestoffwechsel (=Kohlenhydratverbrauch)

3 Die aerobe Energiebereitstellung

Die aerobe Energiebereitstellung erfolgt in den Mitochondrien der Zellen. Dort werden Kohlenhydrate oder Fettsäuren zu Kohlendioxid abgebaut und der daraus entstehende Wasserstoff zu Wasser verbrannt (Knallgasreaktion). Die frei werdende Energie wird verwendet, um ATP aus ADP zu regenerieren.

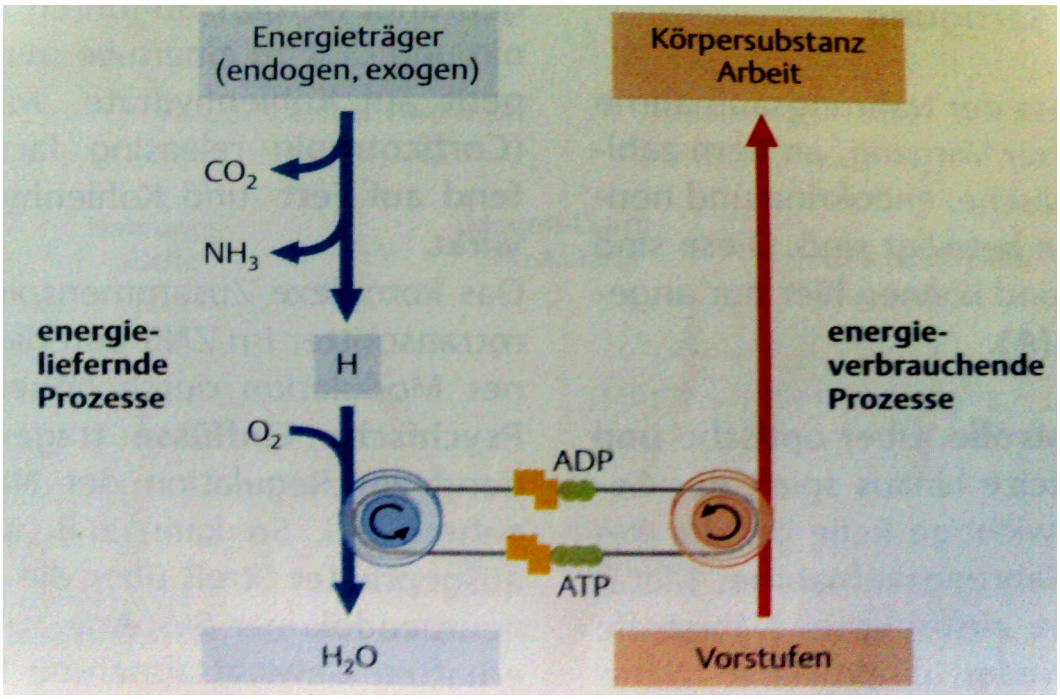


Abb 3.1 - ATP Regeneration durch energieliefernde Prozesse - aus [1]

Der limitierende Faktor ist vor allem der Sauerstoff, der durch die Lunge aufgenommen wird, und in genügendem Ausmaß vorhanden sein muss. Die maximale aerobe Dauerleistung wird also durch die maximale Oxidationsrate von Wasserstoff in der Atmungskette, was der maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit entspricht, bestimmt. Erhöht man die muskuläre Leistung, dauert es einige Zeit, bis sich das aerobe System den höheren Anforderungen angepasst hat, und Puls und Atmung entsprechend erhöht hat. Während dieser Zeit erfolgt ein Teil der Energiebereitstellung anaerob (ohne Sauerstoff). Die Leistung kann kurzfristig auch über die maximale aerobe Kapazität hinaus erhöht werden. Die benötigte Mehrleistung wird dann ebenfalls durch anaeroben Stoffwechsel erbracht. Der aerobe Stoffwechsel ist sehr viel effizienter als der anaerobe in Bezug auf die Gewinnung von ATP / g Glykogen bzw. Fettsäure.

3.1 Die aerobe Energiegewinnung aus Glykogen

Ein gewisser Teil der Energieversorgung wird immer durch aeroben Glukosestoffwechsel gewährleistet. Dabei wird entweder nach einer kohlenhydrathaltigen Mahlzeit die Glukose aus dem Blut verwendet, oder es wird die Leber über das Hormon Glukagon dazu veranlasst, aus ihrem Glykogenspeicher Glukose zu bilden und in den Blutkreislauf zu entlassen. Dies ist deswegen notwendig, weil das Zentralnervensystem Energie nicht aus Fettsäuren, sondern nur aus Glukose (und zur Not aus Ketonkörpern) gewinnen kann. Die Zellen können die Glukose aus dem Blut aufnehmen und mit einer Bildungsrate von 0,4mmol/min ATP regenerieren. Da die Regenerationsrate von ATP durch Glukose aus dem Leberglykogenspeicher relativ langsam ist, und die Muskeln einen eigenen, viel größeren Glykogenspeicher besitzen, spielt das Leberglykogen für

die muskuläre Energiebereitstellung eine untergeordnete Rolle. Die Muskeln können aus ihrem eigenem Glykogenspeicher ATP mit einer Rate von ca. 1mmol/min aerob regenerieren. Dies ist die höchstmögliche Energieflussrate, die noch aerob erreicht werden kann. Da der Vorrat an muskeleigenem Glykogen begrenzt ist, und der Muskel nur seine eigenen Glykogenspeicher anzapfen kann, und nicht den der nicht arbeitenden Muskulatur, wird auf diese Reserven nur zurückgegriffen, wenn derart hohe Energieflussraten benötigt werden. Wird deutlich weniger ATP pro Zeit benötigt, wird die Energie vorzugsweise aus Fettsäuren gewonnen.

Die Verwertung von Glukose findet in 2 Schritten statt: Zuerst wird die Glukose zur Brenztraubensäure (Pyruvat) abgebaut. Für diesen Vorgang, der pro mol Glukose 2 mol ATP benötigt, und 4 mol ATP generiert, ist noch kein Sauerstoff erforderlich (Glykolyse). Danach wird die Brenztraubensäure über den Zwischenschritt des Acetyl-CoA in den Zitronensäurezyklus (=Krebs Zyklus) eingeschleust, der mit der Atmungskette unter Verbrauch von Sauerstoff weitere 32-34mol ATP pro mol Glukose liefert. Diese weitere Verarbeitung unter Zuhilfenahme von Sauerstoff findet in den Mitochondrien der Zellen statt.

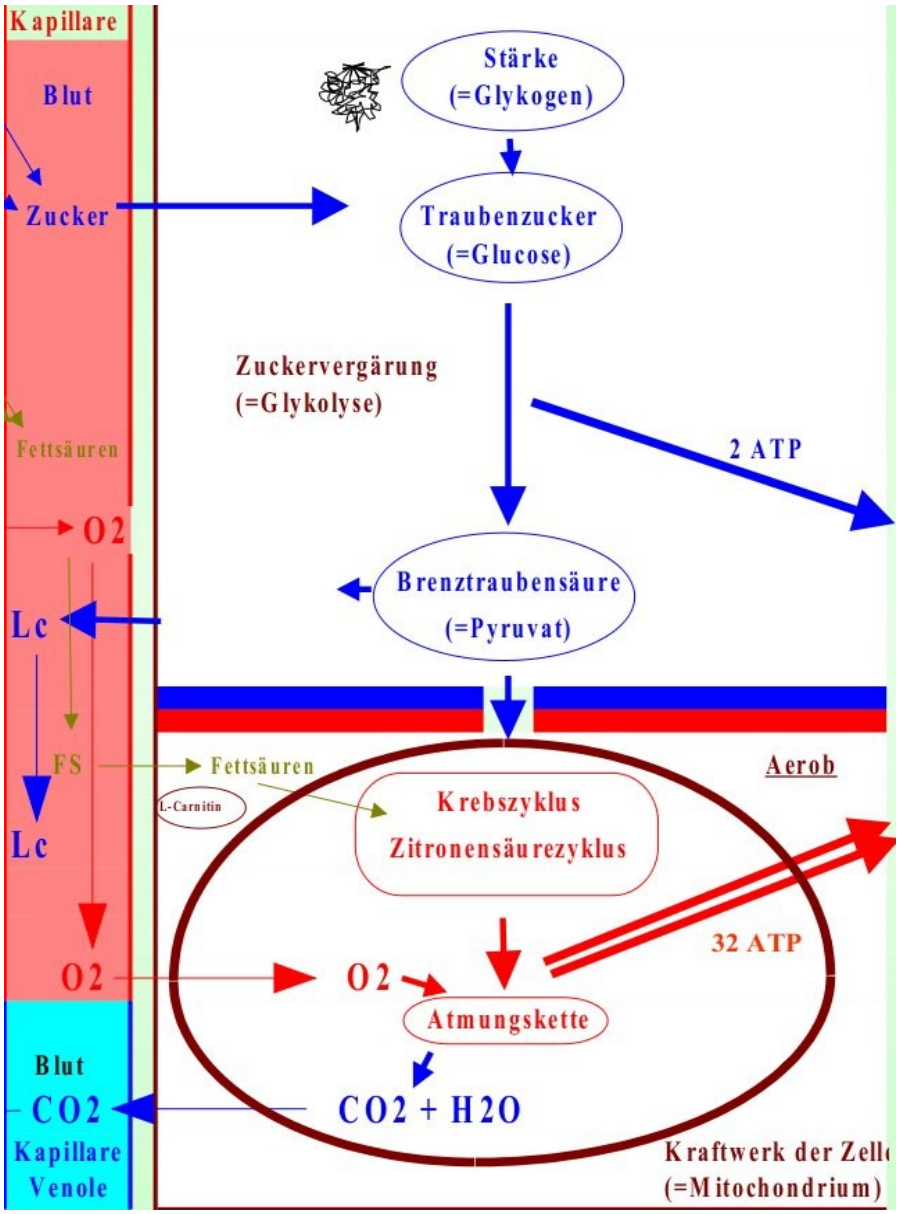


Abb. 3.1.1 – ATP Ausbeute aus der Glykolyse und der nachfolgenden aeroben Verbrennung von Glukose. (Grafik aus [2])

3.2 Die aerobe Energiegewinnung aus Fettsäuren

Fette werden bei Bedarf in den Fettdepots des Körpers durch Lipolyse in ihre Bestandteile zerlegt, wobei Fettsäuren ins Blut abgegeben werden. Diese Fettsäuren können nur aerob von den Zellen verwertet werden. Dabei werden sie wie auch die Glukose in Acetyl-CoA umgewandelt um in den Zitronensäurezyklus eingeschleust werden zu können. Zur Umwandlung in Acetyl-CoA benötigt der Körper aktiviertes Glyzerin. Da jedoch ein Enzym im Fettgewebe fehlt, kann das bei der Lipolyse entstehende Glyzerin (durch Abspaltung der 3 Fettsäuren) nicht für diesen Zweck verwendet werden. Deshalb ist die Fettverbrennung auf die Glykolyse (Erster Schritt bei der Verwertung von Kohlenhydraten) angewiesen, aus der das benötigte Glyzerin stammt. Der Körper kann daher seine Energie nicht ausschließlich aus der Verwertung von Fetten beziehen.

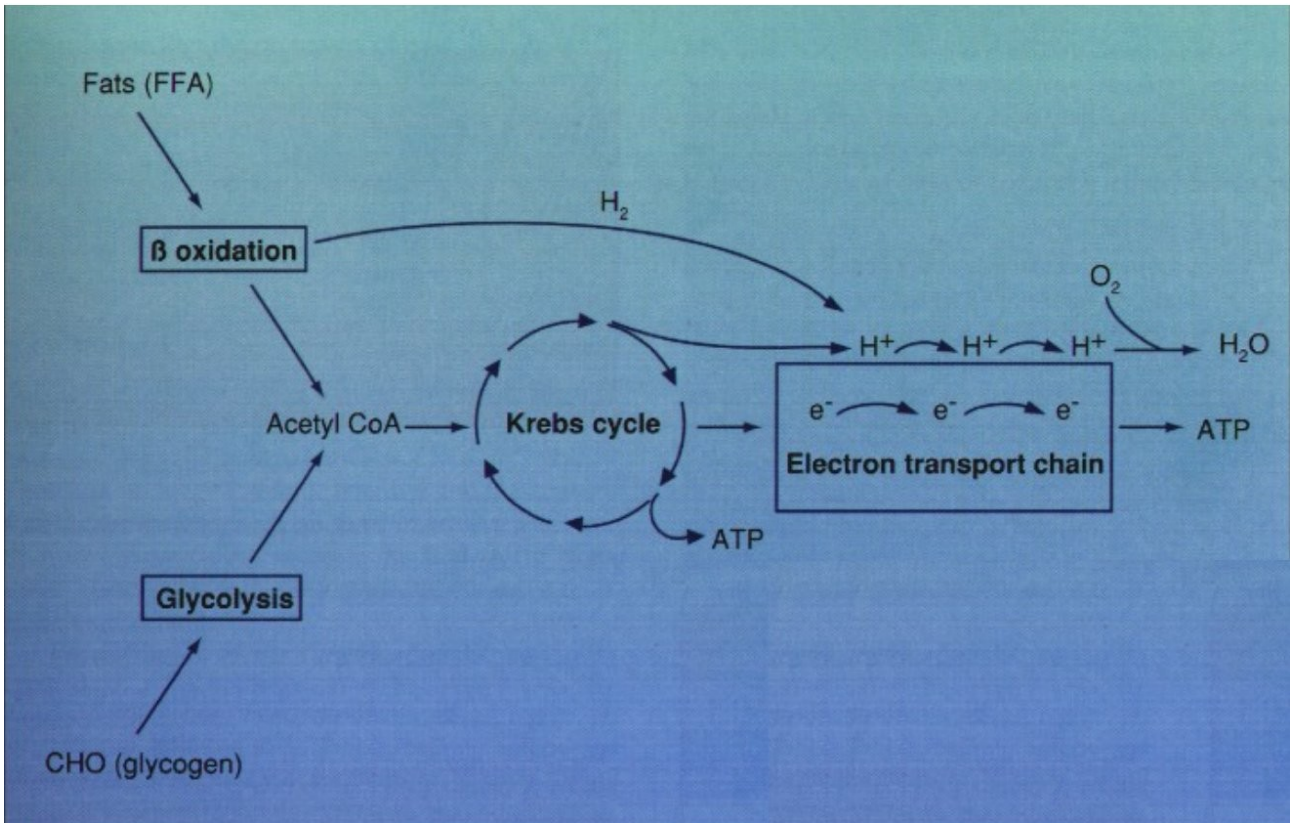


Abb. 3.2.1 – Aerobe Verwertung von Fettsäuren (aus [3])

Im Ruhezustand oder bei gleich bleibender Muskeltätigkeit von geringer Intensität (z.B. Spaziergang) erfolgt die Energiebereitstellung überwiegend durch die aerobe Verbrennung von freien Fettsäuren aus dem Blut (Beta Oxydation), sofern die letzte Mahlzeit schon etwas zurück liegt. Die Glykogenspeicher werden für Phasen höherer Leistung gespart, da die Fettreserven nahezu unerschöpflich sind. Die für die Fettverbrennung notwendige Glykolyse wird aus der Glukose im Blut, und daher vom Leberglykogen gespeist. Die ATP Bildungsrate liegt bei der Verbrennung von Fettsäuren bei 0,4mmol/min. Neben Phasen geringer Belastung, spielt die Energiegewinnung aus Fetten auch nach länger andauernden mittleren und höheren Belastungen (>60-90 min) die entscheidende Rolle. Wenn die muskulären Glykogenspeicher zur Neige gehen, muss auf Fettverbrennung umgeschaltet werden. Da die Fettsäuren weniger intramolekularen Sauerstoff besitzen, wird für deren vollständige Verbrennung mehr Sauerstoff benötigt. Für Phasen mittlerer Belastung bedeutet dies, dass kurzfristig ein Leistungseinbruch spürbar ist (bzw. wird es schwerer die Leistung zu erbringen) bis das aerobe System sich den erhöhten Sauerstoffanforderungen für die Fettverbrennung angepasst hat. Für hohe Belastungen nahe an der maximalen Sauerstoffaufnahmegrenze (VO2max) bedeutet das eine Reduktion der Leistung um 10-15%.

3.3 Verhältnis zwischen Fett- und Glykogenverwertung

Abb. 3.3.1 zeigt das Verhältnis der Energieträger bei einer Belastung von 25% VO2max. Deutlich zu sehen ist der hohe Anteil der Fettverwertung (Plasma FFA) in Form von freien Fettsäuren. Eine untergeordnete Rolle spielen die Fettreserven direkt in der Muskulatur (Muscle Tg) und die Glukose aus dem Blut, die durch Glykogenabbau in der Leber synthetisiert wird. (Plasma Glucose). Der Anteil des Glykogen bleibt dabei über die gesamte Zeit von 120 Minuten annähernd konstant. Der muskeleigene Glykogenspeicher wird bei dieser Art der Belastung nicht angegriffen.

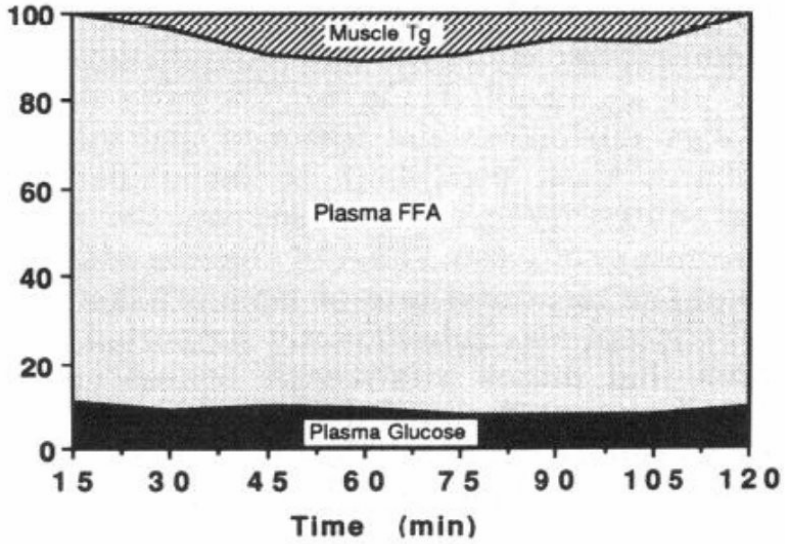


Abb. 3.3.1 – Verhältnis der Substrate bei einer Belastung von 25% VO2max (aus [4])

Abb. 3.3.2 zeigt das Verhältnis der Energieträger bei einer Belastung von 65% VO2max. Bei dieser Art der Belastung haben zunächst der muskuläre Glykogenspeicher (Muscle Glycogen) und die freien Fettsäuren im Blut (Plasma FFA) den größten Anteil der Energiebereitstellung. Auch der Anteil der muskeleigenen Fettreserven (Muscle Tg) ist deutlich höher. Mit Fortschreiten der Zeit erschöpft sich der muskelinterne Glykogenspeicher und der Anteil der Fettverwertung steigt an. Die Energiegewinnung aus der Blutglukose spielt wieder nur eine untergeordnete Rolle, wobei auffällig ist, dass sie mit zunehmender Erschöpfung der Muskelglykogenspeicher und dem damit verbundenen Energieengpass etwas ansteigt.

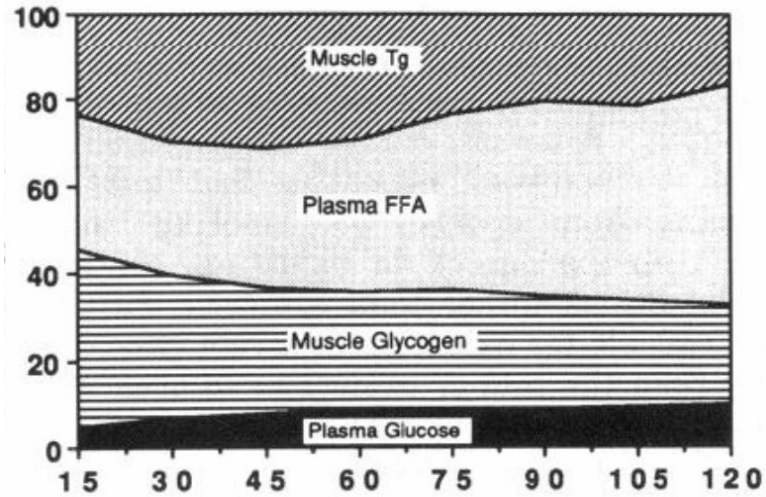


Abb. 3.3.2 – Verhältnis der Substrate bei einer Belastung von 65% VO2max (aus [4])

Abb. 3.3.3 zeigt den Anteil der Energieträger bei verschiedenen Belastungen. Deutlich zu sehen ist, dass bei höheren Belastungen der Anteil des Muskelglykogens eine entscheidende Rolle spielt, während die Fettverbrennung immer weiter zurückgeht.

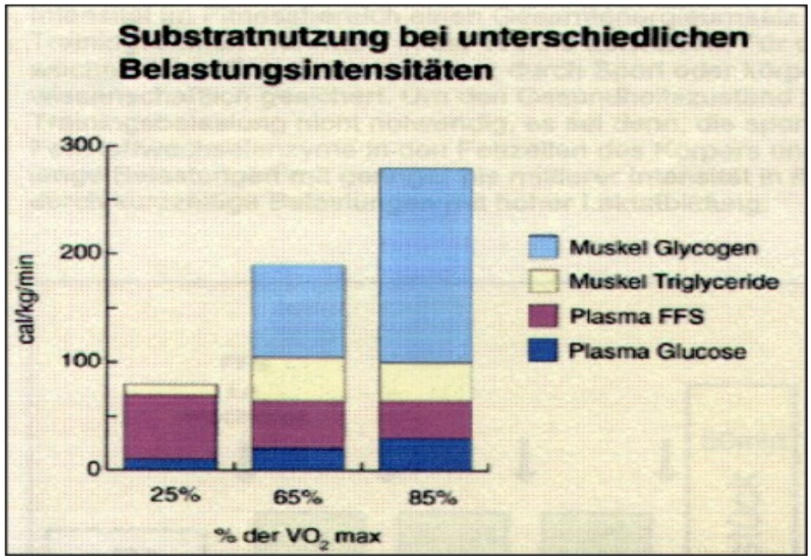


Abb. 3.3.3 – Vergleich der Energieträgernutzung bei unterschiedlichen Belastungen nach 30 Minuten (aus [4])

Allgemein kann man sagen, dass der Anteil der Fettverbrennung bei niedrigen und lang andauernden Belastungen am höchsten ist. Bei höheren Belastungen werden die Glykogenspeicher der arbeitenden Muskulatur zusätzlich genutzt. Gehen die muskulären Reserven an Glykogen und Fett zurück, werden wieder verstärkt Fettsäuren aus dem Blut, die durch Lipolyse in den Fettspeichern z.B. der Unterhaut entstehen verbrannt. Das Verhältnis der Energieträger wird vor allem bei niedriger Belastung nach Kohlenhydratzufuhr auf Grund des Überangebotes zu Gunsten des Glukoseabbaus das direkt aus der Nahrung stammt verändert.

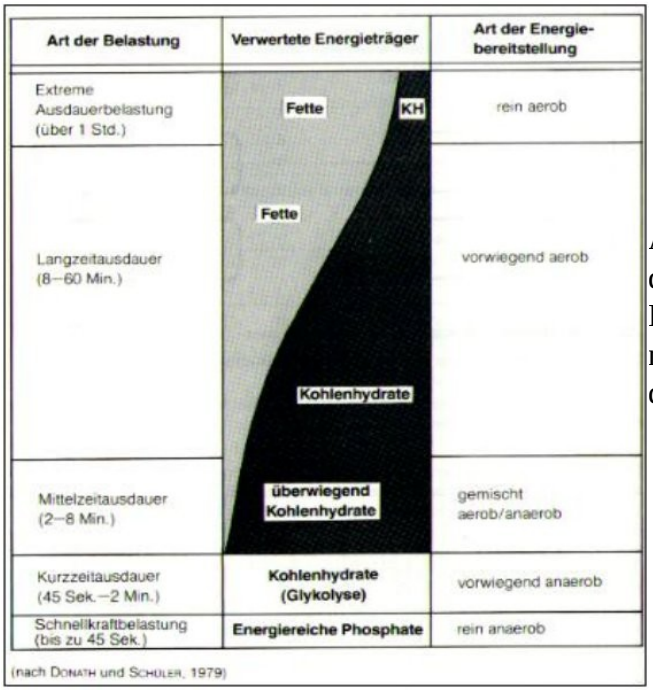


Abb. 3.3.4 zeigt den Übergang in der Nutzung der verschiedenen Energieträger zur Energiegewinnung. Bei steigender Belastung reicht die aerobe Kapazität nicht mehr aus, und das anaerobe System muss einspringen.

Abb. 3.3.4 (aus [3])

4 Die anaerobe Energiegewinnung

Die anaerobe Energiegewinnung kommt immer dann zum tragen, wenn nicht genug Sauerstoff zur Verfügung steht. Dies ist immer solange der Fall, bis sich das aerobe System an die höhere Belastung angepasst hat (durch Erhöhung des Pulses und der Atemfrequenz) oder wenn die benötigte Energieflussrate höher ist als die maximal aerob erzielbare. (Leistung über VO2max)

4.1 Anaerobe Energiegewinnung aus energiereichen Phosphaten

Im Muskel ist eine gewisse Menge an Kreatinphosphat (PCr) gespeichert, dass nach Erschöpfung des muskelinternen ATP Vorrats schnell ATP aus ADP regenerieren kann. Dabei wird die Phosphatgruppe des Kreatinphosphat auf das ADP übertragen, und es entsteht Kreatin und ATP.

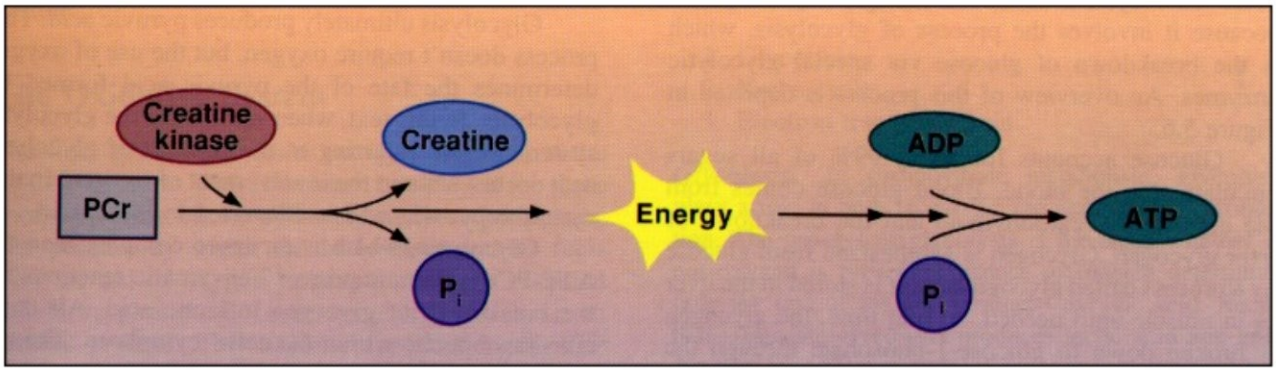
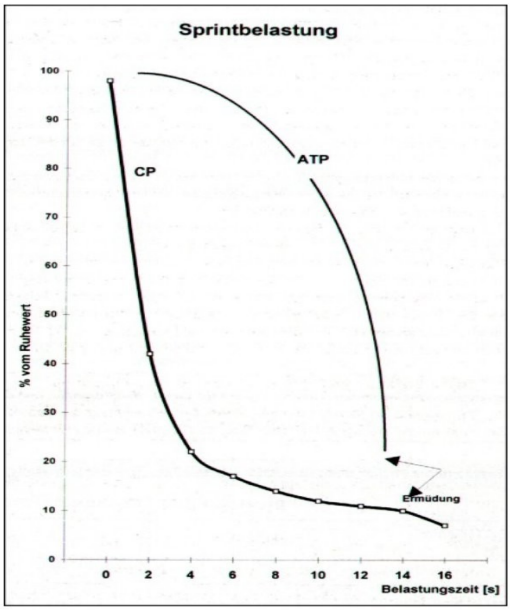


Abb. 4.1.1 – Regeneration von ATP durch Kreatinphosphat (aus [3])

Die ATP Resyntheserate liegt bei diesem Vorgang bei ca. 4,4mmol/min, und ist damit die schnellste Form, ATP zu gewinnen. Nachdem zu Beginn einer Belastung je nach Intensität die Kreatinphosphatreserven innerhalb von ca. 10 Sekunden verbraucht sind, aber das aerobe System innerhalb dieser Zeit noch nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung stellen kann, muss die Energiegewinnung aus einem anderen anaeroben Prozess erfolgen. Die anaerobe ATP Regeneration aus Kreatinphosphat kann also nur für wenige Sekunden Höchstleistungen erbringen.



Bei höchsten Belastungen ist die Kreatinphosphatreserve innerhalb weniger Sekunden verbraucht. Sie kann durch entsprechendes Training und ev. durch Kreatinsupplementierung etwas vergrößert werden.

Abb. 4.1.2 ATP und KP Erschöpfung (aus [3])

4.2 Anaerobe Energiegewinnung aus Glukose

Sind die Kreatinphosphatspeicher der Muskulatur erschöpft, und steht immer noch nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung (z.B. am Beginn einer Belastung) wird auf die anaerobe Metabolisierung von Kohlenhydraten zurückgegriffen. Dies wird durch die Glykolyse bewerkstelligt, die auch den ersten Schritt bei der aeroben Verwertung bildet, da diese noch ohne Sauerstoff möglich ist. Für die Glykolyse werden pro mol Glukose 2 mol ATP benötigt. Da am Ende 4 mol ATP anfallen, liefert die Glykolyse insgesamt 2 mol ATP. Die ebenfalls entstehende Brenztraubensäure (Pyruvat) kann nicht weiter ohne Sauerstoff verwertet werden, so dass sie in Milchsäure übergeführt wird. (Laktat als Anion der Milchsäure und H+ Protonen).

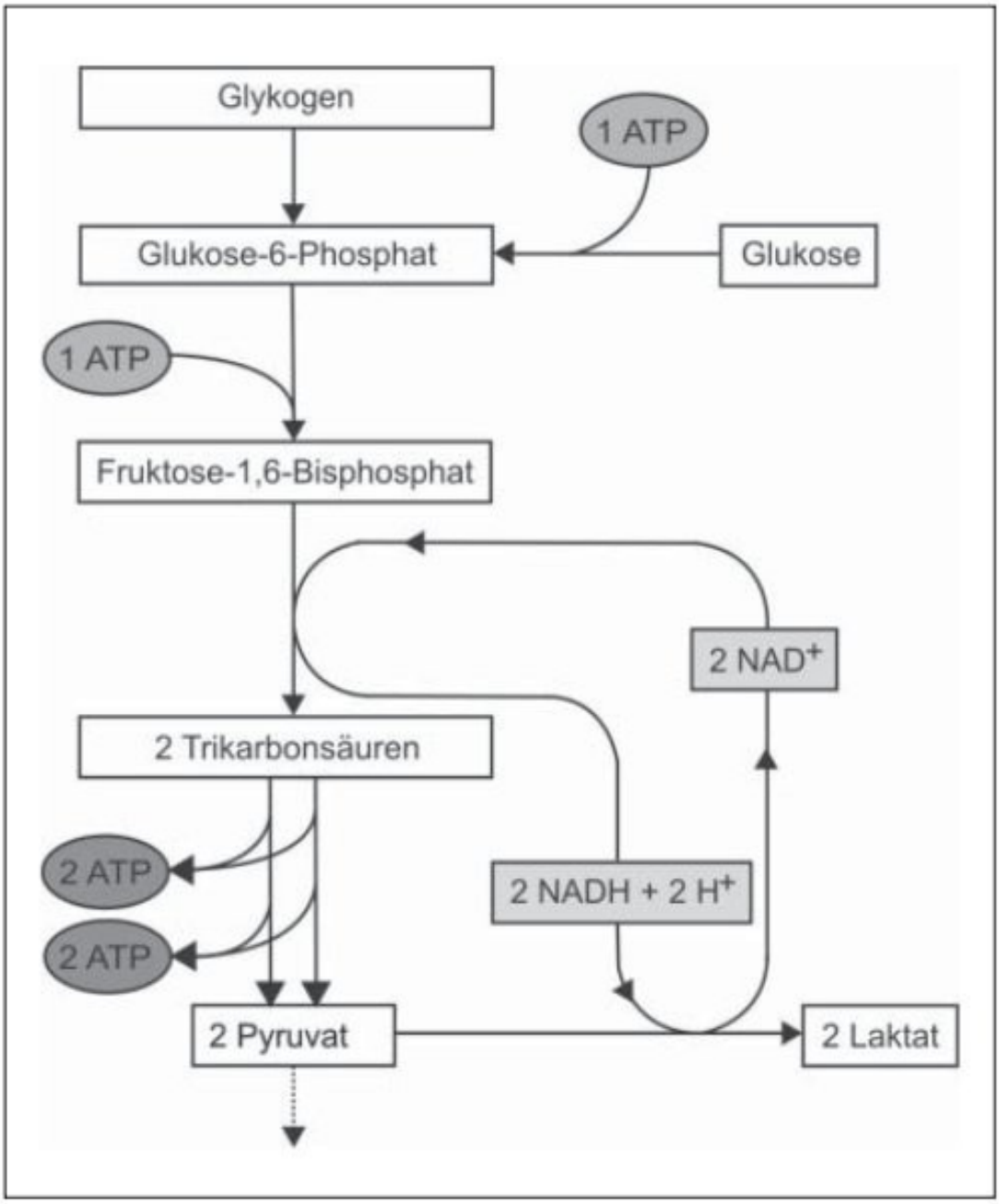


Abb. 4.2.1 – Glykolyse (aus [5])

Die Milchsäure besitzt noch relativ viel Energie, die jedoch ohne Sauerstoff nicht genutzt werden kann. Sie wird vom Muskel ins Blut abgegeben, der sich weiter nur mit Hilfe der Glykolyse und ohne den Zitronensäurezyklus und der Atmungskette versorgt. Der Vorrat an Kohlenhydraten wird aus dem muskelinternen Glykogenspeicher genommen, dessen Kapazität bei dieser Art der Verwertung (anaerob und laktazid = Unter Bildung von Laktat) nicht der limitierende Faktor ist. Durch anhaltende Belastung bei zu wenig Sauerstoff erfolgt eine Anhäufung von Laktat und H+ Protonen, die zu einem Sinken des PH-Wertes führen. Das Sinken des PH Wertes durch zunehmende Protonenkonzentration bewirkt eine Übersäuerung (Azidose) des arbeitenden Muskels. Da der Muskel die Milchsäure (in ihrer dissoziierten Form) in den Blutkreislauf abgibt, um dem Körper einen leichteren Abbau zu ermöglichen, kommt es zu einer kurzzeitigen Laktatüberschwemmung des ganzen Organismus.

Wird mehr Laktat gebildet, als der Körper abbauen kann kommt es zu einer zunehmenden Ermüdung des Muskels. Dieser Vorgang dauert je nach Belastung einige Minuten. Die maximal mögliche Energieflussrate beträgt bei der anaeroben laktaziden Verwertung 3mmol ATP/min.

Nach ca. 60-90 Sekunden ist das aerobe System soweit hochgefahren, dass ein Großteil der benötigten Energie von diesem bereitgestellt wird. (Immer unter der Voraussetzung die Belastung ist unterhalb der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität). Die Energie, die in Form des Laktats in den Blutkreislauf ausgeschüttet wurde geht dabei aber nicht verloren, sondern wird teilweise zur aeroben Energiegewinnung (z.B. im Herzmuskel) verwendet, oder von der Leber wieder zu Glykogen transformiert und gespeichert. Da die Energie aber aus dem muskelinternen Glykogenspeicher stammt, und die Energieausbeute für den Muskel pro Mol Glukose nur 2 mol ATP (statt 34 mol im aeroben Fall) beträgt, muss der Muskel mehr Glukose metabolisieren um die gleiche Arbeit verrichten zu können. Daher erschöpfen sich die muskulären Glykogenspeicher umso schneller, je höher der laktazide anaerobe Anteil an der Energiegewinnung ist.

Bei höheren Belastungen nimmt der laktazide Anteil immer mehr zu. Wenn die Belastung weiter steigt (über die maximale Sauerstoffaufnahmekapazität hinaus) fällt im Körper mehr Laktat an, als er abbauen kann. Dies ist auch als anaerobe Schwelle bekannt, bei der der Laktatspiegel bei konstanter Belastung nicht mehr konstant bleibt, sondern immer weiter steigt. Diese Schwelle ist sehr individuell und liegt bei ca. 4 mmol/l. Die aerobe Schwelle hingegen gibt Aufschluss über die maximale Dauerleistung, bei der der Laktatspiegel im Vergleich zum Ruhewert noch nicht erhöht ist (typ. 2mmol/l). Der Bereich dazwischen ist ein aerob/anaerober Mischbetrieb.

Nach einigen Minuten ermüdet die Muskulatur dann durch zunehmende Übersäuerung, die indirekt über einen hohen Laktatspiegel festgestellt werden kann. Eine Leistung, die 3mmol ATP/min erfordert, lässt sich daher nur wenige Minuten aufrecht erhalten. Das aerobe System (auch die Verbrennung von Fettsäuren) wird durch stark lakdaziden anaeroben Stoffwechsel deutlich behindert, was die Ermüdung noch beschleunigt. Nach Ende einer derartigen Belastung bleibt das aerobe System noch einige Zeit aktiv, um vermehrt CO2 abzuatmen, und um die entstandene Sauerstoffschuld auszugleichen.

5 Vergleich der verschiedenen Energiebereitstellungsformen

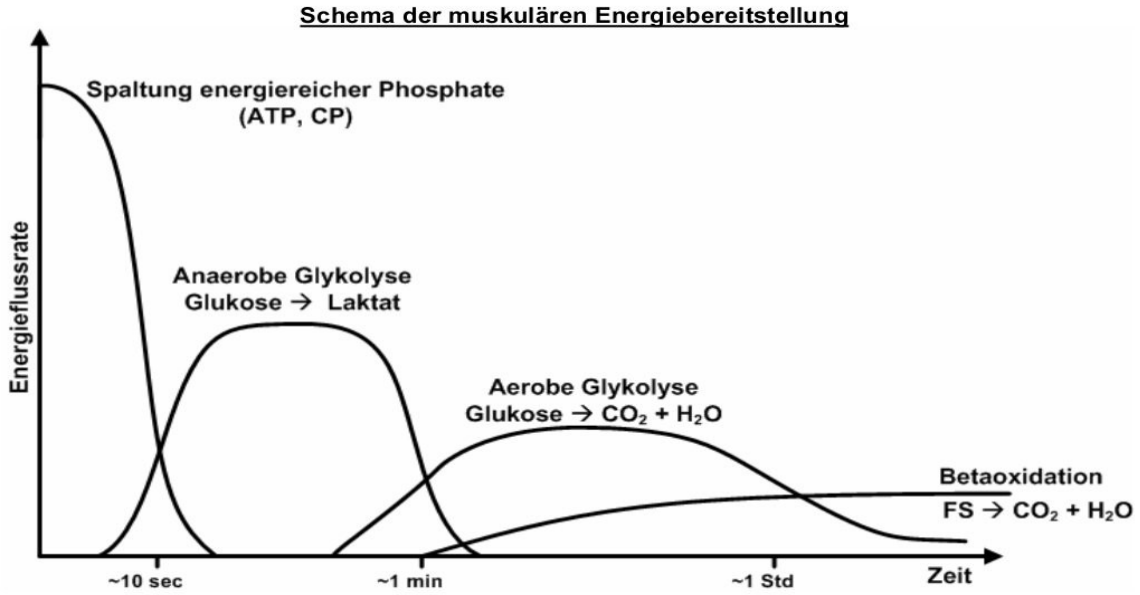


Abb. 5.1 – Schema der muskulären Energiebereitstellung (aus [6])

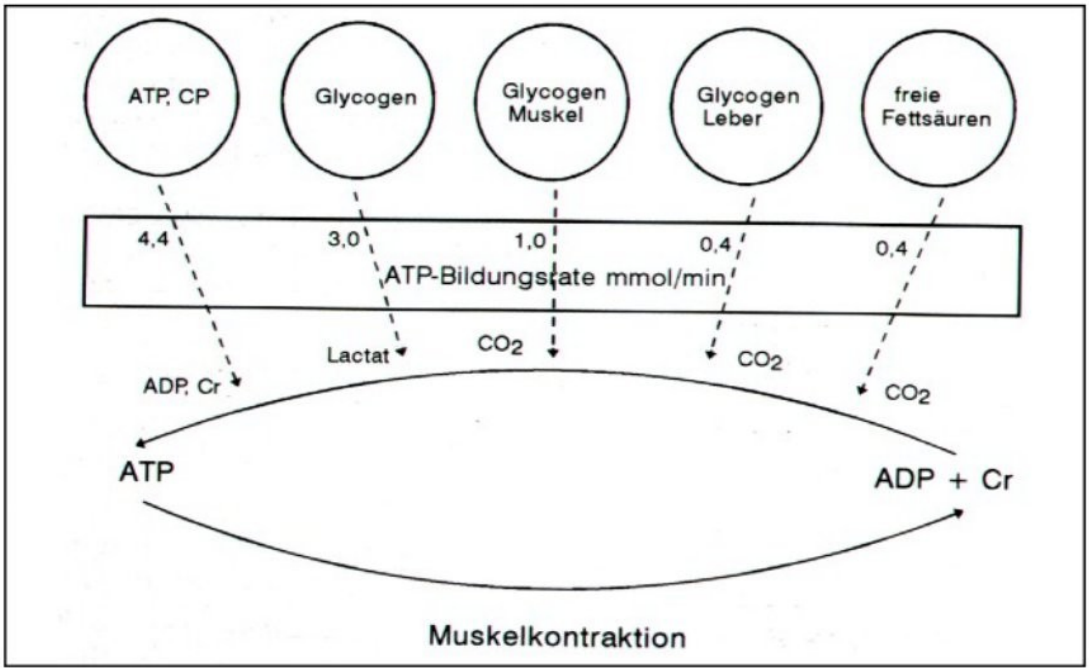


Abb. 5.2 – Vergleich der Energieflussraten (aus [3])

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei hohen Energieflussraten, also hoher Leistung, und in der Anfangsphase von mittleren Leistungen vermehrt anaerobe Prozesse zur Energiebereitstellung beitragen. Während bei mittlerer Belastung innerhalb ca. einer Minute das aerobe System den größten Teil der Energieleistung erbringt, wobei zuerst Glukose und nach ca. 1 Stunde vermehrt Fettsäuren verbrannt werden, reicht das aerobe System nicht für hohe Leistungen über der maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit. Hier trägt zwar auch das aerobe System einen Teil zur Energiebereitstellung bei, jedoch wird mit zunehmender Zeit der PH Wert durch anaerobe Prozesse gesenkt, und es kommt nach einigen Minuten zur Übersäuerung (Azidose), was zu einer raschen Ermüdung der Muskulatur führt. Eine starke Übersäuerung behindert auch das aerobe System. In Ruhephasen oder Phasen niedriger Belastung trägt die Betaoxidation (also die Verbrennung von Fettsäuren) den größten teil der Energieversorgung der Muskulatur.

6 Regeneration

Je nach Art der Belastung und des verwendeten Energiespeichers benötigt der Körper unterschiedlich viel Zeit, um seine Energiereserven zu regenerieren um wieder die volle Leistung zu erbringen.

6.1 Regeneration energiereicher Phosphate (ATP, Kreatinphosphat)

Die Regeneration von Kreatinphosphat verläuft nach Belastungsende äußerst schnell. Das Kreatinphosphat ist innerhalb von ca. 30 sec. zu 70% und nach ca. 3-5Minuten zu fast 100% regeneriert. Eine Erhöhung dieser Energiespeicher um ca. 50% kann durch Training erreicht werden, indem einige Sekunden intensiver Belastung mit einer mehrminütigen Pause abwechseln. Dabei ist darauf zu achten, dass die Pause lange genug dauert, um die Regeneration des Speichers zu ermöglichen und die Aktivierung des anaerob laktaziden Stoffwechsels zu verhindern. Eine Supplementierung mit Kreatin kann den Speicher ebenfalls um bis zu 20% erhöhen.

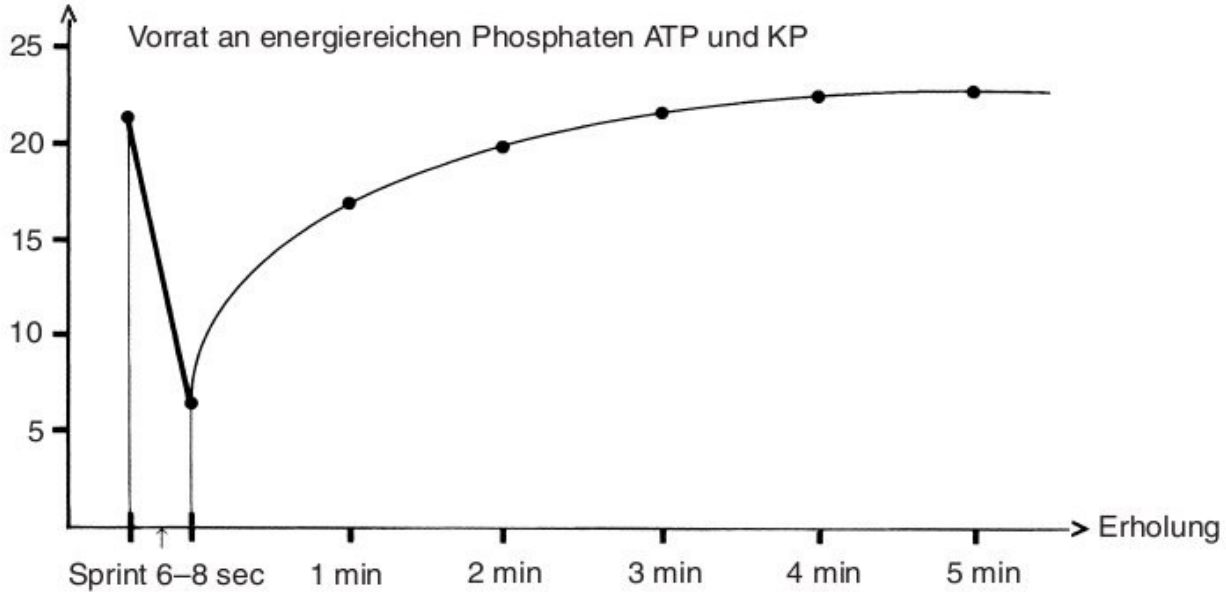


Abb. 6.1.1 – Verlauf der Kreatinphosphatregeneration (aus [7])

Eine leichte Belastung während der Regenerationsphase verzögert die Regeneration. (untere Kurve aus Abb. 6.1.2). Bei Entspannung erfolgt die schnellste Regeneration. Die dafür notwendige Energie stammt vorwiegend aus der aeroben Glukoseverbrennung aus dem Blut.

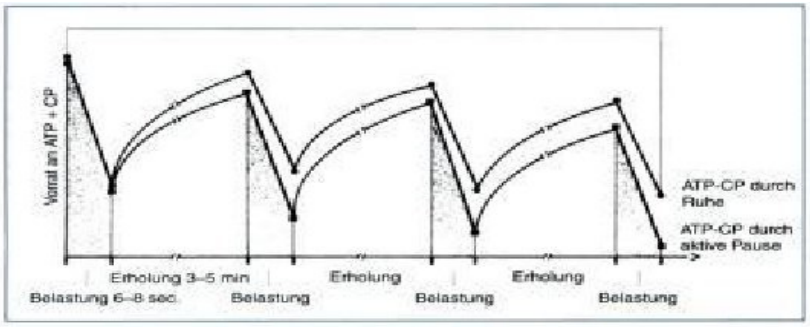


Abb. 6.1.2 – Regeneration bei Ruhe (oben) und leichter Belastung (aus [7])

6.2 Regeneration durch Laktat Abbau

Nach einer starken anaeroben laktaziden Belastung benötigt der Körper einige Zeit, um das entstandene Laktat wieder abzubauen, die Sauerstoffschuld zu begleichen und den PH Wert wieder auf Normalwerte zu bringen. Dabei wird das Laktat entweder wieder zu Glukose bzw. Glykogen zurückverwandelt, oder direkt für die Energiegewinnung genutzt. Es fällt daher dem Körper leichter, das Laktat abzubauen, wenn er weiterhin einen erhöhten Energiebedarf hat. Der Laktatabbau wird daher durch niedrige Belastungen nach der intensiven Belastung (z.B. auslaufen) beschleunigt. Die Halbwertszeit des Laktat ist abhängig von der Anfangskonzentration, die nach Belastungsende noch weiter steigen kann und beträgt zwischen 15 und 25 Minuten. Erholt man sich unter leichter aerober Belastung (ca. 40-50% der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität) kann der Laktatabbau erheblich beschleunigt werden.

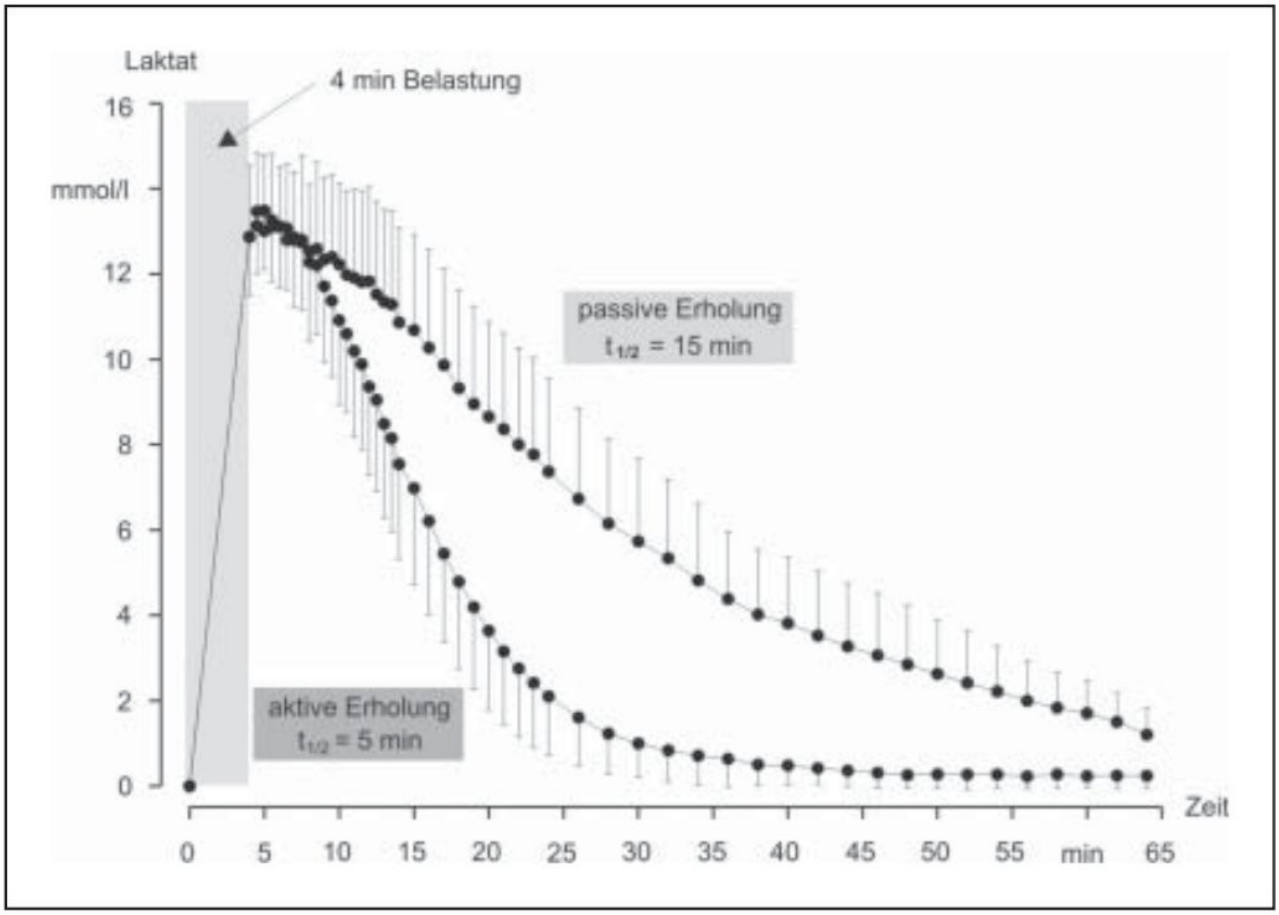


Abb. 6.2.1 – Laktatabbau bei Ruhe und leichter Belastung (aus [5])

Nach etwa ½ bis 1 Stunde ist das Laktat dann wieder weitgehend abgebaut. Da ein Muskelkater erst weit später (ca 24 Stunden), wenn die Laktatwerte schon lange wieder den Normalzustand erreicht haben, hat er nichts mit dem Laktat oder Milchsäure zu tun. Außerdem tritt er vermehrt bei Überbeanspruchung von ungeübter Muskulatur auf, und nicht bei geübten Sportlern, die teilweise sehr hohe Laktatwerte aufweisen.

6.3 Regeneration der Glykogenspeicher

Die Regeneration der Glykogenspeicher ist stark abhängig vom Grad ihrer Entleerung und der Nahrungsaufnahme. Das Leberglykogen ist bei völliger Entleerung nach max. 24h, das Muskelglykogen nach 1-3 Tagen wieder vollständig aufgefüllt. Dabei hat das Muskelglykogen Vorrang gegenüber dem Leberglykogen. Vor allem in der ersten Stunde nach Belastungsende ist die Resyntheserate am höchsten, wenn entsprechend Kohlenhydrate über die Nahrung aufgenommen werden. Für ein möglichst rasches Auffüllen der Speicher sind Lebensmittel mit hohem glykämischem Index besser geeignet, da sie schneller in den Blutkreislauf gelangen.

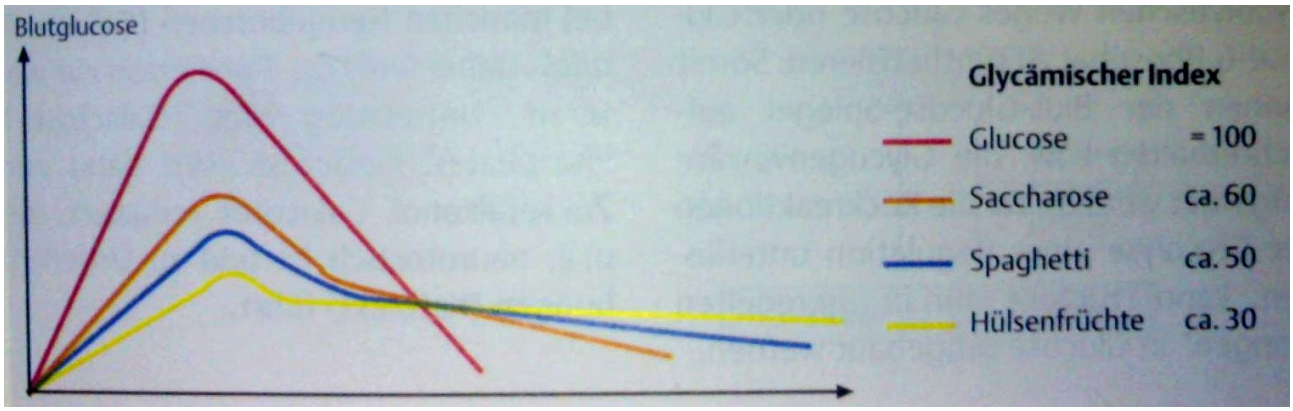


Abb. 6.3.1 – Blutglukosekonzentration in Abhängigkeit vom glykämischen Index (aus [1])

An belastungsfreien Tagen oder lange nach dem Training sollten hingegen Nahrungsmittel mit einem niedrigen bis mittleren glykämischen Index zugeführt werden, damit die Insulinreaktion nicht so heftig ausfällt und die Glukosekonzentration ein möglichst konstantes Level hat.

Selbst ohne dass Kohlenhydrate zugeführt werden liegt die Resyntheserate bei 1-2mmol/kg/h. Die Speicherrate der Muskulatur liegt in den ersten 12 Stunden nach der Belastung bei ca. 5-10 mmol / kg / Stunde. Bei stark laktaziden Belastungen können anfangs bis zu 25mmol/kg/h erreicht werden, wobei das Laktat nur in den ersten 10-20 Minuten einen entscheidenden Beitrag leistet. Die Resynthese von Glykogen ist daher von einer ausreichenden Kohlenhydratzufuhr abhängig. Da 1g Glykogen 3g Wasser bindet, kann der Unterschied zwischen vollen und leeren Glykogenspeichern bis zu ca. 2kg Körpergewicht betragen. Die Glykogenspeicher können durch entsprechendes Training (entleeren – auffüllen) und eine kohlenhydratreiche Ernährung erheblich vergrößert werden.

6.4 Regeneration der Fettspeicher

Die Fettspeicher haben die geringste Priorität. Sie werden erst dann aufgefüllt, wenn die Glykogenspeicher voll sind und daher Glukoseüberschuss besteht. Das kann nach einer exzessiven Erschöpfung einige Wochen in Anspruch nehmen. Eine Ernährung mit etwas erhöhtem Fettanteil beschleunigt diesen Prozess.

6.5 Hungerstoffwechsel

Bis einige Stunden nach einer kohlenhydrathaltigen Mahlzeit ist der Glukosespiegel im Blut erhöht (ca. 120mg/dl – abhängig von der Mahlzeit). Durch dieses Überangebot und den damit verbundenen erhöhten Insulinspiegel beziehen die Zellen ihre Energie fast ausschließlich aus Glukose. Die Glykogenspeicher der Leber und der Muskulatur speichern die überschüssige Glukose in Form von Glykogen. Bei vollen Glykogenspeichern wird die Glukose in Fett umgewandelt und gespeichert. Der Abbau von Glykogen und Fett ist durch das zu Gunsten des Insulins verschobene Insulin/Glukagon Verhältnis gehemmt. (Phase I)

Nach einigen Stunden sinkt der Glukosespiegel wieder, und der Körper schüttet Glukagon ins Blut aus, um die Leber dazu zu veranlassen, Glukose aus ihrem Glykogenspeicher ins Blut zu entlassen, um den Glukosespiegel auf ca. 70mg/dl aufrecht zu erhalten. Die Leber kann aus ihrem Speicher den Glukosespiegel für weitere 12 Stunden aufrecht erhalten. (Phase II) Während dieser Zeit schränken die Zellen (Leber, Muskulatur und Fettgewebe) ihre Energiegewinnung aus Glukose zunehmend ein und verwenden alternative Energieträger (z.B. Fett). Danach geht der Speicher zur Neige und der Körper muss vermehrt auf Glukoneogenese zur Glukosegewinnung umsteigen.

Alle Gewebe, die Fettsäuren verwerten können, beziehen bereits den Großteil der Energie aus der Fettverwertung. Über die Glukoneogenese synthetisiert der Körper vermehrt Glukose aus Aminosäuren, um den Glukosebedarf des ZNS zu decken. Werden diese Aminosäuren nicht in Form von Proteinen mit der Nahrung aufgenommen, verwendet der Körper vorhandene Proteine (z.B. aus der Muskelmasse) um den Bedarf zu decken, was mit einem Gewichtsverlust einhergehen kann. (Phase III)

Nach ca. 2 Tagen sinkt die Glukoneogeneserate wieder, da das ZNS, das vorwiegend die Glukose benötigt hat, seinen Energiestoffwechsel zunehmend auf die Verwertung von Ketonkörpern, einer im Blut transportablen Form des Acetyl-CoA, das aus der Verwertung von Fett gewonnen wird, umgestellt hat (Phase IV). Während dieser Umstellung ist der Körper weniger leistungsfähig.

Auf Grund dieser Stoffwechselanpassungsfähigkeit ist es dem Menschen möglich längere Zeit ohne Nahrungsaufnahme durchzuhalten. Bei der vermehrten Energiegewinnung durch Ketonkörper ist eventuell ein leichter acetonähnlicher Geruch der Atemluft feststellbar.

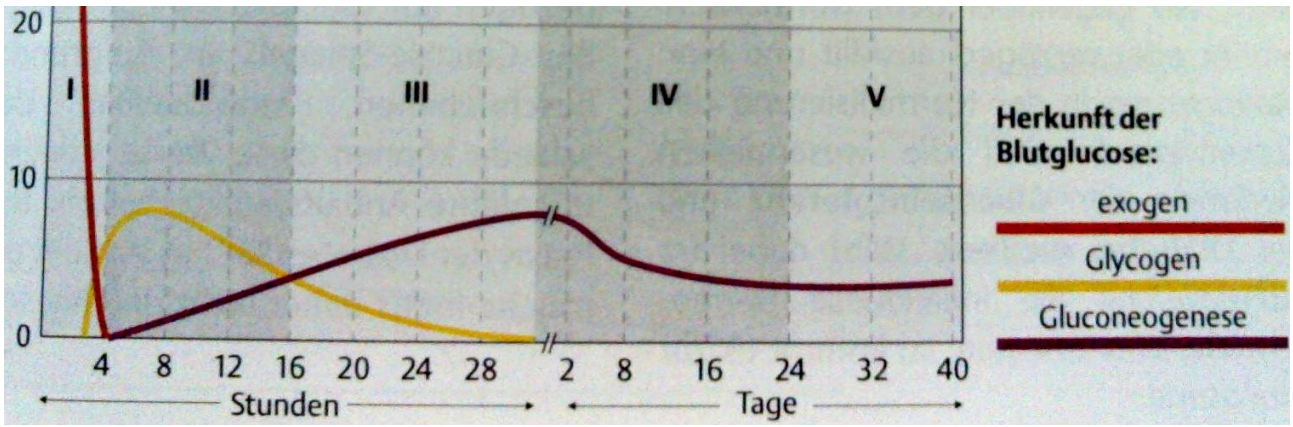


Abb. 6.5.1 – Beiträge zur Blutglukose bei Hungerstoffwechsel (Ketose) – (aus [1])

7 Einfluss der Ernährung auf die Energiespeicher

Durch Nahrungsmittel wird der Körper ständig mit neuer Energie und Substraten zur Regeneration bzw. zum Aufbau von Körpersubstanz versorgt, wobei die Proteine im Normalfall zur Regeneration körpereigener Strukturen, und die Kohlenhydrate und Fette zur Energiegewinnung herangezogen werden. Als Hauptenergielieferant sollten die Kohlenhydrate dienen, weil sie vom Körper am leichtesten verarbeitet werden können. Sie sollten ca. 50-60% des Energiebedarfs decken. Fette sollten einen Anteil von ca. 20-30% haben. Der Eiweißbedarf liegt je nach Trainingszustand und Belastung zwischen 1-2g / kg Körpergewicht, und sollte daher 15-20% des täglichen Energiebedarfs liefern, wobei unter Normalbedingungen die Mehrzahl der Eiweiße nicht verbrannt wird. Wird dem Körper im Schnitt mehr Energie zugeführt, als er verbraucht, spricht man von einer positiven Energiebilanz, und der Körper speichert die überschüssige Energie. Dies geschieht längerfristig ausschließlich in den Fettdepots. Besteht eine negative Energiebilanz, verbraucht der Körper mehr Energie, als ihm zugeführt wird. Die notwendige Energie wird dabei aus den vorhandenen Speichern gewonnen.

Kurzfristig kann das Körpergewicht durch die Glykogenspeicher bzw. die damit verbundene Bindung von Wasser beeinflusst werden. Entleert man durch exzessives Training die Glykogenspeicher, und verhindert ihre rasche Wiederauffüllung durch Meiden kohlenhydratreicher Nahrung, kann man kurzfristig sein Körpergewicht senken. Hat man schließlich sein Ziel erreicht und beginnt wieder Kohlenhydrate zu sich zu nehmen, werden die Speicher wieder gefüllt. Durch den vorhergehenden Mangel an Kohlenhydraten versucht der Körper durch Einlagerung von mehr Glykogen für das nächste Mal besser gewappnet zu sein. (Überkompensation) Dadurch hat man für die nächste Belastung mehr Glykogen zur Verfügung. Das Körpergewicht ist dementsprechend leicht erhöht.

Eine langfristige Gewichtsreduktion lässt sich nur durch eine langfristig negative Energiebilanz erreichen, wobei eine leicht negative Energiebilanz vorteilhafter ist, da die Proteine geschont werden. Eine langfristig positive Energiebilanz führt immer zu einer Erhöhung des Körpergewichtes durch Vergrößerung der Fettdepots. Eine vorteilhaftere Erhöhung des Gewichtes lässt sich durch entsprechendes Training und die damit verbundene Erhöhung der Muskelmasse und der Glykogenspeicher erreichen.

Die Art der zugeführten Kohlenhydrate ist aus Sicht der Energiegewinnung unerheblich. Ob Einfach- oder Mehrfachzucker verwendet werden hat auf die Leistungsfähigkeit bei körperlicher Belastung keinen Einfluss. Wird die Energiezufuhr vorwiegend durch Einfachzucker bewerkstelligt, können eventuell Mangelerscheinungen von manchen Vitaminen auftreten (besonders B1), da in Nahrungsmitteln mit hohem Anteil an Einfachzuckern oft keine Mikronährstoffe (Vitamine u. Spurenelemente) enthalten sind. Dabei wird B1 vor allem zum Glukoseabbau benötigt.

Eine Ernährung mit einem hohen Anteil an Einfachzuckern kann im Alltag, bzw. bei geistiger Beanspruchung durch die großen Schwankungen des Blutzuckerspiegels unvorteilhaft sein. Durch den relativ schnellen Anstieg des Blutzuckers kommt es bei der Ausschüttung von Insulin zu einer Art Überkompensation, wobei der Blutzucker unter den ursprünglichen Wert fallen kann. Da das Nervensystem auf die Energieversorgung aus der Blutglukose angewiesen ist, kommt es dann zu Leistungseinbußen bei geistiger Arbeit. Ebenso wurde eine erhöhte Anfälligkeit auf Krankheitserreger bei niedrigem Blutzuckerspiegel nachgewiesen, was die Ansteckungsgefahr erhöht. Da bei körperlicher Belastung (z.B. Training) die Blutglukose nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Muskulatur nur unwesentlich betroffen.

8 Literatur

[1] – Taschenatlas der Ernährung von Hans Konrad Biesalski, Peter Grimm, Melanie Waigand-Brauner, und Ursula Biesalski - Thieme Georg Verlag (Broschiert – 1998)

[2] – Ausdauer-Leistungsdiagnostik - Ziele und Möglichkeiten - Patrick Fluri / Swiss Olympic Medical Center – Magglingen

[3] – Karl-Franzens-Universität (Graz) – Institut für Sportwissenschaft – Skriptum : UE Herz-Kreislaufsystem und Stoffwechsel: Stoffwechselregulation, Stefan Arvay

[4] – Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration - J. A. Romijn, E. F. Coyle, L. S. Sidossis, A. Gastaldelli, J. F. Horowitz, E. Endert and R. R. Wolfe - Am J Physiol Endocrinol Metab 265: E380-E391, 1993

[5] - Muskulärer Energiestoffwechsel und sportliche Aktivität - H. Heck - Blickpunkt Der Mann 2006; 4 (4): 23–28. Krause & Pachernegg GmbH - Verlag für Medizin und Wirtschaft

[6] - Dr. Kurt A. Moosburger – Die muskuläre Energiebereitstellung im Sport - Innsbruck, im November 1994 (veröffentlicht im SPORTMAGAZIN Jan. 1995) (zuletzt überarbeitet im Januar 2008)

[7] - Ausdauertraining - von Peter G. J. M. Janssen - Auflage: 3. A. (September 2003)

[8] - Grundl agen der Ernährung i m Sport - 5. überarbeitete und erweiterte Auflage , Sommer 2000 von Dr. med. Beat Knechtle

[9] – De Marées H. Sportphysiologie. Sport & Buch Strauß, Köln, 2003