

Liebe Sport-Leistungskurs- Schüler/Innen,

Für Euch wird der Schulbetrieb ja voraussichtlich ab dem 4.05.2020 wieder weiter gehen. Für die beiden Wochen bis dahin bekommt ihr von mir noch weitere Arbeitsaufträge:

- 1) Kontrolliert mit Hilfe der angehängten Musterlösungen die Arbeitsaufträge der letzten Wochen.
- 2) Die darauf folgenden Seiten beinhalten den Themenblock „Muskelstoffwechsel“. Bitte lest euch alles gewissenhaft durch und bearbeitet die beiden aufgeführten Arbeitsaufträge.
Fasst das Kapitel bitte stichwortartig zusammen. Es handelt sich um ein komplizierteres Thema, für das ihr euch Zeit lassen solltet und ggf. das Internet zu Rate ziehen oder mir eine Mail schreiben könnt.
Da ich bisher noch keine Rückmeldungen zu Verständnisfragen erhalten habe, baue ich darauf, dass ihr alle Aufgaben gut lösen konntet und ihr alles verstanden habt. Sollte das doch nicht der Fall sein, habt ihr nun noch zwei Wochen Zeit dies nachzuholen.
- 3) Noch einmal mein Appell an Euch: Bitte haltet euch fit!!! Das Wetter ist perfekt für Ausdauerläufe. Ihr solltet aufgrund der bevorstehenden Leichtathletik- Halbjahresprüfung mindestens zwei Ausdauerläufe pro Woche machen, sowie Kraftübungen für eure Wurf- und Sprungmuskulatur. Falls ihr Fragen zu Trainingsübungen oder -häufigkeit/-pausen etc. habt, schreibt mir bitte eine Mail. Ich helfe gerne weiter oder gebe neue Anregungen für Übungen.

Bleibt fit, aber vor allem gesund!!!!

Liebe Grüße,

Frau Erdmenger





1 Bewegungsapparat

Seite 28

1 Nennen Sie Knochen, die durch ein Scharniergelenk miteinander verbunden sind.

Folgende Knochen sind durch ein Scharniergelenk miteinander verbunden:

- Oberarmknochen,
- Zehenknochen,
- Elle,
- Fingerknochen (Grund-, Mittel- und Endglied).

2 Beschreiben Sie den Aufbau eines Röhrenknochens.

Ein Röhrenknochen besteht aus einem langen Schaft mit zwei verdickten Enden. Während der Schaft vollständig von einer Knochenhaut ummantelt und von Blutgefäßen durchzogen ist, weist er im Vergleich zu den Knochenenden keine Knorpelflächen auf. Knochenschaft und -enden werden durch eine Wachstumszone verbunden. Neben dem Knochenschaft und den Knochenenden lassen sich der Innenbereich und die Außenschicht unterscheiden. Die Außenschicht wird durch ein dichtes, kompaktes Knochengewebe gebildet. Der Innenbereich wird durch Knochenbälkchen gebildet. Weiterhin liegt dort das rote Knochenmark vor. Im Schaft besitzt ein Röhrenknochen eine Markhöhle, in der sich Knochenmark befindet.

3 Erläutern Sie den Unterschied zwischen echten und unechten Gelenken.

Echte und unechte Gelenke unterscheiden sich in der Beweglichkeit und im Vorhandensein eines Gelenkspalts. Echte Gelenke weisen mindestens einen Bewegungsgrad auf und besitzen einen Gelenkspalt, während unechte Gelenke unbeweglich sind und keinen Gelenkspalt besitzen. Sie halten Knochen unverrückbar zusammen und zwischen den Knochenskeletteilen befindet sich ein Füllgewebe aus Knorpel- oder Bindegewebe.

4 Erklären Sie den Unterschied zwischen mehrbauchigen und mehrköpfigen Muskeln.

Generell bezeichnet ein Muskelbauch die Verdickung eines Skelettmuskels zwischen Ursprung und Ansatz. Hinsichtlich der Anzahl und Anordnung der Muskelbäuche werden mehrbauchige und mehrköpfige Mus-

keln unterschieden. Während mehrbauchige Muskeln durch Zwischensehnen verbunden sind und hintereinander liegen, sind bei mehrköpfigen Muskeln die Muskelbäuche parallel nebeneinander angeordnet. Dadurch besitzen sie einen gemeinsamen Ansatz und einen eigenen Ursprung.

2 Muskelstoffwechsel

Seite 32

1 Vergleichen Sie die Energiefreisetzung beim aeroben und anaeroben Abbau der Glucose.

Während unter anaeroben Bedingungen die Glucose durch die Milchsäuregärung nur unvollständig abgebaut werden kann, wird sie bei aeroben Bedingungen durch die Zellatmung vollständig abgebaut. Dementsprechend unterscheiden sich beide Stoffwechselprozesse hinsichtlich der Energiefreisetzung.

Bei der Zellatmung kann Glucose unter aeroben Bedingungen vollständig oxidiert werden und durchläuft dabei die Glykolyse, die oxidative Decarboxylierung, den Citratzyklus und die Atmungskette. Daraus resultiert ein Nettoenergiegewinn von 38 Molekülen ATP.

Bei der Milchsäuregärung hingegen kann die Glucose nur unvollständig verarbeitet werden, wodurch weniger Energie gewonnen wird als bei der Zellatmung. Die Gärung der Glucose beginnt, genau wie bei der Zellatmung auch, mit dem Prozess der Glykolyse im Cytoplasma der Zelle. Dabei wird ein Glucosemolekül zu zwei Molekülen Pyruvat oxidiert. Hierbei werden 2 ADP + P zu 2 ATP umgewandelt und außerdem auch 2 Moleküle NAD^+ zu 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$ reduziert.

Bis zu diesem Punkt ist die Glykolyse der Gärung mit der der Zellatmung identisch, doch nun können die Elektronen und Protonen, mit denen die $\text{NADH} + \text{H}^+$ Moleküle aufgeladen wurden, nicht wie in der Atmungskette der Zellatmung abgegeben werden und mit Sauerstoff zu Wasser reagieren. Folglich unterscheiden sich der aerobe und anaerobe Abbau der Glucose bei der Energiefreisetzung um 36 Moleküle ATP.

2 Ordnen Sie die Energiestoffwechselprozesse ihrer Bedeutung nach dem 50-Meter- und dem 600-Meter-Kraulschwimmen zu.

Für die Zuordnung wird angenommen, dass für 50 Meter 25 Sekunden und für 600 Meter 6 Minuten benötigt werden.

50-Meter-Kraulschwimmen:

1. Anaerobe Glykolyse
2. Kreatinphosphat
3. ATP Reserven

Aufgrund der kurzen Belastungsdauer besitzen aerobe Stoffwechselprozesse keine Bedeutung.

600-Meter-Kraulschwimmen:

1. Aerobe Glykolyse
2. Anaerobe Glykolyse
3. Kreatinphosphat
4. ATP Reserven

Aufgrund der geringen Zeit spielt die Energiegewinnung durch Fette keine Rolle.

3 Skelettmuskulatur

Seite 36

1 Beschreiben Sie die Vorgänge bei der Muskelkontraktion.

Hinweis: Es bietet sich bei dieser komplexen Beschreibung an, den einzelnen Abschnitten des Querbrückenzyklus Überschriften zu geben.

Eine Muskelkontraktion wird durch Aktionspotentiale eingeleitet. Diese erreichen die Muskelfasern über das zugehörige Motoneuron. Dadurch kommt es zur Ausschüttung der Ca^{2+} -Ionen in den Muskelfasern. Die freigesetzten Ca^{2+} -Ionen gehen mit den Troponinmolekülen eine chemische Bindung ein. Dies bewirkt eine strukturelle Veränderung des Tropomyosins, sodass die Bindungsstellen der Myosinköpfe am Aktinfilament freigegeben werden. Somit kann der Querbrückenzyklus beginnen.

1. Aktin-Myosin-Bindung: Durch die Freigabe der Bindungsstelle kann eine Bindung der Myosinköpfe mit dem Aktinfilament stattfinden. Dabei spaltet sich das ATP durch ATPase in ADP und einen Phosphatrest. Dies hat eine Aufrichtung des Myosinköpfchens von 45° auf 90° zur Folge.

2. Zurückschnellen der Myosinköpfe: Durch die Abgabe des Phosphatrests gelangt das Myosinköpfchen in seine Ausgangslage zurück. Dadurch wird das gesamte Myosinmolekül in Richtung Z-Scheibe gezogen. Der Muskel verkürzt sich.

3. ADP-Abgabe: Nach der Abgabe des Phosphatrests wird auch ADP abgegeben, um Platz für ATP zu schaffen.

4. ATP-Bindung: ATP bindet am Myosinköpfchen.

5. Lösung der Aktin-Myosin-Bindung: Durch die Weichmacherfunktion des ATPs kommt es zur Lösung der Aktin-Myosin-Bindung. Ist die Konzentration der Ca^{2+} -Ionen nach wie vor hoch, so wird der Querbrückenzyklus erneut durchlaufen. Sollte sie abnehmen, kommt es zu einer Ruhephase.

6. Ruhestellung: Nimmt die Ca^{2+} -Ionen Konzentration ab, so verändert sich die Lage des Tropomyosins und eine Aktin-Myosin-Bindung ist nicht mehr möglich.

2 Erklären Sie die Bedeutung von ATP für die Muskelkontraktion.

Ohne ATP kann eine Muskelkontraktion nicht ablaufen. ATP ist an zwei Stellen des Querbrückenzyklus von Bedeutung. Es sorgt für die Aufrichtung der Myosinköpfe von 45° auf 90° und für die Auflösung der Aktin-Myosin-Bindung. Bei der Auflösung der Querbrücke besitzt das ATP eine Art Weichmacherwirkung. Würde kein ATP mehr zur Verfügung stehen, könnte die Querbrücke nicht mehr gelöst werden. Dieser Zustand entspricht der Totenstarre.

3 Definieren Sie den Begriff motorische Einheit.

Unter einer motorischen Einheit werden das Motoneuron und die von ihm innervierten Muskelfasern zusammengefasst.

4 Erläutern Sie die Bedeutung der Anzahl an Muskelfasern in einer motorischen Einheit für die Muskelfunktion.

Die Anzahl der Muskelfasern einer motorischen Einheit bestimmt die Funktionsweise des Muskels. Je weniger Muskelfasern durch ein Motoneuron innerviert werden, desto feiner kann die Muskelarbeit erbracht werden. Daher besitzen Muskeln, die für unsere Mimik zuständig sind, motorische Einheiten mit wenigen Muskelfasern. So besitzt beispielsweise der äußere Augenmuskel nur zehn Muskelfasern pro motorischer Einheit. Motorische Einheiten, die wenig differenzierte Arbeit verrichten müssen, besitzen dagegen viele Muskelfasern, die von einem Motoneuron versorgt werden. So besitzt der Wadenmuskel 2000 Muskelfasern pro motorischer Einheit.

5 Erläutern Sie, dass ST-Fasern besonders gut für Ausdauersportarten geeignet sind.

ST-Fasern sind langsam arbeitende und ermüdungsresistente Fasern, die oxidativ arbeiten. Hingegen sind FT-Fasern, die für kurzfristige hohe Kraftleistungen zuständig sind, schnell ermüdend und arbeiten glykolytisch. Da bei Ausdauersportarten eine hohe Belastungsdauer vorliegt, die unter aeroben Bedingungen stattfindet, muss die Muskulatur ermüdungsresistent sein. Hinzu

kommt, dass bei Ausdauersportarten keine hohen Kraftwerte erbracht werden müssen. Daher sind ST-Fasern besonders gut für Ausdauersportarten geeignet. Dies zeigt sich auch bei der Faserverteilung von ST-Fasern und FT-Fasern bei Leistungssportlern in Ausdauersportarten. Diese weisen einen höheren Anteil ST-Fasern im Vergleich zu den FT-Fasern in ihrem Muskelgewebe auf.

Exkurs Seite 36

6 In Ballsportarten sind neben einer guten Ausdauer auch Schnelligkeit und Kraft entscheidend. Erläutern Sie, dass in diesen Sportarten eine Umwandlung der FT- in ST-Fasern nur bedingt sinnvoll ist.

Ballsportarten zeichnen sich durch verschiedene Beanspruchungen aus. So muss ein Spieler neben einer guten Ausdauer auch Schnelligkeit und Kraft besitzen, um den Anforderungen der Sportart gerecht zu werden. Ein Ballspieler muss zum Beispiel in der Lage sein, bei der Änderung der Spielsituation, wie bei einem Tempogegenstoß oder Konter, schnell und kurzfristig reagieren zu können. Auch gibt es Situationen, in denen die Sprungkraft für den Erfolg entscheidend ist. Dies ist beispielsweise beim Kopfball, Sprungwurf und Korbleger der Fall. Für solche Aktionen, die sich durch Schnelligkeit und Kraft auszeichnen, werden die FT-Fasern benötigt. Da in den Ballsportarten sowohl ST-Fasern und FT-Fasern benötigt werden, ist eine Umwandlung also wenig sinnvoll.

Seite 37

1 Beschreiben Sie die verschiedenen Formen der Hypertrophie.

Man unterscheidet die sarkoplasmatische und die myofibrilläre Hypertrophie. Durch die Zunahme der Menge des Sarkoplasmas kommt es zu einer Hypertrophie. Dies wird als sarkoplasmatische Hypertrophie bezeichnet. Durch die Zunahme der Anzahl der Myofibrillen und deren jeweiliger Dicke kommt es ebenfalls zu einer Hypertrophie. Dies wird als myofibrilläre Hypertrophie bezeichnet.

Exkurs Seite 37

2 Recherchieren Sie Möglichkeiten zur Linderung von Muskelkater.

Pausieren: Muskelkater heilt von selbst nach 7–10 Tagen aus. In dieser Zeit sind hohe Kraftbelastungen zu vermeiden.

Wärme: Wärmebehandlungen können sinnvoll sein. In Frage kommen Saunagang, warme Bäder und direkte

Wärmeanwendung auf der betroffenen Muskulatur (Heißluft, Fangopackung). Durch die Wärme kommt es zu einer Steigerung der Durchblutung der Muskulatur und dadurch zur Linderung der Beschwerden.

Dehnen und Lockern: Der Bewegungsschmerz kann durch passives und aktives Dehnen oder Lockerungsübungen vorübergehend abgeschwächt werden.

Kinesio-Tape: Durch eine Reizsetzung über die Haut kommt es zu einer reflektorischen Entspannung der Muskulatur.

4 Arbeitsweisen und Kontraktionsformen des Muskels

Seite 39

1 Beschreiben Sie die verschiedenen Arbeitsweisen und Kontraktionsformen von Muskeln an Beispielen.

Isometrische Kontraktionsform: Ausgangsposition und Endposition des Oberarmmuskels bleiben beim Halten einer Getränkekiste gleich. Es kommt zu keiner Bewegung im Ellenbogengelenk und der Abstand zwischen Muskelansatz und Muskelursprung bleibt gleich. Der Muskel arbeitet statisch.

Konzentrische Kontraktionsform: Ursprung und Ansatz des Oberarmmuskels nähern sich beim Heben einer Hantel (Bicepscurl) an. Es kommt zu einer Verkürzung des Muskels und zu einer Bewegung im Ellenbogengelenk. Der Muskel arbeitet dynamisch-überwindend.

Exzentrische Kontraktionsform: Ursprung und Ansatz des Oberarmmuskels entfernen sich voneinander, durch die Höhe des zu haltenden Gewichtes. Der Muskel wird länger und es kommt zu einer Bewegung im Ellenbogengelenk. Der Muskel arbeitet dynamisch-nachgebend. Dies ist beispielsweise bei der Abwärtsbewegung eines Klimmzuges der Fall.

5 Herz-Kreislauf-System und Atmung

Seite 43

1 Erläutern Sie die Arbeitsphasen des Herzens.

Es lassen sich die vier Phasen Diastole, Anspannung, Systole und Entspannung unterscheiden. Während der Diastole erschlafft die Muskulatur der Herzkammern und in den Herzkammern herrscht im Vergleich zu den

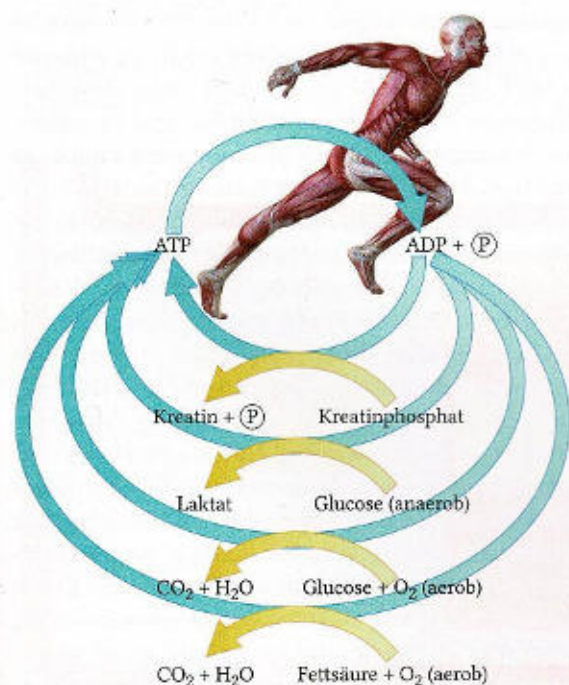


2 Muskelstoffwechsel

Beim Sport verrichten Muskelzellen Arbeit. Um dies zu gewährleisten, sind sie auf die Zufuhr von Energie angewiesen. Diese stammt aus energiereichen Molekülen wie etwa Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen, die mit der Nahrung aufgenommen werden. Beim Abbau dieser Moleküle wird die Energie schrittweise mithilfe von Enzymen freigesetzt. Enzyme sind Biokatalysatoren, die durch Herabsetzung der Aktivierungsenergie chemische Reaktionen beschleunigen.

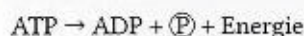
Die Anforderungen an den muskulären Energiestoffwechsel sind nicht für alle Sportarten gleich. So erfolgt die Energiebereitstellung für einen 100-Meter-Lauf im Vergleich zu einem 5000-Meter-Lauf durch andere Stoffwechselwege.

Ohne Beteiligung von Sauerstoff werden die Kohlenhydrate nur unvollständig abgebaut und liefern wenig Energie. Dieser Vorgang wird als Milchsäuregärung bezeichnet. Gärungen benötigen keinen Sauerstoff, sie verlaufen **anaerob**. Für den vollständigen Abbau der organischen Stoffe zu den energiearmen, anorganischen Stoffen Wasser und Kohlenstoffdioxid ist Sauerstoff nötig. Diese vollständige Oxidation wird als Zellatmung bezeichnet. Sie verläuft **aerob** und liefert viel Energie.



29.1 Formen der ATP-Bereitstellung

Zu Beginn von intensiven körperlichen Belastungen wie dem 100-Meter-Lauf erfolgt die Energiebereitstellung nahezu vollständig anaerob. In den Muskelzellen befindet sich ein Vorrat an ATP, der für wenige maximale Muskelkontraktionen über eine Dauer von zwei bis drei Sekunden ausreichen würde. **Adenosin-triphosphat, ATP**, ist das Speicher- und Überträgermolekül für chemische Energie in Zellen. Es ist der universelle Energieträger, der beim Abbau der mit der Nahrung aufgenommenen energiereichen Moleküle gebildet wird. ATP ist die einzige Energiequelle, die nicht weiter umgewandelt werden muss, sondern direkt verwendet werden kann. Durch die Abspaltung einer Phosphatgruppe vom ATP-Molekül wird die Energie freigesetzt. Es entstehen Adenosindiphosphat, ADP, und anorganisches Phosphat (P):



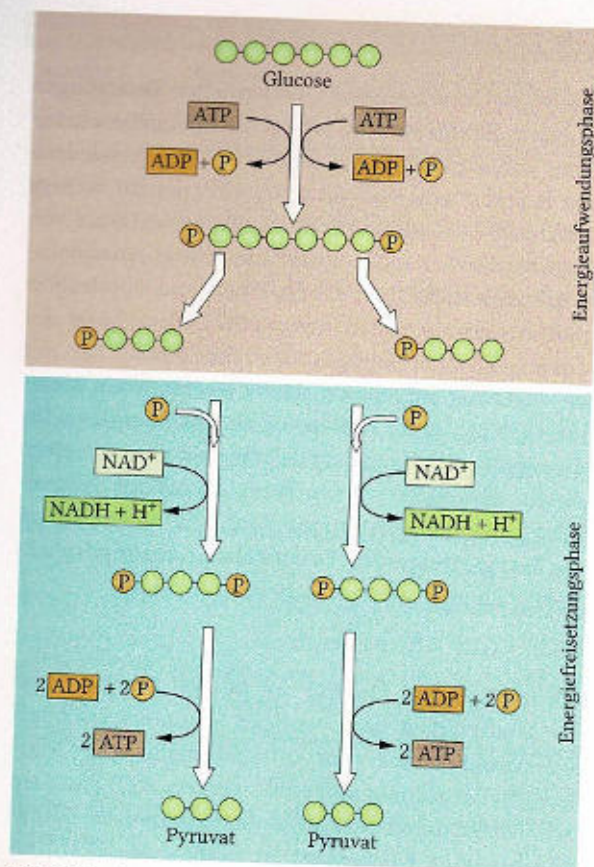
Da die Speicher für ATP im Muskel bei intensiver Muskelarbeit nach wenigen Sekunden erschöpft wären, müssen diese zur Aufrechterhaltung der Muskelaktivität ständig aufgefüllt werden. ATP kann am schnellsten durch den Kurzzeitenergiespeicher **Kreatinphosphat, KP**, regeneriert werden. Auch für Kreatinphosphat steht im Muskel ein Speichervorrat zur Verfügung. Mithilfe eines Enzyms wird vom Kreatinphosphat eine Phosphatgruppe auf ADP übertragen:



Die schnelle Resynthese des ATP durch KP liefert Energie für etwa sechs bis acht Sekunden intensivster Belastung. Bei länger anhaltenden Belastungen muss der Energiebedarf mithilfe von Langzeitenergiespeichern gedeckt werden. Dies sind unter anderem die Kohlenhydrate. Das wichtigste Kohlenhydrat für den Menschen ist die Glucose. Dieser Nährstoff wird mit der Nahrung aufgenommen und gelangt über den Dünndarm ins Blut. Glucose ist ein Molekül mit sechs Kohlenstoffatomen, ein C₆-Körper.

Im Zuge der **Glykolyse** wird Glucose in mehreren Reaktionsschritten mithilfe verschiedener Enzyme in zwei Moleküle Pyruvat, zwei C₃-Körper, gespalten. Dieser Vorgang findet im Cytoplasma der Zellen statt und unterteilt sich in zwei Phasen.

Die erste Phase, die Energieaufwendungsphase, findet unter Verbrauch von zwei Molekülen ATP statt. Die



30.1 Glykolyse

Glucose wird zunächst aktiviert und dadurch reaktionsfreudiger. Diese Phase ist mit der Bildung von zwei C₃-Körpern abgeschlossen.

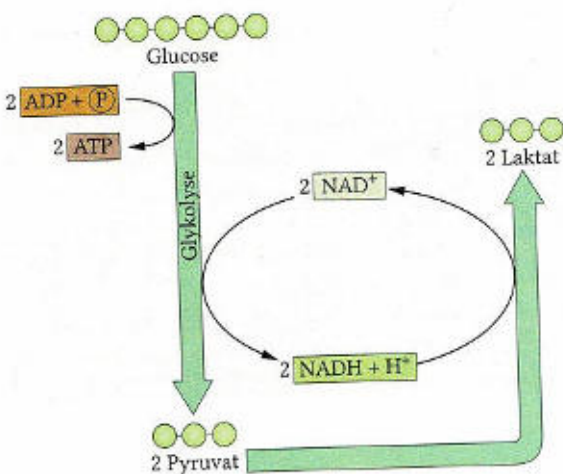
In der zweiten Phase, der Energiefreisetzungsphase, werden diese C₃-Körper in weiteren aufeinander folgenden Teilschritten zum Endprodukt der Glykolyse, dem Pyruvat, umgebaut. Dabei wird Energie frei, die zur Bildung von vier Molekülen ATP genutzt wird. In der Gesamtbilanz der Glykolyse ergibt sich somit ein Gewinn von zwei Molekülen ATP.

Glucose wird nicht nur gelöst über das Blut zur Muskelzelle transportiert, sondern steht dort auch direkt in gespeicherter Form als **Muskelglykogen** zur Verfügung. Glykogen ist eine langkettige, aus vielen Glucosemolekülen zusammengesetzte Verbindung. Der Einsatz des intramuskulären Glykogens zur Energiebereitstellung liefert im Gegensatz zur im Blut gelösten Glucose sogar drei Moleküle ATP, da der erste Aktivierungsschritt in der Energieaufwendungsphase der Glykolyse entfällt.

Während der Energiefreisetzungsphase finden Redoxreaktionen statt. Hierbei sind stets zwei Vorgänge gekoppelt: Ein Reaktionspartner gibt Elektronen ab, die von einem anderen Reaktionspartner aufgenommen werden. Die Aufnahme von Elektronen wird als Reduktion und die Abgabe der Elektronen als Oxidation bezeichnet. Beim Abbau der Kohlenhydrate übernimmt eine Verbindung mit dem Namen **Nikotinamadenindinucleotid, NAD⁺**, die Rolle des Elektronenakzeptors. Außer den Elektronen werden auch noch Protonen, also Wasserstoffkerne, frei, die ebenfalls vom NAD⁺ aufgenommen werden. Dabei wird NAD⁺ zu NADH + H⁺ reduziert. In der Glykolyse werden zwei Moleküle NADH + H⁺ gebildet.

Wird NADH + H⁺ wieder zu NAD⁺ oxidiert, werden die Elektronen auf andere Stoffe übertragen. Diese Oxidation, die in den Mitochondrien der Zellen stattfindet, ist mit einer hohen Energieabgabe verbunden und kann wieder zum Aufbau von ATP genutzt werden. Neben der direkten Energiebereitstellung über ATP gibt es beim Kohlenhydratabbau also noch eine zweite Möglichkeit der Zwischenspeicherung von Energie, nämlich in Form von NADH + H⁺.

Unter **anaeroben** Stoffwechselbedingungen, die etwa beim 400-Meter-Lauf vorliegen, findet im Anschluss an die Glykolyse in den Muskelzellen die **Milchsäuregärung** statt. Hierbei wird das Pyruvat mithilfe von NADH + H⁺ zu Milchsäure reduziert, während NADH + H⁺ zu NAD⁺ oxidiert wird. Dabei wird allerdings kein ATP gebildet. Milchsäure gibt in wässrigen Lösungen wie dem Cytoplasma ein Proton ab und liegt dann in ionisierter Form als Laktat vor. Die besondere Bedeutung der Laktatbildung liegt in der schnellen Regeneration von NAD⁺, das nun wieder als Elektronenakzeptor in der Glykolyse zur Verfügung steht. Ohne die Rückgewinnung von NAD⁺ aus NADH + H⁺ käme die Glykolyse zum Erliegen. Eine Anhäufung des Laktats führt zu einer Übersäuerung der Zelle, sodass ATP, KP und Glucose abbauende Enzyme gehemmt werden. Die Muskelkontraktionen werden dadurch zunehmend erschwert und der Muskel ermüdet. Laktat muss daher wieder abgebaut werden. Dies erfolgt zum Teil direkt in der Muskulatur. Das verbleibende Laktat wird mithilfe des Blutes abtransportiert und unter Sauerstoffverbrauch in der Leber oder im Herzmuskel zurück zu Pyruvat umgewandelt, woraus erneut Glucose oder Glykogen aufgebaut werden können.



31.1 Milchsäuregärung im Cytoplasma

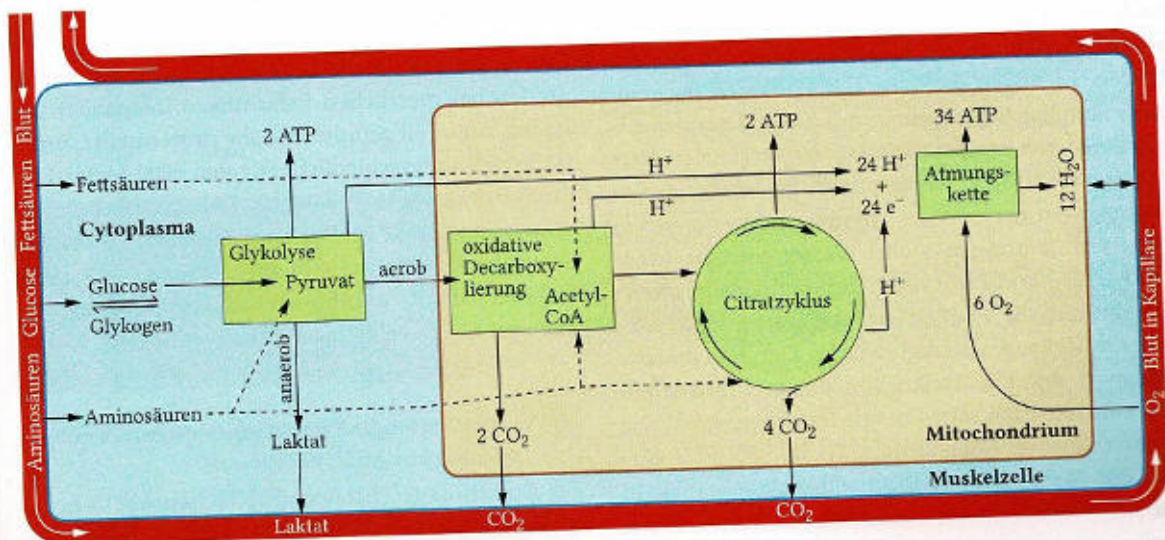
Zur Aufrechterhaltung der Muskelaktivität bei lang andauernden Belastungen, wie etwa beim 5000-Meter-Lauf, erfolgt die Energiebereitstellung überwiegend **aerob**. Die dafür zuständigen Stoffwechselprozesse finden im Mitochondrium statt. Hier erfolgt eine Vielzahl von enzymgesteuerten Reaktionsschritten, die in drei Abschnitte gegliedert werden: oxidative Decarboxylierung, Citratzyklus und Atmungskette. Im Zuge dieser Prozesse wird die restliche Energie der Glucose freigesetzt. Das Pyruvat wird zu drei Molekülen Kohlenstoffdioxid abgebaut, die mithilfe der Atmung ausgeschieden werden.

Die **oxidative Decarboxylierung** ist der verbindende Schritt zwischen der Glykolyse und den Folgereakti-

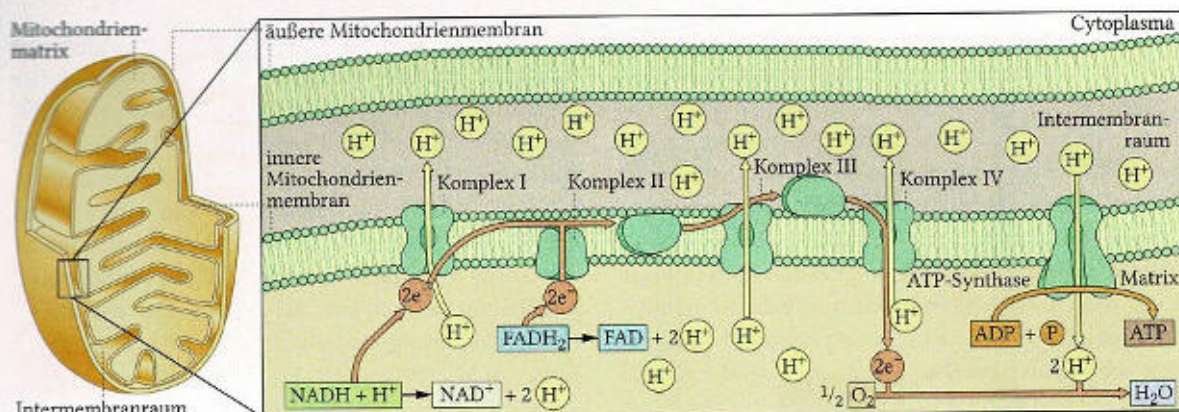
onen. Mithilfe eines Komplexes aus verschiedenen Enzymen erfolgen mehrere miteinander gekoppelte Reaktionen: Pyruvat wird unter Abspaltung von Kohlenstoffdioxid zu Acetat oxidiert. Ein Teil der dabei frei werdenden Energie wird durch die Reduktion von NAD^+ zu $\text{NADH} + \text{H}^+$ gespeichert. Ein weiterer Teil der Energie wird dazu verwendet, das entstandene Acetat mit einem als Coenzym A, CoA, bezeichneten Molekül zu verknüpfen. Als Produkt der oxidativen Decarboxylierung entsteht so der C_2 -Körper Acetyl-CoA.

Neben der Glucose können auch Fettsäuren und Aminosäuren über Acetyl-CoA unter Energiegewinn aerob weiter verarbeitet werden. Die Bildung von Acetyl-CoA stellt somit eine Schlüsselreaktion für den oxidativen Nährstoffabbau dar. Eine hohe Acetyl-CoA-Bildungsrate ist die Voraussetzung für eine hohe aerobe Energiebereitstellungsrate.

Acetyl-CoA ist der Ausgangsstoff für den vorletzten Stoffwechselabschnitt, den **Citratzyklus**. Im Verlauf von acht Teilschritten erfolgt hier die vollständige Oxidation der zwei Kohlenstoffatome des Acetyl-CoA zu Kohlenstoffdioxid, das heißt am Ende dieses Abschnitts sind alle Kohlenstoffatome des Anfangsmoleküls Glucose zu Kohlenstoffdioxid umgewandelt worden. Die dabei frei werdende Energie wird als ATP, $\text{NADH} + \text{H}^+$ sowie FADH_2 gebunden. FADH_2 ist die reduzierte Form der Verbindung **Flavinadenin-dinucleotid**, **FAD**, die ähnlich wie NAD^+ als Elektronen- und Protonenakzeptor fungiert.



31.2 Energieumsatz in der Muskelzelle



32.1 Atmungskette

Pro Molekül Acetyl-CoA entstehen im Citratzyklus ein Molekül ATP, drei Moleküle $\text{NADH} + \text{H}^+$ und ein Molekül FADH_2 . Ausgehend von dem ursprünglichen C_6 -Körper Glucose wird der Zyklus zweimal durchlaufen, die Produkte werden für die Gesamtbilanz somit verdoppelt.

Der letzte Abschnitt der oxidativen Energieverwertung von Glucose erfolgt in der **Atmungskette**. Diese wird auch als Endoxidation bezeichnet. Die Glucose ist zwar bereits zu Kohlendioxid abgebaut, der größte Teil ihrer chemischen Energie ist aber noch in den Molekülen $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 gespeichert. In der Atmungskette werden diese nun oxidiert und so zur Bildung von ATP genutzt. Ohne diese Oxidation von $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 zu NAD^+ und FAD würden die Elektronenakzeptoren für die vorherigen Zellatmungsvorgänge fehlen. Die Regeneration verhindert somit auch, dass die Zellatmungsprozesse zum Erliegen kommen.

An der Atmungskette sind mehrere Gruppen von Proteinen beteiligt, die als Proteinkomplexe bezeichnet werden. Es finden mehrere Teilreaktionen nacheinander statt, bei denen immer nur kleine Energiemengen freigesetzt werden. Die bei der Oxidation abgegebenen Elektronen werden dabei getrennt von den Protonen auf den mit der Atmung aufgenommenen Sauerstoff übertragen, wobei Wasser entsteht. Diese Art der Wasserbildung verhindert eine Knallgasreaktion, bei der die Energie explosionsartig freigesetzt und die Zelle geschädigt würde. Der schrittweise Transport der Elektronen von einem Proteinkomplex zum nächsten setzt Energie frei. Diese wird dazu genutzt, an den Komplexen I, III und IV Protonen von der Matrix, dem Mitochondrieninnenraum, in den Intermembranraum zu pumpen. Durch diesen Protonentransport und zusätzlich durch die Wasser-

bildung wird die Protonenkonzentration in der Matrix kleiner als im Intermembranraum, es entsteht ein Konzentrationsunterschied. Da die Protonen positiv geladen sind, entsteht ein Ladungsgradient. Der Intermembranraum ist dabei im Vergleich zur Matrix positiv geladen. Aufgrund dieses elektrochemischen Ladungsgradienten diffundieren die Protonen zurück in die Matrix. Dieser Rückstrom erfolgt über bestimmte Tunnelproteine. Beim Passieren der Tunnelproteine wird die Energie des elektrochemischen Gradienten abgebaut und dazu genutzt, aus ADP und Phosphat ATP zu bilden. Man bezeichnet diese Tunnelproteine daher auch als ATP-Synthasen. Pro Molekül $\text{NADH} + \text{H}^+$ werden durchschnittlich drei Moleküle ATP und pro Molekül FADH_2 zwei Moleküle ATP gebildet. In der Atmungskette entstehen also pro Glucosemolekül 34 ATP. In der Gesamtenergiebilanz ergeben sich durch die Glykolyse, den Citratzyklus und die Atmungskette zusammen 38 Moleküle ATP.

Die einzelnen Formen der Energiebereitstellung greifen bei sportlichen Belastungen ineinander und laufen zum Teil zeitgleich – ihr prozentualer Anteil ist jedoch unterschiedlich. Für den 5000-Meter-Lauf erfolgt der größte Teil aerob. Dabei kann bei Zwischensprints oder im Endspurt kurzfristig auch eine anaerobe Energiebereitstellung erfolgen. Für einen 400-Meter-Lauf erfolgt die Energiebereitstellung dagegen hauptsächlich anaerob.

- 1 Vergleichen Sie die Energiefreisetzung beim aeroben und anaeroben Abbau der Glucose.
- 2 Ordnen Sie die Energiestoffwechselprozesse ihrer Bedeutung nach dem 50-Meter- und dem 600-Meter-Kraulschwimmen zu.