

## 4. Aktiver Bewegungsapparat II (ca. 7 Std.)

- Energiestoffwechsel
- Ermüdung und Erholung

### 4.1 Energiegewinnung

Prozess	Energieausbeute	Aufgabe
1-Glykolyse		
2-Oxidative Decarboxylierung		
3-Zitronensäurezyklus		
4-Atmungskette		

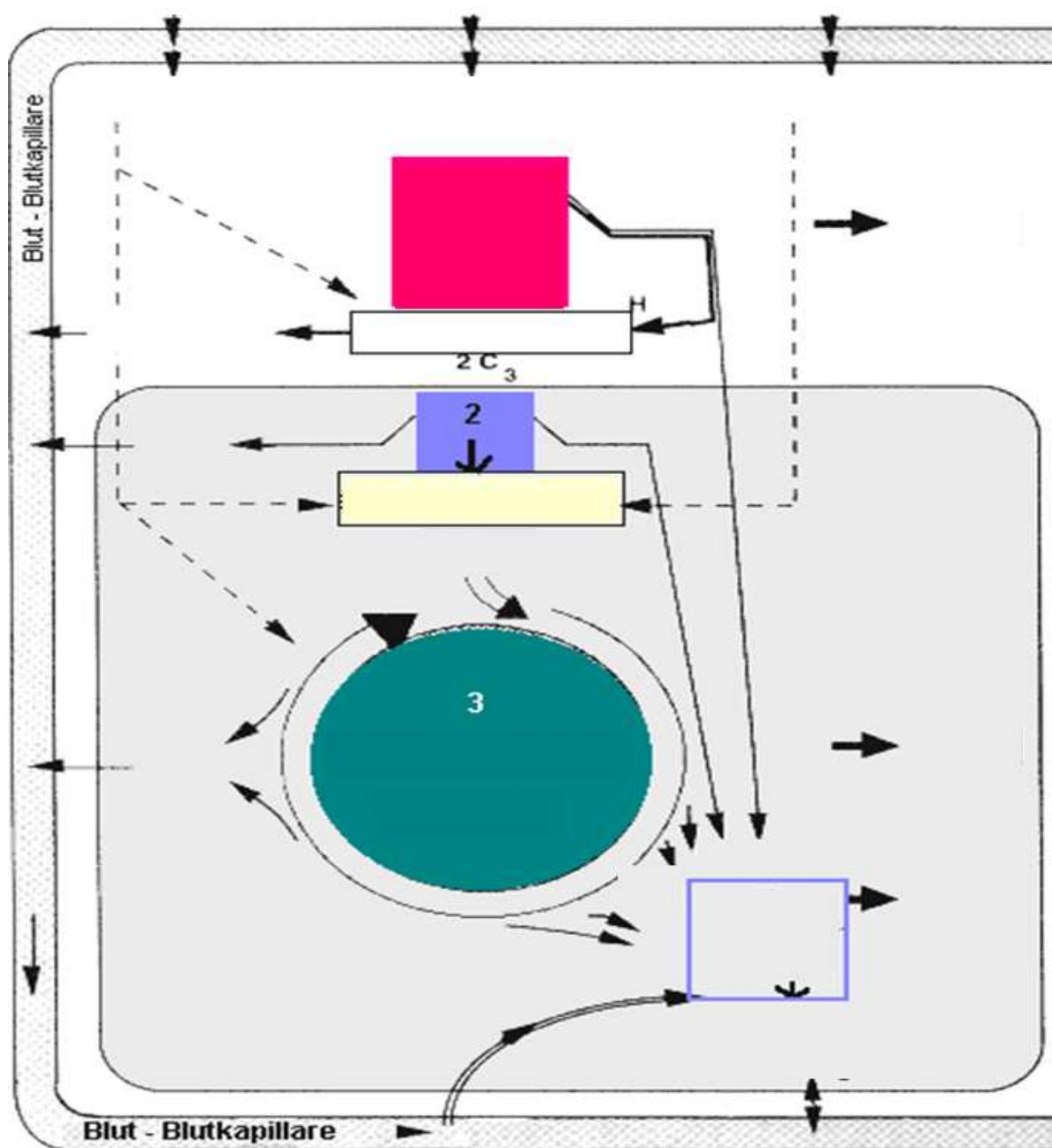


Abb. 1: Schematische Darstellung der Energiegewinnung

Bei der Muskelkontraktion wird Energie für die folgenden drei Vorgänge benötigt:

—

—

—

Als unmittelbare Energiequelle für die Muskelkontraktion kann nur die in den ATP-Bindungen gespeicherte Energie genutzt werden. Der Prozess für die Energiefreisetzung aus ATP (*Adenosintriphosphat*) muss in zwei aufeinanderfolgende Vorgänge unterteilt werden:

– **Vorgang der Erregungsleitung:**

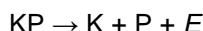
Die elektrische Erregung gelangt über den Nerv auf die Oberfläche der Muskelzelle. Dort breitet sie sich zunächst in den transversalen Tubuli, kleinen Öffnungen senkrecht zur Muskeloberfläche, aus. Unterhalb dieser Öffnungen befinden sich die longitudinalen Tubuli, die in hoher Konzentration Calcium-Ionen enthalten; direkt darunter befindet sich das kontraktile Sarkomer. Die Wand der longitudinalen Tubuli wird – auf noch weitgehend unbekannte Weise – für die Calcium-Ionen durchlässig, so dass in unmittelbarer Nähe der Myofibrillen die Ca<sup>++</sup>-Ionen-Konzentration deutlich ansteigt; diese aktivieren das Enzym ATP-ase.

– **Spaltung des Adenosintriphosphat:**

Das Enzym ATP-ase befindet sich am Myosinkopf und ist für die Spaltung des ATP in ADP (*Adenosindiphosphat*) und Phosphat verantwortlich, wobei Energie freigesetzt wird:



Der ATP-Vorrat in der Muskelzelle reicht bei maximaler Kontraktion allerdings nur für etwa 2 – 3 Sekunden. Um weitere Muskelarbeit zu ermöglichen, muss der ATP-Speicher sofort wieder aufgefüllt werden. Die ATP-Resynthese erfolgt durch das *Kreatinphosphat* (KP), das enzymatisch in Kreatin und Phosphat gespalten wird:



Die freiwerdende Energie kann zum ATP-Aufbau aus ADP und Phosphat genutzt werden:



Da auch der Kreatinphosphatspeicher in der Muskelzelle nur für etwa 20 – 30 maximale Kontraktionen ausreicht, muss eine rechtzeitige Wiederauffüllung der Phosphatspeicher durch **anaerob-laktaziden** (*Milchsäuregärung*) und **aerob-alaktaziden** (*innere Atmung*) Abbau von Nährstoffen (*Glucose und Fettsäuren*) erfolgen.

**Zusammenfassung:**

1. **Anaerob – alaktazid**

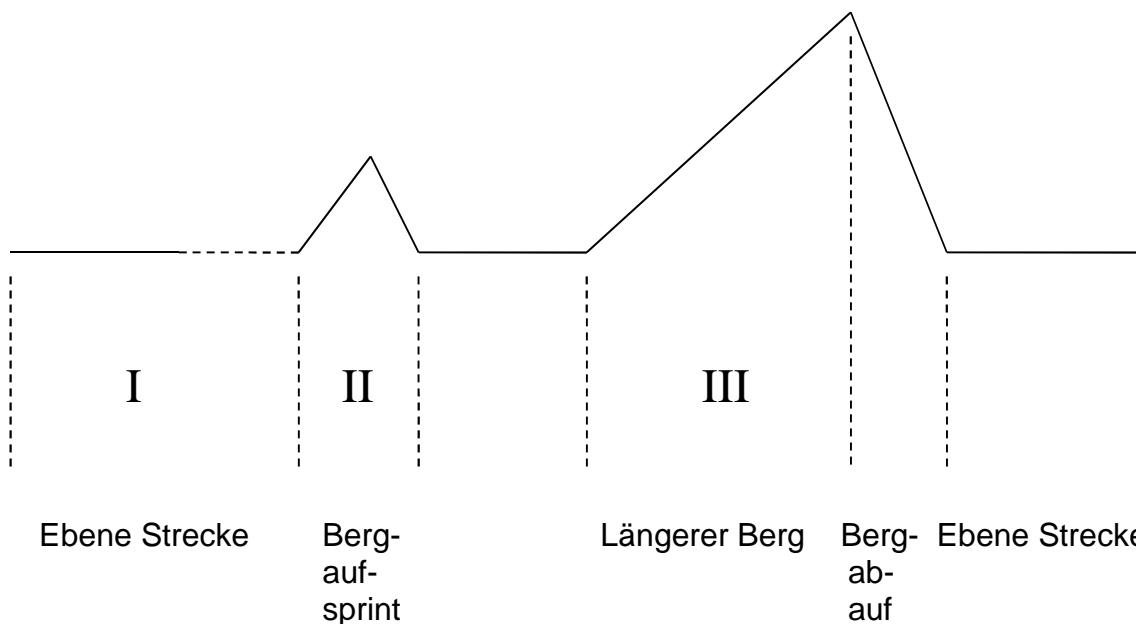
2. **Anaerob – laktazid**

(= anaerobe Glykolyse):

3. **Aerob** ( = aerobe **Glykolyse**, oxidativer Glykogenabbau):

4. **Aerob** ( = **Lipolyse**, oxidativer Fettabbau):

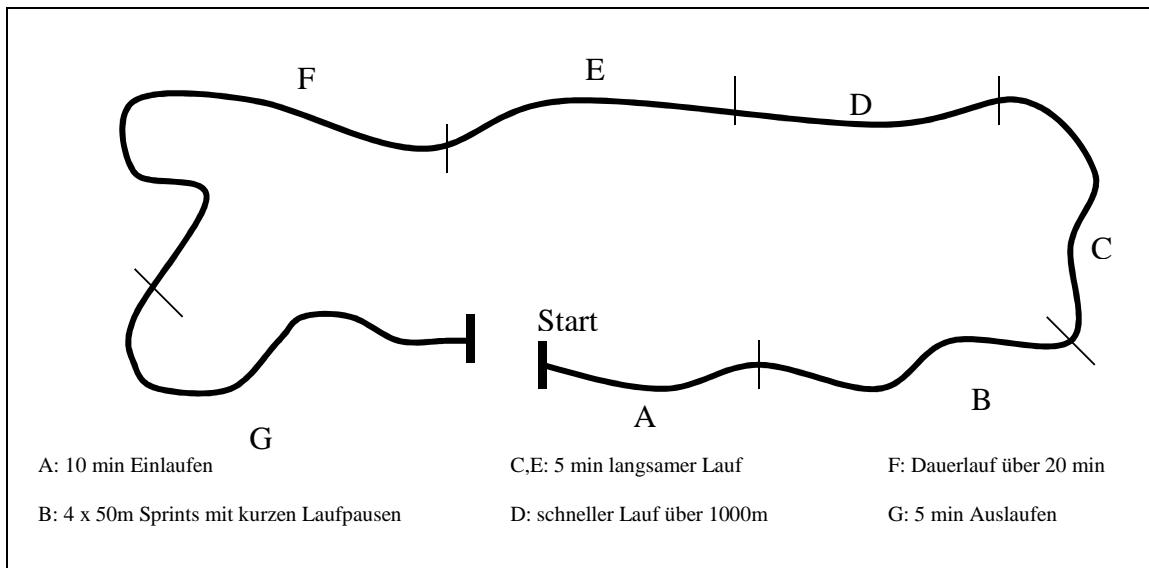
### 1. Beispiel zur Energiebereitstellung: Fahrtspiel



	(I) Ebene Strecke	(II) Bergaufsprint	(III) Längerer Berg
<b>Belastung</b>			
<b>Energiebereitstellung</b>			
<b>Energiegewinn</b>			

## 2. Beispiel zur Energiebereitstellung: Fahrtspiel

Das Fahrspiel stellt eine vielseitige Möglichkeit zur Verbesserung der Ausdauerfähigkeiten dar. Es setzt sich aus einer Aneinanderreihung von Läufen unterschiedlichen Umfangs und Intensität zusammen. Nachfolgendes Streckenschema soll ein Beispiel für ein derartiges Fahrtenspiel geben:



**Abb. 2:** Beispiel für ein Fahrspiel

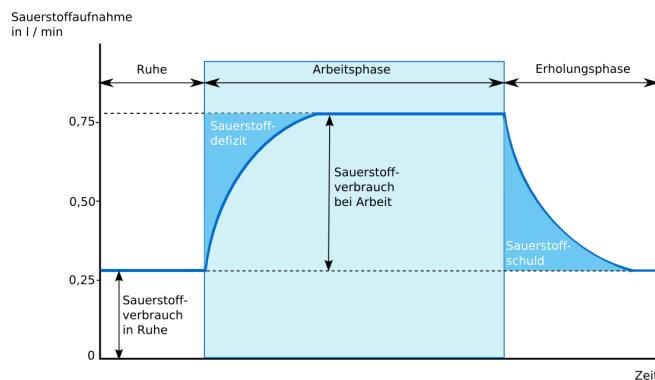
Im Folgenden wird die Energiebereitstellung während der Laufabschnitte A und B beim oben dargestellten Fahrtenspiel beschrieben.

**Belastungsbeginn:** 10 - 20 sec. Deckung des Energiebedarfs aus muskeleigenem ATP- und KP- Speicher (**anaerob alaktazide Energieversorgung**). Durch Spaltung von ATP in ADP und Phosphatrest entsteht Energie für die Muskelkontraktion (3 - 4 Muskelkontraktionen). Der größere KP-Speicher des Muskels ermöglicht die Resynthese von ADP zu ATP mit dem Phosphatrest des KP (bis max. 20 sec.). Da zu Belastungsbeginn die HK-Parameter noch nicht schnell genug intensiviert werden, erfolgt die weitere Energieversorgung zunächst hauptsächlich über die anaerobe Glykolyse. Hierbei erfolgt Zerlegung von Glucose bis zur Brenztraubensäure ( $C_3$  Körper), die aufgrund von Sauerstoffmangel (d.h. der im Zitronensäurezyklus anfallende Wasserstoff kann nicht in der Atmungskette oxidiert werden, die Transportvehikel NAD sind alle mit  $H_2$  besetzt und Zitronensäurezyklus und Atmungskette verstopfen) im Sarkoplasma nicht weiter zerlegt werden kann. Unter Aufnahme von  $H_2$  (vom  $NADH_2$ ) entstehen Laktat und Energie.

Mit Intensivierung der Atmung läuft aufgrund der geringen Belastungsintensität beim Einlaufen schon bald hauptsächlich die aerobe Glucosezerlegung an: Zerlegung bis zur Brenztraubensäure wie bei anaerober Glykolyse, weitere Aufspaltung zu aktivierten Essigsäure ( $C_2$  Körper), welche im Zitronensäurezyklus unter freiwerdender Energie  $CO_2$  (wird über die Lunge abgeatmet) und  $H_2$  ergibt.  $H_2$  wird über die Coenzyme NAD in die Atmungskette transportiert und dort mit dem mittlerweile vorhandenen  $O_2$  zu Wasser oxidiert, wobei Energie frei wird (**aerobe Zerlegung der Glucose**).

Im **Abschnitt B** reicht diese Form der Energieversorgung wegen der höheren Intensität nicht mehr aus und es wird vermehrt (kurzzeitig) auf die **anaerob laktazide** und sehr schnell verfügbare **Glykolyse** zurückgegriffen, wobei der Laktatspiegel im Blut schubweise ansteigt (durch die intensiven 50 Meter - Intervalle). Eine Rückkehr zur aeroben Energieversorgung erfolgt erst nach Rückgang der Belastungsintensität.

## Anaerobe Energiegewinnung und Sauerstoffschuld



**Abb. 3:** Initiale Sauerstoffschuld und Sauerstoffmehraufnahme nach Belastungsende

Die zu Beginn der Belastung eingegangene Sauerstoffschuld ist der Grund dafür, dass die Herz- und Atemfrequenz nach Arbeitsende noch über den Ruhebedarf hinaus erhöht bleiben. Man spricht hier von Sauerstoffmehraufnahme nach Belastungsende.

### Beachten Sie:

Diese Sauerstoffmehraufnahme hat in erster Linie die folgenden Ziele:

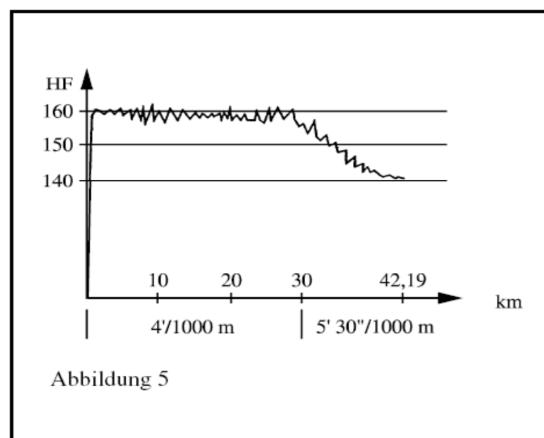
- .....
- .....
- .....
- .....

### Aufgaben:

1. Stellen Sie anhand dreier unterschiedlicher Spielsituationen während eines Fußballspiels auf Bundesliga-Niveau die im Organismus ablaufenden Vorgänge der Energiebereitstellung dar.

2.

Die Abbildung zeigt die Herzfrequenzkurve eines Marathonläufers bei einem Wettkampf. Bis Kilometer 30 hält der Athlet eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 4' auf 1 000 Meter. Ab Kilometer 30 sinkt diese Durchschnittsgeschwindigkeit auf 5' 30" auf 1 000 Meter. Parallel dazu verändert sich die Herzfrequenz. Erläutern Sie anhand dieser Abbildung die jeweiligen Stoffwechselvorgänge bei der Energiebereitstellung in der Arbeitsmuskulatur vor und nach Kilometer 30 und leiten Sie daraus ab, wie es zum Leistungseinbruch an dieser Stelle kommen konnte!



3.

Stellen Sie die verschiedenen Arten der Energiebereitstellung bei einem 100 m-Sprint dar!

### **3. Beispiel zur Energiebereitstellung: Fußball**

Stellen Sie anhand dreier unterschiedlicher Spielsituationen während eines Fußballspiels auf Bundesliga-Niveau die im Organismus ablaufenden Vorgänge der Energiebereitstellung dar.

**a) Anaerobe, alaktazide Phase**

Hier erfolgt für 2-3 Sekunden die Energiegewinnung durch die Spaltung von ATP in ADP und Phosphat. Daran schließt sich die sofortige Auffüllung der ATP-Speicher durch Resynthese mittels Kreatinphosphat an. Die Energiebereitstellung erfolgt also bis zu ca. 7 Sekunden ohne Laktatbildung (alaktazid).

Benötigt wird diese Art der Energiebereitstellung für äußerst intensive Belastungen, wie z.B. der Sprung zum Kopfball (ATP-Spaltung) oder ein Sprint über 50m (ca. 6 Sekunden) bei einem Konter auf das gegnerische Tor. (ATP-Resynthese)

**b) Anaerobe, laktazide Phase**

Nach 6-8 Sekunden tritt die anaerobe, laktazide Form der Energielieferung, also unter Laktatbildung in Kraft. Diese Phase umfasst die anaerobe Glykolyse, bei der Glukose in ATP und Milchsäure gespalten wird. In dieser Form kann die Energie für intensive Belastungen in einem Zeitraum von ca. 40 bis maximal 60 Sekunden bereitgestellt werden.

Schneller Angriff auf das gegnerische Tor, Ballverlust und sofortiger Sprint zum eigenen Tor zurück, Ballverlust des Gegners, Konter auf das gegnerische Tor.

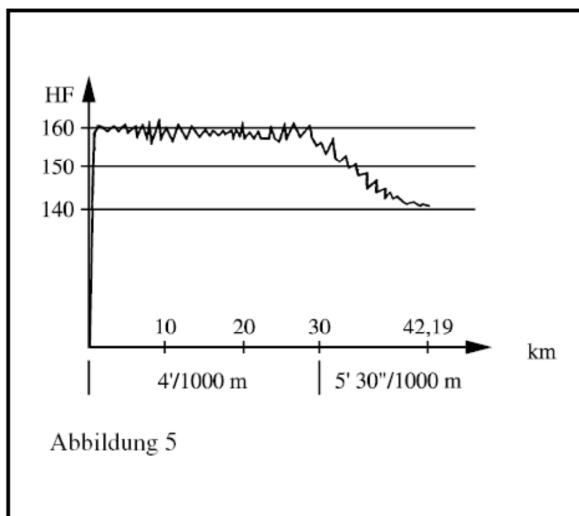
**c) Aerobe Phase**

Geht die Belastung über einen Zeitraum von 60 Sekunden hinaus, so muss die Energiebereitstellung aerob erfolgen. Hierbei wird Glukose unter Verbrauch von Sauerstoff in ATP, Kohlendioxyd und Wasser gespalten. Neben Glukose können auch Fettsäuren und in geringem Umfang die Aminosäuren in den Stoffwechsel einbezogen werden. Diese Art der Energiebereitstellung ist von Bedeutung um für die gesamte Dauer eines Spiels mit wechselnden Belastungen, auch niedriger Intensität, die Muskulatur mit Energie zu versorgen.

#### 4. Beispiel zur Energiebereitstellung: Marathon

Die Abbildung zeigt die Herzfrequenzkurve eines Marathonläufers bei einem Wettkampf. Bis Kilometer 30 hält der Athlet eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 4' auf 1 000 Meter. Ab Kilometer 30 sinkt diese Durchschnittsgeschwindigkeit auf 5' 30" auf 1 000 Meter. Parallel dazu verändert sich die Herzfrequenz.

Erläutern Sie anhand dieser Abbildung die jeweiligen Stoffwechselvorgänge bei der Energiebereitstellung in der Arbeitsmuskulatur vor und nach Kilometer 30 und leiten Sie daraus ab, wie es zum Leistungseinbruch an dieser Stelle kommen konnte!

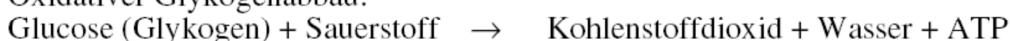


(30)

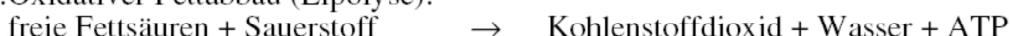
#### Lösung:

Die Energiegewinnung läuft während des gesamten Marathonlaufs weitgehend **aerob** und **alaktazid** über den Glykogenabbau und die Lipolyse. Beide Stoffwechselvorgänge finden weitgehend in den Mitochondrien statt und überlagern sich:

I. Oxidativer Glykogenabbau:



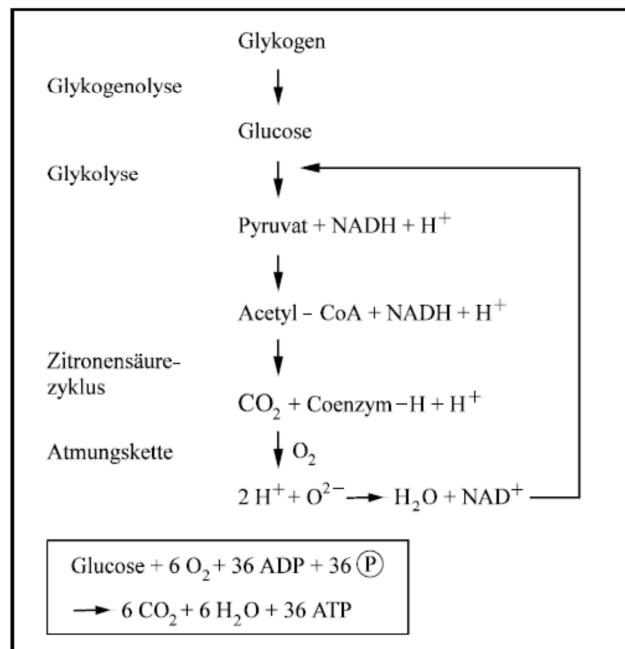
II. Oxidativer Fettabbau (Lipolyse):



**Zu I.:** Der in der Muskelzelle vorliegende Traubenzucker, die so genannte tierische Stärke (Glykogen) wird mittels der Glykogenolyse in endständige Glucosemoleküle gespalten; dieser Spaltung schließt sich die Glykolyse an; dabei entstehen letztendlich 2 Pyruvatmoleküle.

Das Pyruvat (Brenztraubensäure) wird nun bei der oxidativen Energiegewinnung oxidiert (Abspaltung von 2 H-Atomen) und decarboxyliert (Abspaltung von CO<sub>2</sub>). Es entsteht die aktivierte Essigsäure (Acetyl-Coenzym A), die in den Zitronensäurezyklus eingeschleust und dort mittels verschiedener Enzyme weiter abgebaut wird. Der frei werdende Wasserstoff wird in der Atmungskette auf Sauerstoff übertragen (Bildung von H<sub>2</sub>O).

Aus 1 mol Glucose werden oxidativ insgesamt 38 mol ATP; während er ersten beiden Schritte (Glykogenolyse und Glykolyse) werden nur 2 mol ATP, vom Zitronensäurezyklus ab 36 mol ATP gewonnen.



**Zu II.:** Fette, die in der Muskelzelle und im Unterhautgewebe als Triglyceride vorliegen, werden zunächst in ihre Bestandteile Glyzerin und Fettsäuren gespalten. Aus den Fettsäuren, die viele C-Atome enthalten, wird durch die  $\beta$ -Oxidation jeweils ein Bruchstück mit zwei C-Atomen abgetrennt und zu Acetyl-Coenzym A aktiviert.

1 mol Fettsäuren (z. B. Palmitinsäure mit 16 C-Atomen) liefert insgesamt etwa 130 mol ATP.

Die Intensität der Muskelarbeit und damit die Kontraktionsgeschwindigkeit verändert sich in Abhängigkeit zu diesen genannten Stoffwechselvorgängen. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Flussraten:

Maximale Flussrate [ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Glykogen aerob: 0,5

Fettsäuren aerob: 0,25

und zum anderen an dem pro Liter Sauerstoff erreichten Brennwert:

Es ergeben pro g

Glucose: 5,1 kcal = 6,34 ATP

Fett: 4,5 kcal = 5,7 ATP.

Interpretation der Herzfrequenzkurve:

Die Glykogenspeicher sind aufgrund der zu hohen Anfangsgeschwindigkeit (Herzfrequenz etwa 160 Schläge pro Minute; 4 Minuten für 1 000 m) aufgebraucht, sodass ab Kilometer 30 vorwiegend die Lipolyse zur Energiebereitstellung beiträgt.

Hieraus resultieren niedrigere Herzfrequenz und niedrigere Kontraktionsgeschwindigkeit in der Arbeitsmuskulatur, was wiederum zu einer deutlich verringerten Laufgeschwindigkeit (5 Minuten 30 Sekunden für 1 000 m) führt.

## 5. Beispiel zur Energiebereitstellung: Leichtathletik

Stellen Sie die verschiedenen Arten der Energiebereitstellung bei einem 100 m-Sprint dar! (7)

Beim 100 m-Sprint steigt der Energiebedarf in der beanspruchten Muskulatur plötzlich um mehr als das 100-Fache an. Die Energienachlieferung durch eine schrittweise Oxidation den Nährstoffen ist viel zu langsam, um die bei den ersten maximalen Muskelkontraktionen am Start benötigte Energie innerhalb von Sekunden bereitzustellen zu können. Die Muskelzelle verfügt jedoch über so genannte Energiespeicher, aus denen die Energie für die Muskelkontraktionen schnell und für 10–20 Sekunden in relativ großer Menge direkt bereitgestellt werden kann. Diese Energiespeicher bestehen aus den energiereichen Phosphatverbindungen *Adenosintriphosphat* (ATP) und *Kreatinphosphat* (KP).

Bei der Abspaltung des endständigen Phosphatrestes vom ATP entsteht Adenosindiphosphat und es wird Energie freigesetzt, die die energiebenötigenden Prozesse in der Zelle direkt belieft:



Der ATP-Vorrat im Muskel ist allerdings so gering, dass damit nur drei bis vier maximale Muskelkontraktionen ausgeführt werden können. Um die rasche Erschöpfung des ATP-Speichers zu verhindern, verfügt die Muskelzelle über eine zweite energiereiche Phosphatverbindung, das Kreatinphosphat, welches in größerer Konzentration im Muskel vorliegt und das ATP wieder regeneriert (anaerob alaktazide Energiebereitstellung):



Gleichzeitig setzt eine Resynthese des ATP durch die anaerobe Oxidation von Kohlenhydraten unter Bildung von Laktat ein (anaerob laktazide Energiebereitstellung):



Die Resynthese des ATP durch aerobe Oxidation kann beim 100 m-Lauf aufgrund der kurzen Belastungsdauer vernachlässigt werden.

## 4.2 Ermüdung und Erholung

Die Ermüdung ist ein entscheidender, leistungsbegrenzender Faktor im sportlichen Training und Wettkampf. Grundsätzlich unterscheidet man folgende Arten der Ermüdung: **Periphere** und **zentrale Ermüdung**, sowie **Übertraining**.

### Periphere Ermüdung

Jede Leistung oberhalb der Dauerleistungsgrenze (Energiebedarf > Energiebereitstellung) führt zur Muskelermüdung oder auch *peripherer* Ermüdung.

- ⇒ Der während der Kontraktion verringerte Energiespeicher kann in der Erschlaffungsphase nicht mehr voll aufgefüllt werden.
- ⇒ Ein Ermüdungsrückstand bleibt von Kontraktion zu Kontraktion bestehen
- ⇒ Anstieg des Rückstandes
- ⇒ Belastungsabbruch

#### Ermüdungsursachen

*Anhäufung von Stoffwechselprodukten* (Trainierte haben höhere Säuretoleranz)

- saure Stoffwechselprodukte häufen sich an
- Fermentsysteme werden gehemmt u.a. Myosin-ATP-ase
- ATP-Spaltung nicht mehr möglich → Einschränkung der Muskeltätigkeit

*Erschöpfung von energiebereitstellenden und energieliefernden Prozessen*

- Erschöpfung der energiereichen Phosphate
- Verarmung an Glykogen

*Änderung des physikochemischen Zustandes*

- Änderungen im Ionengleichgewicht v.a. Verlust an Kaliumionen
- dadurch Beeinträchtigung des Membranpotentials (Erregbarkeit der Muskelzelle), d.h. enge Beziehung zwischen intrazellulärem Kaliumgehalt des Muskels und dem Grad der Ermüdung.

*Transmitterermüdung*

- überschießende oder unzureichende Freisetzung von Acetylcholin
- → Störung der Erregungsübertragung vom Nerv zum Muskel

### Akute zentrale Ermüdung

- Nachlassen der Fähigkeit koordinierte Bewegungen präzise auszuführen.
- Abnahme der koordinativen Leistungsfähigkeit
- Abnahme der sensorischen Leistungsfähigkeit (akustisch, visuell)
  - Störungen der Aufmerksamkeit, der Konzentration und des Denkens  
(Fehleinschätzung des Gegners)
- Herabsetzung der Antriebs- und Steuerungsfunktion (sinkende Motivation)
- Verlängerung der Reaktionszeit

### Übertraining (auch allgemeine, chronische Ermüdung)

Zu hartes Training, berufliche, private Überlastung, Schlafmangel, Fehlernährung...

Ermüdungserscheinungen sind i.A. spätestens nach 24 Stunden abgeklungen (Ausnahme Übertraining: 1 Woche bis mehrere Monate).

Dabei ist eine gezielte Erholung ebenso wichtig, wie eine gezielte Belastung.

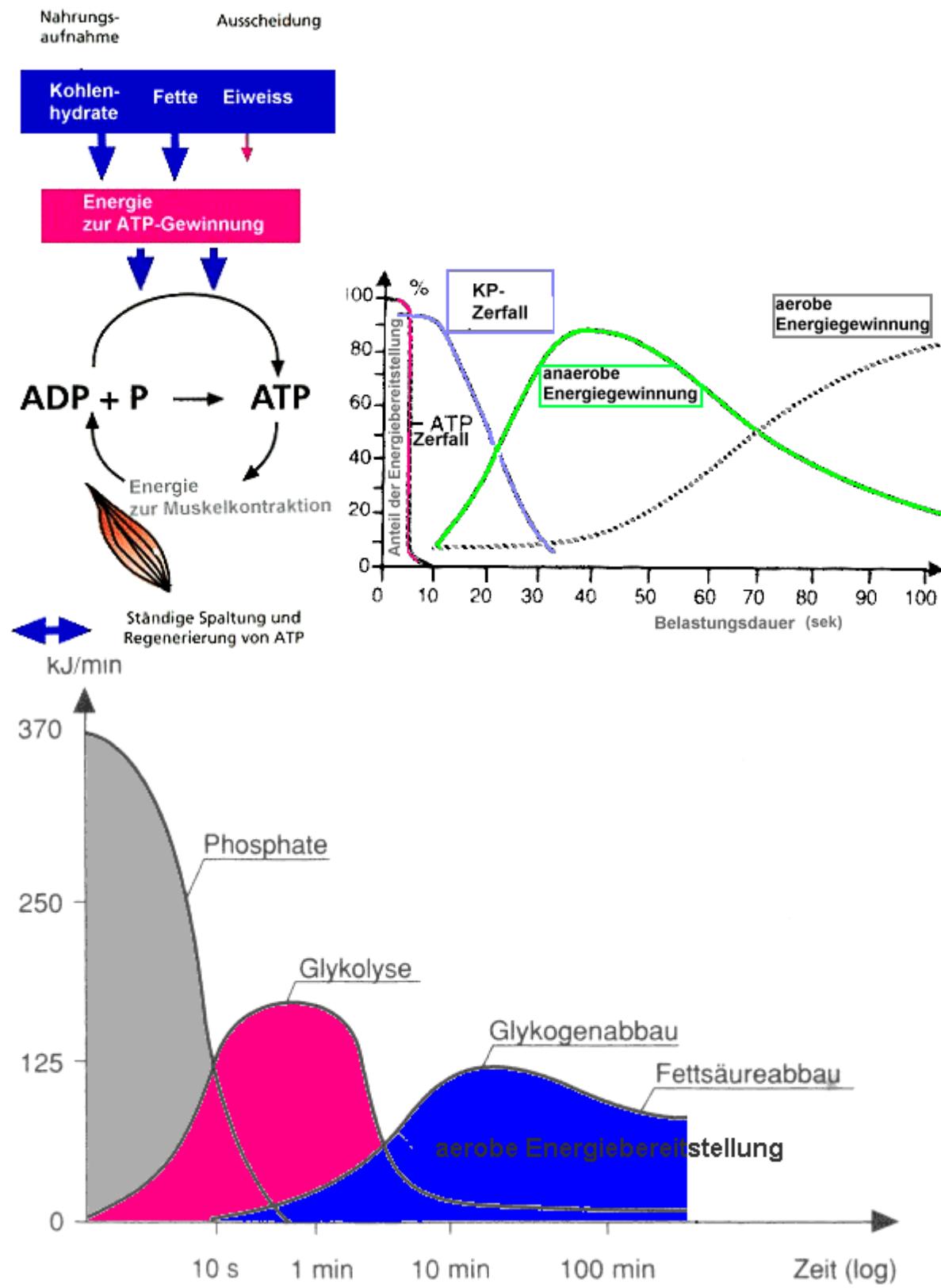
#### *Aktive Erholung*

Durch Auslaufen, Ausschwimmen, Gymnastik u.a. wird die Laktateliminationszeit auf 1/3 verringert

#### *Passive Erholung*

Sauna, Massage, Schlaf, autogenes Training

Beachten Sie: Ohne Ermüdung ist weder eine Regeneration noch die für einen Sportler so entscheidende **Superkompensation** (Phase der biochemischen und physiologischen Wiederherstellung verbrauchter Energiequellen nach einer Belastung über das Ausgangsniveau hinaus) möglich, die die Grundlage für die Funktions- und Leistungssteigerung darstellt.

Zusatzmaterial:

## Energiestoffwechsel des Muskels/Innere Atmung

Aus Gründen der Systematik wird der Weg des Sauerstoffs mit seiner Aufnahme aus der Umgebungsluft bis zu seiner „Verarbeitung“ in den Mitochondrien als Atmung bezeichnet. Der Begriff „innere Atmung“ oder „Zellatmung“ unterstreicht diese Systematik. Bei der Lehrpleneinheit Atmung bietet es sich an, den Schülern/innen diese übergreifende Zusammenhänge aufzuzeigen. Die inhaltliche Erarbeitung wird bereits im Rahmen der Energiebereitstellung geleistet.

Der physikalische Transport bis zu den roten Blutkörperchen wird als äußere Atmung bezeichnet.

Der chemische Vorgang der inneren Atmung beginnt nach der Aufnahme des Sauerstoffs aus der Blutbahn in die Körperzellen. Der Weg des Endproduktes  $\text{CO}_2$  von der Atmungskette zurück bis zur Abatmung soll im Rahmen der Gesamtsystematik ebenfalls erläutert werden.

Im Wesentlichen umschließt der Begriff innere Atmung den aeroben biochemischen Abbau komplexer Kohlenstoffverbindungen (v.a. Fette und Kohlenhydrate) im Bereich der Mitochondrien.

Das Stoffgebiet knüpft damit an den Bereich der Energiebereitstellung an, wobei im Gegensatz zur Biologie/Chemie der Qualifizierungsstufe weitgehend auf die Verwendung chemischer Formeln verzichtet werden soll.

Der in den **Mitochondrien** ablaufende Vorgang im Überblick:

Das Endprodukt der Glykolyse (Pyruvat) wird in die Mitochondrien transportiert. Die unter  $\text{CO}_2$ -Abspaltung entstehende aktivierte Essigsäure wird anschließend im **Citratzyklus** unter Bildung von Kohlenstoffdioxid weiter oxidiert. Dabei wird  $\text{NADH}/\text{H}^+$ ,  $\text{FADH}_2$  erzeugt.

Im folgenden Reaktionskomplex, der **Atmungskette**, werden Elektronen von  $\text{NADH}/\text{H}^+$ ,  $\text{FADH}_2$  letztendlich auf den Sauerstoff übertragen. In einer gebremst ablaufenden Knallgasreaktion – dadurch wird die Zerstörung der Zelle verhindert – entsteht das Reaktionsendprodukt Wasser. Dabei wird Energie frei, die zur Synthese von ATP an der inneren Membran der Mitochondrien verwendet und als Wärme abgegeben wird.

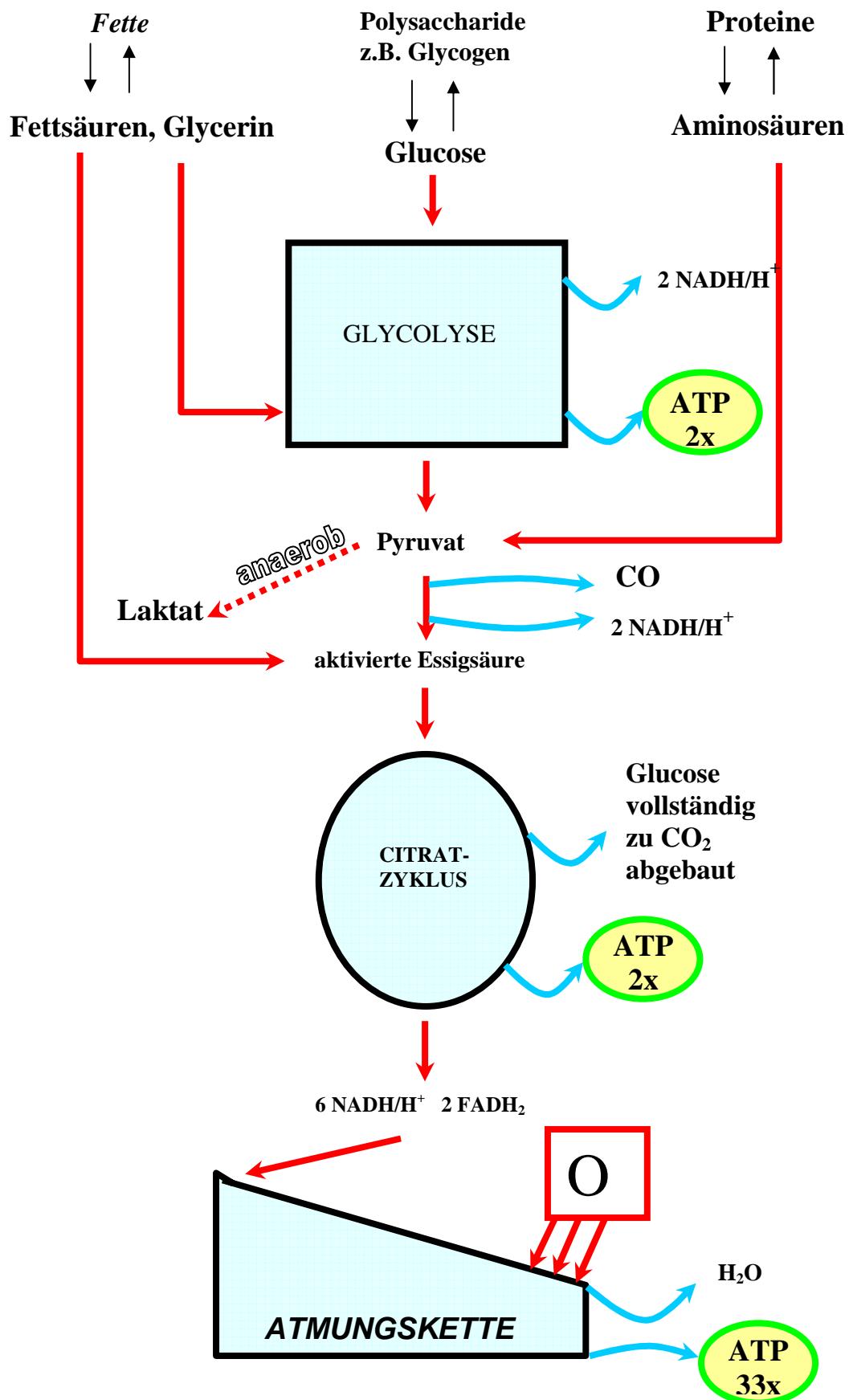
Summengleichung der aeroben Energiegewinnung (Zellatmung):



### Anmerkung:

Früher ging man davon aus, dass pro  $\text{NADH}/\text{H}^+$  in der Atmungskette 3 ATP gebildet werden. Neuere Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass es weniger sind. Man rechnet üblicherweise mit dem Faktor 2,5.

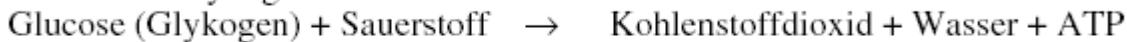
Daraus ergeben sich unterschiedliche Angaben zur ATP-Ausbeute in der Literatur, die zwischen 30 und 38 schwanken.

**Abb. 3:** Schematische Darstellung

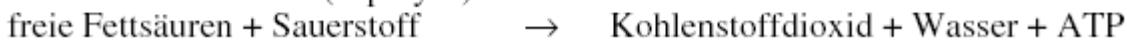
## Glykogenabbau und die Lipolyse

Bei lang andauernden Belastungen gilt: Die Energiegewinnung läuft weitgehend **aerob** und **alaktazid** über den Glykogenabbau und die Lipolyse. Beide Stoffwechselvorgänge finden weitgehend in den Mitochondrien statt und überlagern sich:

### I. Oxidativer Glykogenabbau:



### II. Oxidativer Fettabbau (Lipolyse):



**Zu I.:** Der in der Muskelzelle vorliegende Traubenzucker, die so genannte tierische Stärke (Glykogen), wird mittels der Glykogenolyse in endständige Glucosemoleküle gespalten; dieser Spaltung schließt sich die Glykolyse an; dabei entstehen letztendlich 2 Pyruvatmoleküle.

Das Pyruvat (Brenztraubensäure) wird nun bei der oxidativen Energiegewinnung oxidiert (Abspaltung von 2 H-Atomen) und decarboxyliert (Abspaltung von CO<sub>2</sub>). Es entsteht die aktivierte Essigsäure (Acetyl-Coenzym A), die in den Zitronensäurezyklus eingeschleust und dort mittels verschiedener Enzyme weiter abgebaut wird. Der frei werdende Wasserstoff wird in der Atmungskette auf Sauerstoff übertragen (Bildung von H<sub>2</sub>O).

Aus 1 mol Glucose werden oxidativ insgesamt 38 mol ATP: während der ersten beiden Schritte (Glykogenolyse und Glykolyse) werden nur 2 mol ATP, vom Zitronensäurezyklus aber 36 mol ATP gewonnen.

**Zu II.:** Fette, die in der Muskelzelle und im Unterhautgewebe als Triglyceride vorliegen, werden zunächst in ihre Bestandteile Glyzerin und Fettsäuren gespalten. Aus den Fettsäuren, die viele C-Atome enthalten, wird durch die  $\beta$ -Oxidation jeweils ein Bruchstück mit zwei C-Atomen abgetrennt und zu Acetyl-Coenzym A aktiviert. 1 mol Fettsäuren (z. B. Palmitinsäure mit 16 C-Atomen) liefert insgesamt etwa 130 mol ATP.

Die Intensität der Muskelarbeit und damit die Kontraktionsgeschwindigkeit verändert sich in Abhängigkeit zu diesen genannten Stoffwechselvorgängen. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Flussraten:

Maximale Flussrate [ $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Glykogen aerob: 0,5

Fettsäuren aerob: 0,25

Zum anderen an dem pro Liter Sauerstoff erreichten Brennwert:

Es ergeben pro g

Glucose: 5,1 kcal = 6,34 ATP

**Fett: 4,5 kcal = 5,7 ATP.**