

A photograph of several runners in motion, blurred to convey speed. The runners are wearing various colored athletic wear, including red and white shirts. The background is a green field, also blurred.

Josef Tomasits · Paul Haber

Leistungs- physiologie

Lehrbuch für Sport- und
Physiotherapeuten und Trainer

5. Auflage

 Springer

Leistungsphysiologie

Josef Tomasits
Paul Haber

Leistungsphysiologie

Lehrbuch für Sport- und Physiotherapeuten und Trainer

5. Auflage

 Springer

Dr. Josef Tomasits
Kepler Universitätsklinikum
Med Campus III
Zentrallabor
Linz
Österreich

Ao. Univ. Prof. Dr. Paul Haber
Klinische Abteilung für Pulmologie
Universitätsklinik für Innere Medizin IV
Wien
Österreich

ISBN 978-3-662-47259-0
DOI 10.1007/978-3-662-47260-6

ISBN 978-3-662-47260-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Medizin

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Satz: Crest Premedia Solutions (P) Ltd., Pune, India

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort zur 5. Auflage

Bereits 10 Jahre nach der ersten Auflage ist eine 5. Neuauflage notwendig, was die Autoren mit Freude zur Kenntnis nehmen. In dieser neuen Auflage wurden alle Kapitel im Hinblick auf noch mehr Klarheit und Verständlichkeit des Textes durchforstet. Dem Schwerpunkt »Klinische Altersforschung und Vorsorgeforschung« der neugegründeten Medizinischen Fakultät der Johannes Kepler Universität Linz folgend, haben wir vier neue Trainingsrezepte für diese Zielgruppe eingefügt, weil Klienten von Experten konkrete Trainingsanweisungen erwarten. Auch im Kapitel Ernährung wurde ein konkretes Ernährungsbeispiel für ältere Klienten aufgenommen. Wegen dieser Erweiterungen wurde der Text in anderen Bereichen gestrafft, um den Umfang nicht übermäßig anschwellen zu lassen.

Wir wünschen unserer Leserschaft viel Freude und Erfolg bei der praktischen Umsetzung des Wissens und bei der Betreuung ihrer Klienten.

Josef Tomasits
Paul Haber

Anmerkung

Durch einen Fehler im Ablauf der Produktion wurde der Inhalt des Werks als E-Book leider vor Autorenfreigabe veröffentlicht. Die gedruckten Bücher und das korrigierte E-Book entsprechen der finalen vom Autor freigegebenen Fassung.

Inhaltsverzeichnis

1	Basics	1
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
2	Bedeutung des Ausdauertrainings bei Erkrankungen	21
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
3	Energieumsatz unter Belastung	29
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
4	Wie reagiert der Körper auf Belastungen?	41
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
5	Muskelkraft	65
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
6	Leistungsdiagnostik	79
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
7	Regeln der medizinischen Trainingslehre	101
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
8	Trainingsmethoden	115
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
9	Trainingsrezepte	123
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
10	Frauen betreiben Sport	147
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
11	Ermüdung	155
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
12	Übertraining	159
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
13	Regeneration	163
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
14	Training nach Verkühlung bzw. Verletzung	167
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
15	Muskelkrämpfe	171
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	

16	Dehnen	173
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
17	Thermoregulation	177
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
18	Höhenexposition	193
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
19	Ernährung	203
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
20	Erratum zu: Leistungsphysiologie	E1
	<i>Josef Tomasits, Paul Haber</i>	
	Serviceteil	
	Anhang	242
	Weiterführende Literatur	245
	Stichwortverzeichnis	246

Abkürzungsverzeichnis

A	Alter in Jahren	HVR	Hyperventilation, Mehratmung
AAA	alaktazid anaerobe Ausdauer	I	Trainingsintensität in % der $\dot{V}O_{2max}$
Acetyl-CoA	aktivierte Essigsäure	IAA	intensiv aerobe Ausdauer
ADL	Activities of Daily Living	Im	mittlere Intensität in % der $\dot{V}O_{2max}$
ADP	Adenosindiphosphat	K	Kalium
AÄ	Atemäquivalent	KO	Körperoberfläche in m ²
AMP	Adenosinmonophosphat	KT	Krafttraining
AMV	Atemminutenvolumen	kcal	Kilokalorien
ANS	anaerobe Schwelle	kJ	Kilojoule
AT	Ausdauertraining	kg	Kilogramm
ATP	Adenosintriphosphat	Kp	Kilopond
AVDO₂	arteriovenöse Sauerstoffdifferenz	KG	Körpergewicht in kg
BTPS	Body temperature pressure saturated	KH	Kohlenhydrat
C	Kohlenstoff	KHK	koronare Herzkrankheit
Ca	Kalzium	LAA	laktazid anaerobe Ausdauer
CO₂	Kohlendioxid	LF	Leistungsfähigkeit
DLO₂	O ₂ -Diffusionskapazität der Lunge	LF%Ref	Leistungsfähigkeit in % des Referenzwertes (Normalwertes)
DP	Doppelprodukt, aus HF x RRsystem	Lj	Lebensjahre
EAA	extensiv aerobe Ausdauer	LU	Leistungsumsatz
EDV	enddiastolisches Volumen	M	metabolische Leistung in Watt
EIT	extensives Intervalltraining	MET	Metabolic unit = metabolische Einheit
EW	Eiweiß	MLSS	max. Laktat-steady-state
EWM	Einwiederholungsmaximum	Mg	Magnesium
f	Frequenz	Na	Natrium
F	Fett	N	Newton
FAKT	fortlaufend adaptiertes Krafttraining	NaCl	Kochsalz
FFM	fettfreie Masse	NO	Stickoxid
FFS	freie Fettsäuren	O₂	Sauerstoff
FL	Luftwiderstand	pCO₂	Kohlendioxidpartialdruck
FOX	Fettoxidation	PL	Luftwiderstandsleistung
G	Steigung in %	pO₂	Sauerstoffpartialdruck
Gew	Gewicht einer Zusatzlast in kg	RPE	Ratings of perceived exertion = empfundene Belastungsintensität nach der BORG-Skala 6–20
GU	Grundumsatz in kcal	RL	Rollwiderstandsleistung
H⁺	Wasserstoffionen, d.h. Säureäquivalente	RQ	respiratorischer Quotient
HF	Herzfrequenz	RR	Blutdruck (nach Riva Rocci)
Hfmax	maximale Herzfrequenz pro Minute	S/MG/W	Satz pro Muskelgruppe und Woche
HM	Höhenmeter	SV	Schlagvolumen
HMV	Herzminutenvolumen		
Hz	Hertz (Frequenzangabe)		

STPD	Standard temperature pressure dry
T	Terrainfaktor (Asphalt 1,0, verfestigter Schnee 1,3, loser Sand 2,1, weicher Schnee mit 15 cm Eindringtiefe 2,5, bei 25 cm 3,3 und bei 35 cm 4,1)
TE/W	Trainingseinheiten pro Woche
TRU	Trainingsumsatz
TU	Tagesumsatz
v	Geschwindigkeit in m/s oder km/h
\dot{V}_E	expiratorisches Atemminutenvolumen
$\dot{V}O_2$	Kohlendioxidabgabe
$\dot{V}O_2$	Sauerstoffaufnahme
$\dot{V}O_{2max}$	maximale Sauerstoffaufnahme
Vt	Atemzugvolumen
VT	ventilatorische Schwelle (engl. threshold) = $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$
W	Watt = Leistungseinheit
WNTZ	Wochennettotrainingszeit (ist die Zeit nur im trainingswirksamen Bereich)
WTZ	Wochentrainingszeit (gesamte Trainingszeit pro Woche inkl. der nicht im trainingswirksamen Bereich gelegenen Trainingszeit)

Basics

Josef Tomasits, Paul Haber

- 1.1 Woher beziehen wir Energie? – 2**
 - 1.1.1 Oxidative Energiebereitstellung im Zitronensäurezyklus – 6
 - 1.1.2 Energieversorgung mit Kohlenhydraten aus der Nahrung – 7
 - 1.1.3 Insulin – 8
 - 1.1.4 Energiebereitstellung aus Fetten – 10
 - 1.1.5 Vergleich Kohlenhydrate mit Fett – 12
 - 1.1.6 Wunschvorstellung »fat burning« – 12
 - 1.1.7 Energiebereitstellung aus Eiweiß – 14
 - 1.1.8 Eiweißverdauung – 14
 - 1.1.9 Eiweißbedarf – 15
 - 1.1.10 Anabolie, Katabolie – 16
 - 1.2 Was ist Ausdauer? – 16**
 - 1.2.1 Anaerobe Ausdauer – 17
 - 1.2.2 Aerobe Ausdauer – 17
- Weiterführende Literatur – 19**

1.1 Woher beziehen wir Energie?

Der Ursprung aller biologisch verwertbaren Energie sowohl im Tier- als auch im Pflanzenreich ist zunächst die Sonne (■ Abb. 1.1). Allerdings kann die Strahlungsenergie direkt nur von Pflanzen genutzt werden (mit Hilfe des grünen Blattfarbstoffes Chlorophyll) und nicht von Mensch und Tier. Dieser Vorgang ist als **Photosynthese** bekannt. Die Pflanzen speichern die Strahlungsenergie in Form von Adenosin-Tri-Phosphat (ATP).

ATP

ATP entsteht durch Bindung von insgesamt 3 Molekülen Phosphorsäure an das große Molekül Adenosin. ATP wird über die Zwischenstufen **Adenosin-Mono-Phosphat (AMP)** und **Adenosin-Di-Phosphat (ADP)** synthetisiert. ATP ist ein chemischer Energiespeicher, ähnlich wie eine gespannte Feder ein physikalischer Energiespeicher ist. Die Energie ist in den Atombindungen gespeichert und wird daher Bindungsenergie genannt.

Durch die Abspaltung von Phosphorsäure wird die gebundene Energie wieder frei und steht für die eigentlichen Lebensvorgänge wieder zur Verfügung. Diesbezüglich unterscheidet sich die Funktion des ATP nicht in pflanzlichen und tierischen Organismen.

Bei der ATP-Spaltung entstehen ADP und freie Phosphorsäure, die dann in den Chloroplasten wieder zu ATP resynthetisiert werden. Die freiwerdende Energie wird von der Pflanze genutzt, um aus dem **Kohlendioxid** (CO_2 aus der Luft dient als Pflanzennahrung) und Wasser (H_2O), Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Zellulose), Fette und – zusätzlich mit dem Stickstoff aus dem Boden und der Luft – Aminosäuren und Proteine zu synthetisieren.

❓ **In welcher Form speichern Pflanzen Kohlenhydrate?**

Die Speicherform der Kohlenhydrate in den Pflanzen ist die Stärke (■ Abb. 1.2), die wir Menschen durch unser Verdauungsenzym Amylase (hauptsächlich aus der Bauchspeicheldrüse) verdauen können.

Die Grundlage des Energiestoffwechsels bei Mensch und Tier ist die in Pflanzen gespeicherte Energie in Form von Zucker, Aminosäuren und Fetten. Pflanzenfresser können direkt die von den Pflanzen zur Verfügung gestellten Stoffe als Nährstoffe nutzen. Dabei wird der Synthesevorgang der Pflanzen im Prinzip nur umgekehrt: die Kohlenstoffketten werden bis zu ihren Ausgangsprodukten CO_2 und Wasser oxidiert und dann an die Umgebung abgegeben. Dafür müssen tierische Organismen zur Bildung des Wassers jene Menge an **Sauerstoff** (O_2) aufnehmen, die zuvor von den Pflanzen abgegeben wurde. Dieser Vorgang, der chemisch eine **Oxidation** (»**Verbrennung**«) ist, läuft in jeder tierischen Zelle in den Mitochondrien ab und wird als **Gewebsatmung** bezeichnet.

➤ **Die dabei freiwerdende Bindungsenergie wird auch von den tierischen Zellen zur Bildung von ATP verwendet. ATP ist dann der eigentliche universelle Energielieferant für alle energieumsetzenden Prozesse.**

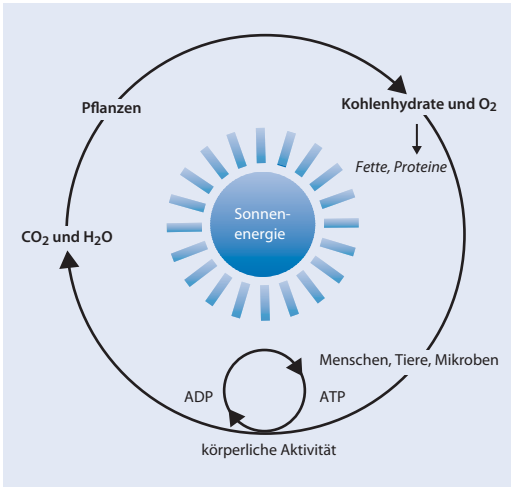
Die freigesetzte Energie aus der Umwandlung von ATP zu ADP und Phosphat wird für die Muskelkontraktion benötigt. Aber auch andere Funktionen benötigen Energie, die von der ATP-Spaltung stammt, wie z. B. die Produktion von Magensäure oder im Tierreich exotische Erscheinungen wie z. B. das Leuchten von Glühwürmchenschwänzchen.

❓ **Wie hoch ist die ATP-Menge und der Kreatinphosphatgehalt?**

Der menschliche Organismus enthält insgesamt ca. 80 g ATP, was einer Energiemenge von max. 2 kcal entspricht. Diese Menge kann aber keinesfalls total aufgebraucht werden, da die Aufrechterhaltung der Zellstrukturen, die Aktivität von **Ionenpumpen**, die Aufrechterhaltung der Körperwärme und andere vitale Lebensvorgänge an die Anwesenheit einer ausreichenden ATP-Menge gebunden sind. **Daher führt ein ATP-Abfall unter 40% des Ruhewertes zum Zelltod!**

An einem normalen Berufsalltag setzt ein 80 kg schwerer Mann ca. 2300 kcal und eine 70 kg schwere Frau etwas weniger als 2000 kcal um. Davon werden zwei Drittel für die lebensnotwendigen basalen

1.1 • Woher beziehen wir Energie?



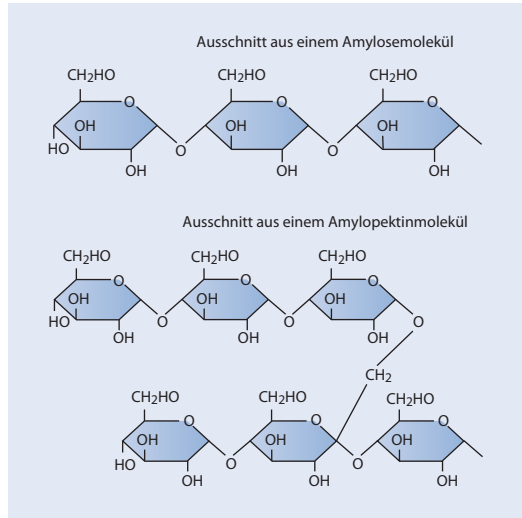
■ **Abb. 1.1** Vereinfachte Darstellung des Energiekreislaufs

Lebensvorgänge benötigt und nur ein Drittel für Aktivitäten wie Bewegung. Um bei raschem Anstieg des Energiebedarfs einen kritischen ATP-Abfall zu verhindern, hat die Zelle noch einen weiteren Energiespeicher, auf der Basis einer energiereichen Phosphatverbindung, das **Kreatinphosphat (KP)**.

❓ **Wie hoch ist der KP-Zellgehalt?**

Der KP-Zellgehalt ist etwa das 3–5 fache der ATP-Menge und repräsentiert damit einen Energiovorrat von ca. 8 kcal. Durch Abspaltung von Phosphorsäure aus KP wird Energie frei, die bei **kurzdauernder Bewegung** benötigt wird, z. B. Wechsel vom Sitzen zum Stehen oder Gewicht anheben. Nach der Belastung wird das KP unter ATP-Verbrauch wieder aufgebaut.

➤ **Die freier werdende Energie bei der Kreatinphosphatspaltung dient zum »Wiederaufladen« von ATP aus ADP und Phosphorsäure. Dadurch kann bei plötzlicher Zunahme des Energieumsatzes, wie z. B. beim Sprint mit hohem ATP-Verbrauch, ein kritischer ATP-Abfall verhindert werden. Da diese Form der ATP-Resynthese ohne unmittelbare Mitwirkung von Sauerstoff erfolgt, wird sie anaerob genannt.**



■ **Abb. 1.2** Aufbau des Glykogens

Zusätzlich gibt es für die ATP-Resynthese noch andere Stoffwechsellvorgänge, wie der ebenfalls **anaerobe Zuckerabbau (anaerobe Glykolyse)**, sowie die **aerobe Oxidation von Glukose und Fettsäuren**. Sowohl beim anaeroben als insbesondere auch beim aeroben Zuckerabbau sind ATP-Bildungsraten deutlich geringer, mit der Folge, dass die Leistungsgenerierung deutlich geringer ist.

❓ **Welche Energiequellen werden im Muskelstoffwechsel genutzt?**

Alle lebenden Zellen beziehen ihre Energie zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen aus den gleichen Stoffwechsellvorgängen. Die Basis des **Energiestoffwechsels** ist der oxidative Abbau (= Verbrennung) von Kohlenhydraten und Fetten. Im Unterschied dazu bezeichnet der Begriff **Baustoffwechsel** den Aufbau und Erhalt der Strukturen (der die Hauptmenge des zugeführten Eiweißes beansprucht).

❓ **Was versteht man unter Glykolyse?**

Unter Glykolyse versteht man die Energiebereitstellung aus Glukose. Anders ausgedrückt: Der Glukoseabbau wird Glykolyse genannt und findet außerhalb der Mitochondrien im Zytoplasma der Zellen statt.

Glukose liegt sowohl im Muskel als auch in der Leber in seiner Speicherform **Glykogen** vor. Deshalb müssen zunächst einmal einzelne Glukosemoleküle vom Glykogen abgespalten werden, bevor die Energiebereitstellung aus der Glukose erfolgen kann. Dieser Vorgang des Glykogenabbaus wird **Glykogenolyse** genannt. Erst dann kann der Glukoseabbau beginnen.

Dabei muss ein Molekül Glukose, dessen Gerüst aus einer Kette aus 6 Kohlenstoffatomen aufgebaut ist, in 2 Moleküle mit je 3 Kohlenstoffatomen gespalten werden (■ Abb. 1.2).

➤ **Die Glykolyse selbst benötigt keinen Sauerstoff, läuft also ohne Sauerstoffverbrauch ab.**

Bei dieser anaeroben Glykolyse entstehen pro Glukosemolekül netto 2 Moleküle ATP und Brenztraubensäure (Pyruvat).

? **Was passiert mit dem Pyruvat?**

Es gibt 3 verschiedenen Stoffwechselwege des Pyruvats:

- Pyruvat kann nach Abspaltung von CO_2 zur **aktivierten Essigsäure** (Acetyl-CoA) und im weiteren Verlauf vollständig zu CO_2 und H_2O abgebaut werden.
- Pyruvat kann aber auch zur Oxalessigsäure (Oxalacetat) abgebaut werden, die im Zitratzyklus eine Schlüsselrolle spielt (s. u.).
- Wenn die Pyruvat-Konzentration schneller steigt, wird die Kapazität der aeroben Energiebereitstellung überfordert und die Pyruvatmenge kann nicht mehr zur Gänze oxidativ im Zitratzyklus verarbeitet werden. Dann wird aus Pyruvat die Milchsäure (Laktat) gebildet, das die Muskelzelle übersäuert.

? **Wann entsteht Laktat?**

Laktat entsteht immer dann, wenn mehr Pyruvat produziert wird, als in den Mitochondrien oxidativ weiterverarbeitet werden kann. Das ist u. a. dann der Fall, wenn bei **hoher Belastungsintensität** die Glykolyse gesteigert wird. Dann ist durch die verstärkte Pyruvatproduktion die Kapazität der aeroben Energiebereitstellung überfordert und aus Pyruvat wird Laktat gebildet.

Deshalb steigt das Laktat nach Reduktion der oxidativen Kapazitäten schneller an. Dies ist dann

der Fall, wenn im aktiven Skelettmuskel die Mitochondriendichte zu gering ist. Und die Hauptursache einer zu **geringen Mitochondrienmasse** ist ein zu niedriges Trainingsniveau, vor allem bei geringem Grundlagentraining. Mit zunehmendem Umfang des Ausdauertrainings steigt die **Mitochondriendichte**. Sind zu wenige Mitochondrien im Muskel vorhanden, dann diffundiert das gebildete Laktat aus der Muskelzelle ins Blut und wird von Herz, Niere und Leber metabolisiert.

➤ **Die Laktatbildung setzt immer dann ein, wenn der Energiebedarf größer ist, als durch oxidativen Abbau bereitgestellt werden kann. Denn dann muss Energie zusätzlich durch den anaeroben Glukoseabbau bereitgestellt werden.**

Ob bei einer bestimmten Belastung Laktat gebildet wird oder Pyruvat vollständig oxidativ verarbeitet werden kann, hängt somit wesentlich von der verfügbaren Mitochondrienmasse ab und nicht vom Sauerstoffdruck im Muskel. Dieser ist bei gesunden Menschen immer normal, auch bei intrazellulärer Übersäuerung (**Azidose**).

Die anaerobe Energiebereitstellung findet bei normalem Sauerstoffdruck im Muskel statt.

? **Was bedeutet der Begriff »anaerob«?**

Der Begriff »anaerob« bezieht sich nur auf die Energiebereitstellung und nicht auf eine tatsächliche Sauerstoffabwesenheit. Diese gibt es schon deshalb nicht, weil mit zunehmender Belastungsintensität die Sauerstoffaufnahme noch weiter, um etwa das Doppelte, ansteigt.

➤ **Ein steigender Blutlaktatspiegel zeigt somit, dass die Muskelzelle nicht das gesamte, in der Glykolyse gebildete Pyruvat im Zitronensäurezyklus oxidieren kann.**

Bei hoher Belastungsintensität wird mehr Pyruvat gebildet, als durch die vorhandene Mitochondrienmasse abgebaut werden kann, oder die Mitochondriendichte war ursprünglich sehr gering, weil nie Ausdauer trainiert wurde. Steigt Laktat bereits bei geringer Belastung an, weist dies auf eine geringe Mitochondriendichte, wegen mangelnden Trainings, hin.

1.1 · Woher beziehen wir Energie?

- 7 Wie viel Prozent des gebildeten Laktats werden oxidativ wo abgebaut?

Rund 75 % des gebildeten Laktats werden zur Energiebereitstellung in Leber, Herz und Niere oxidativ abgebaut. Der Rest an Laktat wird in der Leber wieder zu Glukose synthetisiert (sog. **Cori-Zyklus**). Der Laktatabbau wird durch aktive Erholung stärker gefördert als in Ruhe.

- 7 Wie erfolgt die Kontrolle dieser komplexen Stoffwechselprozesse?

Das Schlüsselenzym ist die **Phosphorylase**, welches sowohl die Glykolyse als auch die Glykogenolyse steuert. Die Phosphorylase wird durch Adrenalin und durch freies ADP stimuliert, der Zitratzyklus hemmt sie und damit den Zuckerabbau (Abb. 1.3).

- Die Hemmung der Glykolyse durch den Zitratzyklus wird Pasteur-Effekt genannt. (In Anlehnung an die Entdeckung von Pasteur, dass die alkoholische Gärung = anaerober Glukoseabbau = Umwandlung des Traubenzuckers in Alkohol, durch Sauerstoffzufuhr gehemmt wird.)

Bei geringer und mäßiger Belastungsintensität ist die Glykolyse gehemmt, weil nur wenig Adrenalin und ADP gebildet werden. Ab einer Belastungsintensität von 75 % $\dot{V}O_{2max}$ steigt die Katecholamin- und ADP-Konzentration auf das 10fache an. Die hohen Adrenalin- und ADP-Konzentrationen enthemmen die Glykolyse und aus dem reichlich gebildeten Pyruvat wird Laktat gebildet, weil die Pyruvatmenge den Zitratstoffwechsel überfordert.

Bei zunehmender Belastungsintensität, wenn der gesamte Energieumsatz größer wird als oxidativ über den Zitratstoffwechsel bereitgestellt werden kann, wird die **Glykolysehemmung** (der Pasteur-Effekt) durch die zunehmende ADP- und Adrenalin-Konzentration »überwunden«.

- Die Glykolyse wird mit zunehmender Belastungsintensität dazugeschaltet, ohne dass die Aktivität der aeroben Energiegewinnung (Zitratzyklus) auch nur im geringsten beeinträchtigt wird (läuft auf »Hochtouren« weiter).

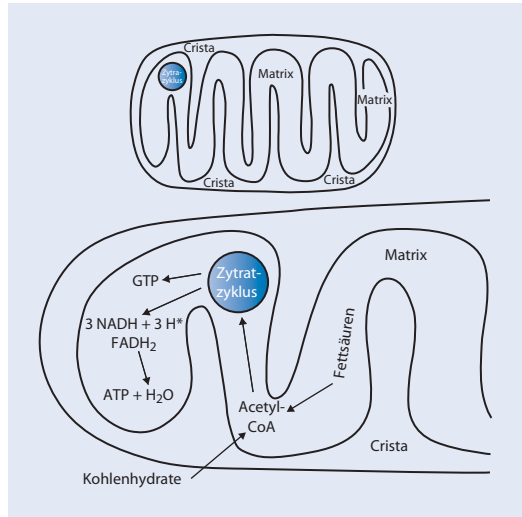


Abb. 1.3 In den Mitochondrien laufen Zitratzyklus und Atmungskette ab

Die **Stresshormone Katecholamine** (Adrenalin und Noradrenalin aus den Nebennieren) fördern den Glykogenabbau in Leber und Muskel (Abb. 19.8). Damit stellen sie Glukose als Energiesubstrat zur Verfügung. Aber nicht nur im Kohlenhydratstoffwechsel sind die Katecholamine wichtige Stoffwechselregulatoren, wo sie u. a. die Insulinsekretion hemmen, sondern auch beim Fettabbau (Lipolyse), den sie fördern.

- Mit steigender Belastungsintensität nehmen die Katecholamine auf das 16–18fache des Ausgangswertes zu. Damit kommt es zur »Enthemmung« der Glykolyse bei gleichzeitiger Insulinhemmung aus der Bauchspeicheldrüse (Pankreas).

Bei reduzierter Insulinabgabe steigt die **Glukoseproduktion in der Leber**. Weil mehr Glukose in der Leber produziert wird, als der arbeitende Muskel verwertet, kommt es zum **Blutzuckeranstieg**. Normalerweise führt ein Blutzuckeranstieg immer zu einer Insulinausschüttung, um den Blutzucker wieder in den Normalbereich zu senken. Aber nicht so bei Stress: bei intensiver Belastung ist die Katecholaminkonzentration hoch und hemmt die Insulinsekretion.

Somit bildet sich eine intensive Belastung im Blut folgendermaßen ab: **hohe Stresshormo-**

ne, hoher Blutzucker und nur basales Insulin (► Abb. 19.8).

Schon unmittelbar nach Ende der intensiven Belastung fallen die Katecholamine sehr schnell ab und die Hemmung der Insulinabgabe aus dem Pankreas lässt nach. Nun kann der noch hohe Blutzucker zur Insulinausschüttung im Pankreas führen.

Die Nachbelastungsphase ist somit biochemisch gekennzeichnet durch: **stark abnehmende Stresshormone (bis schon basal), evtl. noch hoher Blutzucker und steigende Insulinkonzentration.**

Diese Hormonkonstellation beschleunigt die Glukoseaufnahme im Muskel und führt zur Glykogenregeneration. **Insulin spielt daher in der Nachbelastungsphase eine zentrale Rolle für die Regeneration!**

? Wie aber kann der Muskel bei intensiver Belastung zugeführte bzw. in der Leber produzierte Glukose aufnehmen, wenn doch die Katecholamine die Insulinausschüttung hemmt?

Weil es eine zusätzliche, insulinunabhängige Glukoseaufnahme in die Muskelzellen gibt. So produzieren Muskelzellen bei Belastung vermehrt GLUT₄, den Glukosetransporter. **GLUT₄-Rezeptoren** sind die Glukosetransporter in der **Muskelzellmembran**, welche die Glukoseaufnahme auch ohne Insulin ermöglichen.

1.1.1 Oxidative Energiebereitstellung im Zitronensäurezyklus

? Was geschieht im Zitronensäurezyklus?

Im Zitronensäurezyklus finden die zentralen chemischen Reaktionen zur oxidativen Energiebereitstellung statt. Dieser Stoffwechsel läuft in den Mitochondrien ab, wo die Zwischenprodukte des Kohlenhydrat-, Fett- und auch des Eiweißstoffwechsels oxidativ abgebaut werden. **Der Abbau sowohl von Kohlenhydraten, Fettsäuren und Aminosäuren führt zu aktivierter Essigsäure (Acetyl-CoA).**

Acetyl-CoA wird im Zitratzyklus weiter verarbeitet, wobei letztlich 2 Moleküle CO₂ und H⁺ entstehen. Zum Schluss steht wieder Oxalacetat für

einen weiteren Zyklus im Zitronensäurezyklus zur Verfügung.

Die Wasserstoffionen (H⁺) werden an die Atmungskette weitergegeben, wo daraus schrittweise Wasser H₂O gebildet wird. Die benötigten Enzymsysteme des Zitratzyklus und der Atmungskette sind an den inneren Membranen der Mitochondrien lokalisiert.

? Wie erfolgt die oxidative Phosphorylierung?

Die eigentliche Atmung findet in den Zellen statt und zwar in den Mitochondrien. Dort werden die Nährstoffe, überwiegend Fettsäuren, Glukose und zum geringen Anteil auch Aminosäuren, unter Sauerstoffverbrauch zu CO₂ und H₂O abgebaut, was durch die Enzyme des Zitratzyklus und der Atmungskette bewerkstelligt wird.

In der Atmungskette wird dem Wasserstoff portionsweise Energie entzogen, mit der dann ATP gebildet wird (**Atmungskettenphosphorylierung**).

Am Ende der Atmungskette wird aus dem Wasserstoff, der in den vorausgegangenen Reaktionen den einzelnen Substraten (Glukose und Fettsäuren) entzogen wurde, mit Sauerstoff Wasser gebildet. Der bei Belastung vermehrt aufgenommene Sauerstoff wird somit hauptsächlich erst am Ende der Atmungskette, bei der aeroben Oxidation, benötigt.

? Was ist der Unterschied zwischen anaerober und aerober Energiebereitstellung?

Glukose hat im Stoffwechsel eine Sonderstellung, da sie sowohl **aerob als auch anaerob**, d. h. ohne Beteiligung von Sauerstoff Energie bereitstellen kann. (Ausnahme sind die roten Blutkörperchen, die Erythrozyten, die keine Mitochondrien haben und Glukose nur anaerob zu Laktat abbauen können. Sie produzieren den **basalen Blutlaktatspiegel** von bis zu 1 mmol/l.)

Mittels anaerober Glykolyse erfolgt eine schnelle, sauerstoffunabhängige Energiebereitstellung. Die **pro Zeiteinheit freigesetzte Energiemenge ist bei der anaeroben Glykolyse sehr groß**, auch wenn die Glykolyse insgesamt nur 2 Moleküle ATP pro Molekül Glukose liefert.

? Die anaerobe Glykolyse findet im Zytoplasma der Zellen statt, wo reichlich Enzyme der anaeroben Glykolyse vorhanden sind. Wegen

der Unabhängigkeit von Sauerstoff kann durch die Energiebereitstellung mittels anaerober Glykolyse eine bis zu 100 % höhere Leistung erreicht werden als mit der aeroben Glykolyse.

? Welche Leistung ist durch anaerobe Glykolyse abrufbar?

Durch die anaerobe Glykolyse ist eine Leistung von bis zu **6 W/kg KG** (am Ergometer) max. **30–40 s** abrufbar. Bei geringerer Leistung kann die Glykolyse auch länger in Anspruch genommen werden, allerdings nur **höchstens etwa 3 min**. Dann muss entweder wegen der hohen Übersäuerung (**Laktatdosis**) die Belastung abgebrochen werden oder die Glykolyse wird durch den Pasteur-Effekt runtergeregelt (und die Fortsetzung erfolgt durch oxidative Energiebereitstellung, jedoch mit deutlich geringerer Leistung).

➤ **Der Abbau der Brenztraubensäure auf aerobem Weg (aerobe Glykolyse) ist durch die Kapazität der aerob wirksamen Enzyme des Zitratzyklus begrenzt – wobei diese Enzyme in den Mitochondrien liegen. Deshalb ist die Mitochondriendichte pro Zelle für die aerobe Leistung entscheidend!**

Wenn auch die Energieausbeute bei der aeroben Glukoseoxidation pro Glukosemolekül mit 38 Molekülen ATP relativ groß ist, ist die Leistung durch die **Mitochondriendichte pro Zelle** begrenzt.

Mittels aerober Glykolyse ist eine Leistung von bis zu **3 W/kg KG** (am Ergometer) möglich.

Beim Abbau von Glukose wird für jedes verbrauchte Molekül O_2 ein Molekül CO_2 produziert.

? Was versteht man unter dem »respiratorischen Quotienten«?

Das Verhältnis von abgeatmetem CO_2 zu aufgenommenem O_2 **ist der respiratorische Quotient RQ**, der bei ausschließlicher Glukoseverbrennung auf den Wert 1 ansteigt (■ Tab. 1.1).

Der Unterschied in der Energiebilanz von aerober und anaerober Glykolyse ist also sehr groß: 1 g Glukose ergibt bei vollständiger Verbrennung 4,5 kcal. Mit einem Liter Sauerstoff können bei ausschließlicher Glukoseverbrennung 5 kcal bereit-

gestellt werden. Die vollständige Verbrennung von 1 Mol Glukose (180 g) produziert 40 Mol ATP.

1.1.2 Energieversorgung mit Kohlenhydraten aus der Nahrung

Die Zellwände der Pflanzen sind aus Zellulose aufgebaut und für uns Menschen unverdaulich. Durch die Nahrungsmittelzubereitung, wie Mahlen oder Kochen etc., muss die Zellulose zuerst zerstört werden. Erst durch Kochen von Reis oder Kartoffeln oder nach Brot- oder Nudelherstellung aus Mehl wird die Pflanzenstärke für unsere Verdauungsenzyme (Amylase) zugänglich und kann verdaut werden.

Durch die Verdauung werden aus der Stärke (■ Abb. 1.2) einzelne Zuckermoleküle herausgelöst, die dann über die Darmzotten aufgenommen (resorbiert) werden und über den Blutweg zur Leber und den Muskeln gelangen und als Leber- oder Muskelglykogen gespeichert werden. **Die unverdauliche Zellulose in der Nahrung dient als Ballaststoff der Darmmotilität und wird mit dem Stuhl ausgeschieden.**

? Welche Zuckerarten gibt es?

Es gibt verschiedene Zuckerarten, deren Zuckernamen alle auf -ose enden, wie **Glukose** für Traubenzucker (**Dextrose**), **Fruktose** für Fruchtzucker (**Lävulose**), **Laktose** für Milchzucker, **Maltose** für Malzzucker. **Saccharose** ist unser Haushaltszucker, der aus Zuckerrüben und Zuckerrohr hergestellt wird. **Saccharose** ist ein **Disaccharid**, aus Glukose und Fruktose bestehend, und muss wie alle anderen Disaccharide zuerst im Darm mittels Enzyme der Darmschleimhaut in ihre Bestandteile (**2 Monosaccharide**) gespalten werden, weil nur diese resorbiert werden können. Unsere Zellen können nur Glukose verstoffwechseln, deshalb werden alle anderen Zuckerarten nach der Aufnahme über den Darm zuerst in der Leber in Glukose umgewandelt.

? Wie viel Gramm Glukose werden unter Ruhebedingungen benötigt?

Tab. 1.1 Größe und Bezeichnung verschiedener Zuckerarten

Anzahl der KH-Kettenglieder	Bezeichnung	Name	Nahrungsmittel
1	Einfachzucker (Monosaccharide)	Traubenzucker (Glukose, Dextrose, Fruchtzucker)	Honig, Süßwaren, Limonaden, Früchte, Fruchtzucker
2	Zweifachzucker (Disaccharide)	Rüben-, Rohrzucker, Malz-zucker, Milchzucker	Haushaltszucker, Süßigkeiten, Marmelade, Malzbier, Milch
3–10	Mehrfachzucker (Oligosaccharide)	Künstliches Zuckergemisch	Energiedrinks, Kohlenhydratdrinks, Zwieback
Über 10 (Abb. 1.2)	Vielfachzucker (Polysaccharide)	Stärke, Glykogen, Zellulose	Kartoffeln, Reis, Getreide, Brot, Nudeln, Gemüse

Schon unter Ruhebedingungen werden täglich etwa 3 g Glukose pro kg KG benötigt. Davon werden bis zu zwei Drittel allein für die Ernährung des Gehirns und der Rest für Nieren, Leber und Muskulatur benötigt. Deshalb sollte der Energiebedarf des Menschen mindestens zur Hälfte aus Kohlenhydraten (möglichst Vielfachzucker aus Brot, Kartoffeln, Reis, Mais, Früchten) gedeckt werden und die verzehrten KH überwiegend aus Polysaccharide, wie Stärke, bestehen.

Man sollte möglichst wenig Einfachzucker und Fruchtzucker aufnehmen, da diese die Fettsynthese, sog. De-novo-Lipogenese, stimulieren und zudem die Diabetesentwicklung fördern!

➤ **Somit die Empfehlung: So wenig Einfachzucker wie möglich, insbesondere wenn nur wenig intensiver Sport betrieben wird!**

1.1.3 Insulin

? Wann wird Insulin gebildet?

Die Glukoseresorption aus dem Darm wirkt gleichzeitig als Signal auf das Pankreas und führt zur Insulinabgabe, dem wichtigsten aufbauenden (**anabolen**) Hormon. Insulin steigt parallel mit dem Blutzucker an und öffnet die »Glukoseforten« der Zellen. Als Folge kommt es zum Blutzuckerabfall. Aus der eingeschleusten Glukose kann deren Speicherform, das Glykogen, in Leber und Muskelzellen gespeichert werden oder die Glukose wird bei

unmittelbarem Bedarf gleich im Energiestoffwechsel verwertet.

➤ **Insulin ist in der Nachbelastungsphase das wichtigste anabole Hormon.**

Missbräuchlich als lebensgefährliches Insulindoping bekannt, mit Blutzuckerabfall und Unterzuckerung des Gehirns und evtl. mit Todesfolge!

? Was versteht man unter Insulinmast?

Bereits geringste Insulinmengen (z. B. nach Zuckerln), die für den Zuckereinstrom nicht ausreichend sind, hemmen bereits den Fettabbau (**Lipolyse**). So haben dicke Menschen meist einen erhöhten basalen Insulinspiegel und können wegen der Lipolysehemmung nur schwer abnehmen.

? Wie viel Zucker kann man speichern und was passiert bei zu viel Zuckerezufuhr?

Zum Unterschied zu den Fettspeichern sind die KH-Speicher deutlich geringer und sehr begrenzt: Der Energiegehalt aller vollen **KH-Speicher macht zusammen nur etwa 2000 kcal** aus. Im Vergleich dazu bestehen die Energiereserven der Fettdspots normalgewichtiger Personen aus mind. 100.000 kcal. Deshalb sind fettarme und nicht KH-arme Diäten sinnvoll, weil die Fettspeicher niemals völlig entleert werden. (Außer bei lang andauerndem Hunger, wie während des Krieges, wo die tägliche Energiezufuhr auf 850 kcal pro Tag offiziell beschränkt war).

? Wie lange reicht der KH-Speicher in der Muskulatur aus?

1.1 • Woher beziehen wir Energie?

Die KH-Speicher in der Muskulatur reichen bei intensiver Belastung für 1–2 h aus und sind deshalb immer in Gefahr leer zu werden!

So enthält 1 kg Muskel, bei normaler Mischkost, bis zu 15 g Glykogen. Da normalgewichtige Männer eine **Muskelmasse von bis zu 40% ihres Körpergewichts und Frauen bis zu 35%** haben, hat daher ein Mann mit 80 kg KG bis zu 32 kg Muskelmasse, die bei vollem Glykogenspeicher max. 500 g Glykogen enthalten können. Zusätzlich sind noch fast 100 g Glykogen in der Leber gespeichert; jedoch nicht im Hungerzustand. **Somit enthalten alle Kohlenhydratspeicher, wenn sie voll sind, bestenfalls 0,5 kg Glykogen.**

? Wie werden die Zuckervorräte »angezapft«?

Die Energiebereitstellung aus Glykogen beginnt mit der Abspaltung einzelner Glukosemoleküle aus dem Glykogen (der sog. Glykogenolyse).

Dabei wird auf jedes Glukosemolekül mit Hilfe des Enzyms **Phosphorylase** eine Phosphatgruppe (vom ATP) übertragen, sodass nun **Glukose-6-Phosphat** (aktive Glukose) vorliegt.

? Kann aktivierte Glukose die Muskelzelle verlassen?

Aktivierte Glukose kann die Muskelzelle nicht mehr verlassen, weil ein geeignetes Transporterprotein fehlt. Deshalb ist es nicht möglich, dass nicht verbrauchte Glykogenvorräte über den Kreislauf an möglicherweise schon unter Glukosemangel leidende arbeitende Muskulatur transferiert werden!

? Was sind Phosphatasen?

Um aktive Glukose in Zucker umzuwandeln, werden Phosphatasen benötigt, die die Phosphatgruppe vom Zucker entfernen. Nur in der Leber gibt es phosphatabspaltende Enzyme (**Phosphatasen**), nicht jedoch im Muskel. Deshalb kann Glukose die Leberzelle wieder verlassen, weil die Phosphatasen die Phosphatgruppe vom Zucker entfernen können. Somit können die Glykogenvorräte der Leber zu Glukose abgebaut werden und über den Blutweg zum Hirn oder Muskel gelangen.

? Was versteht man unter Glukostatenwirkung?

Die Leber hält den Blutzucker konstant, auf diese Weise sichert die Leber die basale Zuckerversorgung des zentralen Nervensystems, ZNS (**Glukostatenwirkung**).

Außerdem kann die Leber bei Belastung Glukose produzieren! Die Glukosesynthese aus Aminosäuren wird Glukoneogenese genannt. Da aber die Glukoneogenese relativ konstant ist, stellt die Glykogenolyse in der Leber den Hauptteil der Glukoseproduktion unter Belastung und ist somit die Ursache des Blutzuckeranstiegs während der Belastung.

? Welche Auswirkung hat Zuckermangel und wie wird eine basale Hirnnahrung gewährleistet?

Der Energiestoffwechsel des ZNS ist ausschließlich auf Glukose angewiesen und benötigt täglich mind. 100 g (ca. 5 g Glukose pro Stunde). Plötzlicher Blutzuckerabfall (**Hypoglykämie**) führt daher zu neurologischen Symptomen, wie verminderte Konzentration, gestörte Koordination, Schwäche, Müdigkeit, Schläfrigkeit, erheblicher Leistungsabfall bis zu Leistungsabbruch und schließlich Erschöpfung. Bei weiterem Zuckerabfall kommt es zu Verwirrung, Krampfanfällen bis zum Koma. Ähnliche Symptome können im Verlauf mehrstündiger Ausdauerbelastungen auftreten, wenn es zum Blutzuckerabfall kommen sollte. Der Blutzucker kann bei über 2 h dauernden Belastungen auf unter die Hälfte des Normalwertes abfallen.

> Schon in Ruhe (z. B. während des Schlafes) werden volle Leberglykogendepots innerhalb von 12–18 h aufgebraucht. Deshalb sollte man nach 12-stündiger Nahrungskarenz nie ohne ein leichtes kohlenhydratreiches Frühstück trainieren.

Um nach längerer Nachtruhe und ohne Frühstück den normalen Blutzucker (etwa 100 mg/dl = 1 g/l) für die basale Zuckerversorgung des ZNS sicherzustellen, bildet die Leber aus Aminosäuren Glukose (**Glukoneogenese**). Die Aminosäuren zur Glukosesynthese stammen aus dem Proteinabbau der Muskeln. Für die Glukoneogenese ist das Hormon

Glukagon notwendig, das ebenso wie sein Gegenspieler Insulin aus der Bauchspeicheldrüse stammt. Mittels Glukoneogenese kann die Leber max. **10 g Glukose/h** synthetisieren. Das reicht jedoch nur für die lebensnotwendige basale ZNS-Versorgung.

? Wann kann es zu Zuckermangel kommen?

Bedingungen, welche zum intrazellulären Glukosemangel führen, sind:

- Hunger,
- kohlenhydratarmer Ernährung,
- Diabetes mellitus, weil die Glukoseaufnahme der Zellen insulinabhängig ist,

Schon kurzdauernde Belastungen (bis zu 1 h) mit über 70 % $\dot{V}O_{2max}$ reduzieren den Muskelglykogengehalt um etwa die Hälfte.

Auch bei langdauernder (über 2 h), moderater Belastungsintensität (~50 % $\dot{V}O_{2max}$), kann es trotz Zufuhr kohlenhydrathaltiger Getränke zum Glukosemangel kommen, wenn der Glukoseverbrauch größer ist als die Glukosezufuhr.

Bei **kohlenhydratarmer Ernährung** kann es zu ausgeprägter Müdigkeit kommen, weil die KH-Zufuhr evtl. nicht ausreicht, um eine »ordentliche«, d. h. vollständige Regeneration des Leberglykogens zu gewährleisten. Nach Belastungen über 50 % $\dot{V}O_{2max}$ wird nach ausreichender KH-Zufuhr zuerst Leber- und dann Muskelglykogen regeneriert. Um nach einer 1-Stunden-Belastung mit 70 % $\dot{V}O_{2max}$ das **Leberglykogen** wieder vollständig aufzufüllen, reicht schon eine relativ geringe Zuckerrzufuhr von 1 g/kg KG. Jedoch bleibt bei dieser geringen KH-Menge fast nichts für den Wiederaufbau des verbrauchten Muskelglykogens übrig!

➤ Eine ungenügende KH-Zufuhr am Belastungsende führt zur unvollständigen Muskelregeneration!

■ Zusammenfassend

Die Belastungsintensität entscheidet, welche »Energiequellen« den Energiebedarf abdecken!

Ab einer Belastungsintensität von über 50 % $\dot{V}O_{2max}$ dominiert zunehmend die Energiebereitstellung aus der Glukoseverbrennung!

1.1.4 Energiebereitstellung aus Fetten

Fett ist wegen seiner hohen Energiedichte ein hervorragender Energiespeicher. Wir tragen mitunter beträchtliche Energiedepots mit uns herum, denn schon normalgewichtige Personen haben mind. 10 % der Körpermasse an leicht mobilisierbarem **Depotfett**. Diese Energiereserven sind mind. 100.000 kcal. Damit könnten Schlanke die Energieversorgung über 2–3 Monate aufrechterhalten. Es gibt übergewichtige Menschen, die mitunter so viel Depotfett (100 kg = ca. 800.000 kcal) haben, dass sie daraus ihren Energiebedarf eines ganzen Jahres decken könnten!

Neben dem Depotfett gibt es noch das **Baufett**, das nur in extremen Hungerperioden zur Deckung des Energiebedarfs herangezogen wird. Die Menge an Baufett beträgt bei normalgewichtigen Männern 5 % der Körpermasse und bei Frauen 15 %, das u. a. der Stützfunktionen dient, wie z. B. im Brustbereich oder das Nieren- und Wangenfett.

Auch in der Muskulatur sind Fettreserven vorhanden. Diese intramuskulären Fettspeicher liegen als feine Triglyzeridtröpfchen im Muskel vor und haben eine gesamte Energiemenge von etwa 3000 kcal.

? Bei welcher Belastungsintensität liegt die höchste Fettverbrennung?

Durch die Fettoxidation (FOX) des Depotfetts wird der Energiebedarf in Ruhe und bei geringer Belastungsintensität abgedeckt. Bei geringer Belastungsintensität von 25 % $\dot{V}O_{2max}$ wird nahezu der gesamte Energiebedarf durch die FOX des Depotfetts gedeckt. Steigt die Intensität auf 50 % $\dot{V}O_{2max}$, dann stammen nur noch etwa 50 % aus der FOX und die restlichen 50 % aus der KH-Oxidation.

Auch wenn bei zunehmender Belastungsintensität die KH-Oxidation stärker als die FOX ansteigt, ist die absolute FOX-Rate dennoch deutlich höher als unter Ruhebedingungen.

➤ Die FOX kann auf das 5- bis 8fache gegenüber Ruhebedingungen steigen.

Denn der Energieumsatz bei 50 % $\dot{V}O_{2max}$ ist doppelt so hoch wie bei 25 % $\dot{V}O_{2max}$, und so auch die absolute FOX. Übrigens erreichen Trainierte bei dieser Belastungsintensität eine doppelt so hohe

1.1 · Woher beziehen wir Energie?

Fettverbrennung. Bei Adipösen ist die $\dot{V}O_{2max}$ um mind. ein Drittel geringer als bei schlanken Individuen; ebenso ist die $\dot{V}O_{2,}$ bei der die höchste Fettverbrennung stattfindet, deutlich geringer und liegt bei 45% $\dot{V}O_{2max}$ im Vergleich zu Schlanken mit 55% $\dot{V}O_{2max}$. Schlanke Personen verbrennen um 25% mehr Fett pro Minute (8,2 mg/min) als Adipöse (6,5 mg/min).

Neben der Belastungsintensität spielen als modifizierende Faktoren die Belastungsdauer und die Nahrungszufuhr eine Rolle. Insbesondere bei langdauernder Belastung (über 60 min) nimmt die FOX deutlich zu, aber nur dann, wenn ausschließlich Wasser ohne Zusatz getrunken wird.

Werden **kohlenhydratreiche Getränke** während lang andauernder niedrigintensiver Belastung aufgenommen, wird die dafür benötigte Energie nur noch bis zu etwa 25% aus der FOX generiert.

➤ Die höchste FOX erreicht man bei Einhaltung folgender 3 Bedingungen:

- Belastungsintensität bis max. 50% der $\dot{V}O_{2max}$
- Belastungsdauer über 60 min
- Zufuhr nur kohlenhydratfreier Getränke, da die FOX sonst auf die Hälfte reduziert wird

■ Zusammenfassend

Die FOX ist bei Untrainierten und Trainierten bei einer Belastungsintensität von etwa 50% $\dot{V}O_{2max}$ am höchsten. Es gibt deutliche Unterschiede in der Fettverbrennung zwischen Adipösen und Normalgewichtigen. Der sog. Nachbrenneffekt, mit erhöhtem Energieumsatz nach der Belastung, ist quantitativ bedeutungslos.

? Wie erfolgt der Fettabbau?

In den Fettzellen, den **Adipozyten**, ist gespeichertes Neutralfett (**Triglyceride**) enthalten, ebenso im Muskel als Fetttropfchen, dort jedoch nur in wesentlich geringerer Menge. Der Fettabbau, die **Lipolyse**, beginnt in den Fettzellen, wo das Enzym **Lipase** 1 Molekül Fett in je 3 Fettsäuren und 1 Molekül Glycerin spaltet. Das Glycerin wird in die Glykolyse eingeschleust und über Pyruvat weiterverarbeitet.

Zunächst werden von den gespeicherten Triglyceriden freie **Fettsäuren** abgespalten. Die Fettsäuren werden anschließend über den Blutweg zur

Muskulatur transportiert und können bei Energiebedarf nach deren Aufnahme zur Energiebereitstellung verbrannt werden. Die **Lipase**, die für den Fettabbau entscheidend ist, wird schon durch geringste Insulinmengen gehemmt. Deshalb wird nach jedem Essen die Lipolyse in den nächsten 3–4 h blockiert.

➤ Die Stresshormone (Katecholamine) Adrenalin (= Epinephrin) und Noradrenalin (= Norepinephrin) sind die wichtigsten lipolytisch wirksamen Hormone. Der Gegenspieler, das Insulin, hemmt die Lipolyse bereits in geringsten Mengen.

So ist Adrenalin ca. 20-mal stärker lipolytisch wirksamer als Noradrenalin. Schon geringe Adrenalinmengen (z. B. während des ruhigen Stehens) führen zur FOX und sichern so den basalen Energiebedarf.

? Wie werden freigesetzte Fettsäuren weiterverarbeitet?

Die beim Fettabbau aus den gespeicherten Triglyceriden freigesetzten Fettsäuren werden in der sog. **Beta-Oxidation** in Bruchstücke zu je 2 Kohlenstoffatomen zerlegt, die chemisch betrachtet Essigsäure sind. Die bei dieser Aufspaltung freiwerdende Energie wird dazu verwendet, die Essigsäure durch Verbindung mit dem **Co-Enzym A** zu aktivieren, d. h. chemisch besonders reaktionsfreudig zu machen (zu Acetyl-CoA).

Dieser Prozess erfordert bereits Sauerstoff, der aber nicht zur CO_2 -Bildung und Energiebereitstellung beiträgt. Die Energiebereitstellung erfolgt erst, wenn Acetyl-CoA im Zitratzyklus verarbeitet wird. Dafür ist **Oxalacetat** erforderlich, das allerdings ausschließlich aus dem Glukoseabbau stammt. **Daher können Fette ohne basalen Glukoseabbau nicht oxidativ abgebaut werden.** Dies hat zum Merkspruch geführt:

➤ Fette verbrennen im Feuer der Kohlenhydratrate.

1 g Fett ergibt bei vollständiger Verbrennung 9,5 kcal. Mit einem Liter Sauerstoff können bei ausschließlicher Fettverbrennung (nur theoretisch möglich) 4,7 kcal bereitgestellt werden.

Bei der Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus) besteht eine mangelhafte Kohlenhydratverwertung, weil ohne Insulin keine Glukose in die Zellen gelangen kann. (Daher auch die Symptome wie Müdigkeit und Gewichtsverlust.) Das kann zu einer **energetisch lebensbedrohlichen Stoffwechselsituation** führen. Die Zellen haben zwar genügend Fettsäuren zur Energiebildung, können aber wegen des fehlenden Oxalacetats nicht ausreichend verstoffwechselt werden.

Bei der FOX wird nicht für jedes über die Lunge eingeatmete Sauerstoffmolekül O_2 ein CO_2 -Molekül ausgeatmet. Grund ist, dass ein Teil des Sauerstoffs für die nicht CO_2 -bildende Beta-Oxidation selbst verbraucht wird.

Der Respiratorische Quotient, RQ ist das Verhältnis von ausgeatmetem CO_2 zu eingeatmetem O_2 . Am RQ kann man die Energiebereitstellung ablesen: ein RQ von 0,7 zeigt eine ausschließliche Fettverbrennung an, ein RQ von 1 deutet auf eine ausschließliche Glukoseverbrennung hin.

➤ **Am Respiratorischen Quotienten RQ kann man deshalb erkennen, ob die Fettverbrennung oder die Glukoseverbrennung dominiert.**

Durch Messung des eingeatmeten O_2 und ausgeatmeten CO_2 kann man daher einfach und schnell beurteilen, ob die Leistung primär durch Fett- oder Kohlenhydratverbrennung energetisch abgedeckt wird, bzw. durch einen Mischstoffwechsel von beiden.

■ Zusammenfassend

Die FOX ist bei geringer Belastungsintensität (bis zu 50 % $\dot{V}O_{2max}$) die Hauptenergiequelle und nimmt mit zunehmender Belastungsintensität ab, auch wenn die Katecholamine ab 50 % $\dot{V}O_{2max}$ exponentiell zunehmen. Bei zunehmender Belastungsintensität wird die Energiebereitstellung aus dem Kohlenhydratabbau des Muskelglykogens wichtiger.

1.1.5 Vergleich Kohlenhydrate mit Fett

Fett ist ein hervorragender Energiespeicher und liefert 9,5 kcal pro Gramm – doppelt so viel wie

Kohlenhydrate. Aber auch bei der Verbrennung unterscheiden sich die Substrate im Sauerstoffverbrauch: Fett mit 2,02 L/g, KH mit 0,75 L/g, KH und EW mit 0,97 L/g. Deshalb wird bei aufwendigem Sauerstofftransport (Sauerstoffverbrauch der Herz- und Atemmuskulatur) auf die sauerstoffsparende Kohlenhydratverbrennung umgestellt.

Die **Energiebereitstellung pro Liter Sauerstoff** ist bei Fett geringer als bei KH (4,7 gegenüber 5 kcal/l). Aus diesem Grund werden Belastungen mit geringer Intensität energetisch primär durch die FOX abgedeckt.

➤ **Der wichtigste Regulator der Substratwahl ist die Belastungsintensität. Diese entscheidet, welche Energiequellen »angepaft« werden.**

1.1.6 Wunschvorstellung »fat burning«

❓ Was versteht man unter »fat burning«?

Die physiologischen Grundlagen werden häufig fehlinterpretiert, weshalb Belastungen mit geringer Intensität und dominierendem Fettabbau (»fat burning«) besonders wirkungsvoll zur Gewichtsreduktion beitragen sollen. Das ist ein Irrtum, denn nur eine langfristig negative Energiebilanz führt zur Fettreduktion.

$$\text{Körpergewicht} = \frac{\text{Energieaufnahme}}{\text{Energieumsatz}}$$

❓ Welche Möglichkeiten der Gewichtsabnahme gibt es?

Prinzipiell gibt es nur 3 Möglichkeiten der Gewichtsabnahme:

- weniger Energie aufnehmen
- oder mehr Energie durch Bewegung umsetzen
- oder beides.

Fallbeispiel

Die höchste FOX hängt auch von der Sportart ab. Beim Gehen liegt die maximale FOX bei einer Belastungsintensität von ~45% der $\dot{V}O_{2max}$ bzw.

1.1 • Woher beziehen wir Energie?

bei ~60–65 % der HF_{\max} . Bei maximaler FOX wird 0,45 g Fett pro Minute umgesetzt. Mit zunehmender Intensität nimmt die FOX ab und ab 80 % $\dot{V}O_{2\max}$ nahezu Null, sodass die Energie ausschließlich aus dem KH-Stoffwechsel bereitgestellt wird.

Beispiel: Zwei Freundinnen, beide 30-jährig und nahezu gleich schwer mit einem KG von 70 kg haben auch eine sehr ähnliche max. Leistungsfähigkeit von 40 ml/min/kg bei einer HF_{\max} von 190/min. Beide wollen »Fat burnen«, haben jedoch unterschiedliche Ansichten: Die eine »glaubt« die maximale FOX bei geringer Trainingsintensität zu erreichen und trainiert deshalb bei 60–65 % HF_{\max} und somit bei 115/min (= $190 \times 0,6$). Die andere will sich mehr anstrengen und trainiert bei ~80 % der HF_{\max} , also mit 150/min. Wer von den beiden nimmt schneller ab?

Um zur Lösung zu kommen, muss zuerst die HF auf die $\dot{V}O_2R$ umgerechnet werden, was mit folgender Tabelle möglich ist:

% $\dot{V}O_2R$	% HF-R	% HF_{\max}	RPE
40	40	64	12
50	50	70	13
60	60	77	14
70	70	84	15
80	80	91	16
85	85	94	17

Trainingsintensität von #1 = $40 - 3,15 \times 0,4 = 15$ ml/min/kg

Trainingsintensität von #2 = $40 - 3,15 \times 0,65 = 24$ ml/min/kg

Trainingsumsatz $TRU = \dot{V}O_2 \times KG / 1000 \times 5 \times \text{Zeit [min]}$

TRU von #1 = $15 \times 70 / 1000 \times 5 \times 60 = 315$ kcal/h

TRU von #2 = $24 \times 70 / 1000 \times 5 \times 60 = 504$ kcal/h

Ergebnis: Auch wenn es richtig ist, dass die weniger intensiv trainierende Person mehr Fett verbrennt als die intensiver trainierende Frau, so kommt es letztendlich nur auf den Energieumsatz an (siehe obige Formel), ob sich das KG ändert – gleichbleibende Energieaufnahme vorausgesetzt. Daher wird die Person mit höherem Trainingsumsatz das Ziel der Gewichtsabnahme rascher erreichen. Denn die weniger intensiv trainierende Dame müsste um 60% mehr Zeit aufwenden, um die gleiche Energie umzusetzen (504/315); also 96 (60 × 1,6) statt 60 min. Da 1 kg Übergewicht etwa 7000 kcal sind, muss die intensiv trainierende Dame 14 h (7000 ÷ 504) aufwenden und die »Fatburnerin« 22 h trainieren (7000 ÷ 315).

Dieses Beispiel zeigt, dass letztendlich nicht die FOX entscheidend ist, sondern der gesamte Energieumsatz durch Bewegung, ob es bei gleicher Nahrungszufuhr zur Gewichtsabnahme kommt. Umgekehrt kommt es auch bei reduzierter Energiezufuhr zur Gewichtsabnahme, wenn der Energieumsatz konstant bleibt. Daher führt eine Doppelstrategie rascher zum Ziel. Wird gleichzeitig täglich ~300 kcal weniger Nahrung aufgenommen, so braucht die intensiv trainierende Dame etwa 1 Woche um 1 kg abzunehmen (= $7000 \div (500 + 300)$) und die »Fatburnerin« 11 Tage (= $7000 \div (315 + 300)$), wenn beide auch täglich 1 h bei unterschiedlicher Belastung walken. Der hohe Zeitaufwand bei Inanspruchnahme der FOX, um abnahmewirksame Energieumsätze zu erreichen, ist der Grund, weshalb in der Praxis lieber eine höhere Belastungsintensität gewählt wird, um zur Zielerreichung nicht »ewig« lang zu brauchen, sonst geht irgendwann vielleicht die Motivation verloren.

Die Vorstellung, für »nur« 4 kg Gewichtsreduktion einen so langen Zeitraum aufzuwenden, führt dazu, dass fast immer eine doppelte Strategie zur Zielerreichung versucht wird:

► Den Energieumsatz durch Bewegung erhöhen und gleichzeitige Ernährungsänderung mit Reduktion der Energiezufuhr.

Ergebnis einer Kombination der reduzierten Nahrungszufuhr und Bewegung: durch 300 kcal/Tag weniger Energiezufuhr bei gleichzeitig 3 h Sport pro Tag kann man pro Woche evtl. 1 kg Gewicht abnehmen (► Kap. 9 über Trainingsrezepte).

■ Zusammenfassend

Nur durch sehr umfangreiche Bewegung, mit über 10 h pro Woche, kann durch Sport alleine eine Gewichtsabnahme erreicht werden. Denn nur dann ist ein ausreichend hoher Energieumsatz möglich. Diese hohen Trainingsumfänge sind für untrainierte Übergewichtige unrealistisch, weil sie einen jahrelangen systematischen Trainingsaufbau voraussetzen. Klienten müssen sich vorerst mit 1–2 Wochenstunden an »Bewegung gewöhnen«. Zweckmäßiger ist es, das Ausmaß an Alltagsbewegungen zu erhöhen: z. B. das Auto etwas weiter weg zu parken oder überhaupt darauf zu verzichten

und mit dem Rad die Wegstrecken zurückzulegen. Oder Stiegensteigen und die Kollegen im Büro persönlich aufsuchen, statt telefonieren oder e-mailen oder smsen.

➤ **Gewichtsabnahme ist deshalb so schwierig, weil langfristig eine negative Energiebilanz gehalten werden muss. Und je größer das Übergewicht ist, desto mehr Geduld muss man aufbringen (mitunter sind dann mehrere Jahre notwendig), bis man sich an den neuen Bewegungs- und Ernährungsstil gewöhnt hat.**

Prinzipiell ist es egal, mit welcher Diät (fettarm, kohlenhydratarm etc.) die negative Energiebilanz erreicht wird. Fettarme Diäten ermöglichen ein höheres Energiedefizit, weil pro Gramm Fett doppelt so viel Energie enthalten ist wie in Kohlenhydraten.

Realistische Ziele bei der Gewichtsabnahme sind 0,5 kg pro Woche! Daher muss für eine geplante langfristige Gewichtsreduktion von z. B. 10 kg die verringerte Energiezufuhr über 6–12 Monate durchgehalten werden.

➤ **Je höher das Energiedefizit, desto früher wird »abgebrochen« (Drop-out-Rate steigt)! Das vorzeitige Beenden und der sog. Yo-Yo-Effekt sind die eigentlichen Probleme aller Abmagerungskuren.**

1.1.7 Energiebereitstellung aus Eiweiß

Eiweiße (auch Proteine genannt) sind großmolekulare Verbindungen aus Aminosäuren und für den **Baustoffwechsel zum Aufbau, aber auch für die Gewebereparatur** notwendig. Proteine sind somit Grundbausteine aller Zellen und deren Enzyme, aber auch Bestandteile von Hormonen oder sauerstofftransportierenden Proteinen wie dem Hämoglobin u. v. a. Obwohl Proteine auch zur Energiebereitstellung genutzt werden können, sind sie jedoch nicht die primäre Wahl bei Energiebedarf.

? Was sind essentielle Aminosäuren?

Von den 20 für Wachstum und im Stoffwechsel wichtigen Aminosäuren können wir Menschen 12 Aminosäuren selbst synthetisieren und müssen

8 zuführen, die **unentbehrlichen (essentiellen) Aminosäuren**.

➤ **Ein Mangel an essentiellen Aminosäuren beeinträchtigt Wachstum, Reparatur bzw. Erhalt des Gewebes.**

? Was versteht man unter der »biologischen Wertigkeit« von Aminosäuren?

Ein wichtiges **Qualitätskriterium des Nahrungseiweißes** ist die Aminosäuren-Zusammensetzung, also die **biologische Wertigkeit**. Sie gibt an, wie viel Gramm Körpereiwweiß durch 100 g resorbiertes Nahrungseiweiß ersetzt bzw. gebildet werden können.

? Welchen Unterschied gibt es zwischen tierischem und pflanzlichem Eiweiß?

Tierisches Eiweiß enthält im Vergleich zum pflanzlichen mehr essentielle Aminosäuren.

Heute gruppiert man die ca. 20 proteinogenen Aminosäuren in entbehrliche, bedingt entbehrliche, sowie nicht-entbehrliche Aminosäuren.

Manche, früher als nicht-essentiell bezeichnete Aminosäuren, wie z. B. Cystein, stehen unter bestimmten Bedingungen (Wachstum, Krankheit) trotz körpereigener Synthese nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung und müssen von außen ergänzt werden. Sie sind somit nur **bedingt entbehrlich**.

1.1.8 Eiweißverdauung

Die aufgenommenen Nahrungsproteine werden durch die Verdauungsenzyme des Magens, Pankreas und Darms zunächst in ihre Aminosäuren gespalten, resorbiert und stehen dann primär für die Synthese körpereigener Proteine in der Leber zur Verfügung. Diese Proteine werden zum Aufbau der körpereigenen Strukturen verwendet, wobei etwa 30–50% des Proteinumsatzes durch die Muskulatur bedingt sind.

? Was versteht man unter der spezifisch dynamischen Wirkung von Nährstoffen?

Die Aufnahme und Verdauung von Nährstoffen benötigt zusätzlich Energie und wird als **spezifisch dy-**

namische Wirkung bezeichnet. Bei der Aufnahme von Kohlenhydraten und Fetten fällt die spezifisch dynamische Wirkung kaum ins Gewicht, sodass aus 100 kcal zugeführter Nahrungsenergie etwa 95 kcal aufgenommen werden. Für die Proteinverdauung wird aber fast ein Drittel der zugeführten Energie als spezifisch dynamische Wirkung benötigt, deshalb sind von 100 kcal zugeführter Energie bei Eiweißernährung nur 70 kcal verfügbar.

1.1.9 Eiweißbedarf

Alle körpereigenen Strukturen werden ununterbrochen abgebaut und bleiben nur deshalb in gleicher Form erhalten, weil ein ebenso ununterbrochener und gleich schneller Aufbau stattfindet. Dieser ist aber nur bei einer **Mindesteiweißzufuhr** möglich. Jedes Gewebe hat eine unterschiedliche **Umsatzgeschwindigkeit**. Die mittlere Halbwertszeit des Eiweißumsatzes im Muskel beträgt 14 Tage, in der Leber etwa 7 Tage. Nach ungefähr 5 Halbwertszeiten, also **nach etwa 8 Wochen sind die Proteine der Muskelzelle erneuert und der Muskel besteht aus neuem Protein!** Übrigens ist man nach etwa 7 Jahren ein »völlig neuer Mensch«, da nach dieser Zeit alle Gewebe erneuert sind.

Die mit der Nahrung aufgenommenen Proteine werden ausschließlich für die Synthese körpereigener Proteine verwendet. Im Energiestoffwechsel werden nur jene Aminosäuren verwertet, die bei diesem beständigen Abbau körpereigener Proteine als »Abfallprodukt« anfallen. Daher ist die Energiebereitstellung aus Proteinen gering und die aus dem Proteinabbau stammende Energie am Tagesumsatz beträgt 10–12%.

? Wann kommt es zum Abbau von Muskelproteinen?

Nur unter **Extrembedingungen** (Hungerstoffwechsel, Proteinidiät oder Belastungen über 2 h) wird nach Aufbrauch der letzten Glykogenreserven zur Aufrechterhaltung eines konstanten Blutzuckers in der Leber Glukose synthetisiert. Für die Glukoneogenese stammen die Aminosäuren aus dem **Muskelproteinabbau**.

➤ Die Muskulatur kann als Reservespeicher für Eiweiß angesehen werden, welche im katabolen Zustand (z. B. im Hungerzustand) zur Deckung des Eiweißminimums abgebaut werden kann.

Darüber hinausgehende Depots oder Reserven an Aminosäuren bzw. Eiweiß gibt es nicht, deshalb müssen angemessene Eiweißmengen mit der Nahrung zugeführt werden, um den laufenden Umsatz abzudecken.

Die Weltgesundheitsorganisation WHO empfiehlt für Erwachsene ohne zusätzliche körperliche Aktivität eine Mindest-Eiweißaufnahme von **0,8 g/kg KG pro Tag**. Dieser Wert wurde errechnet aus dem Mindestbedarf von 0,35 g/kg KG plus 30 % für unterschiedliche physiologische Belastungen, das sind dann 0,44 g/kg KG plus 30 % für unterschiedliche Bioverfügbarkeit, ergibt 0,57 g/kg KG. Dann wurde noch ein Zuschlag für eine durchschnittliche Wertigkeit von 70 aufgeschlagen, was zur Empfehlung von 0,8 g/kg KG geführt hat.

Ausdauerleistungssportlern wird oft eine höhere EW-Zufuhr von über 1 g EW pro kg KG empfohlen, was aber in Unkenntnis der WHO-Empfehlung als »EW-Luxuskonsum« bezeichnet werden kann. In unserer Wohlstandsgesellschaft wird üblicherweise meist viel zu viel Eiweiß zugeführt, was bei positiver Energiebilanz dann als Fett gespeichert wird (Übergewicht). Tierisches Eiweiß kann zur Harnsäureerhöhung und Gicht führen.

Fallbeispiel

Ein 60 kg schwerer, sehr ambitionierter Freizeitsportler trainiert viel für den bevorstehenden Marathon und hat daher einen Tagesumsatz von 3.000 kcal. Würde es zu einem EW-Mangel kommen, wenn er sich ausschließlich von Brot ernähren würde, das bekanntlich ca. 8 Energieprozent EW enthält? $3000 \text{ kcal} \times 0,08 = 240 \text{ kcal}$ stammen vom EW. Da 1 g EW 4,3 kcal enthält, kann man durch Division die zugeführte EW-Menge errechnen: $240 \text{ durch } 4,3$ ergibt eine EW-Zufuhr von 56 g EW. Nun wird noch durch das KG dividiert, was ca. 1 g EW pro kg KG ergibt.

Deshalb benötigen nur sehr umfangreich trainierende Ausdauersportler (über 300 Stunden pro Jahr) mehr als 1 g EW pro kg KG.

Auch **Bodybuilder** haben selbst in der Aufbau-phase keinen höheren EW-Bedarf als die empfohlene WHO-Mindestmenge, weil damit schon alle Eventualitäten berücksichtigt wurden. Wenn man davon ausgeht, dass 1 kg fettfreie Muskelmasse aus 200 g Protein besteht, würde man für einen Muskelaufbau von 10 kg pro Jahr 2 kg EW zusätzlich benötigen, das entspricht 5 g EW pro Tag oder bei einer 80 kg schweren Person weniger als 0,1 g/kg KG. Dieser zusätzliche Bedarf wäre durch den oben beschriebenen Sicherheitszuschlag bereits abgedeckt!

■ Zusammenfassend

Bei »normaler« Ernährung kommt es weder bei umfangreichem Ausdauer- noch bei Krafttraining zum EW-Mangel. Daher ist eine zusätzliche EW-Zufuhr normalerweise nicht notwendig. Viele Fitnessbesucher »schmeißen« ihr Geld für teure »Nahrungsergänzungsmittel« raus, um sich ihr kindliches Wunschdenken mit einem »Zaubertrank« zu befriedigen, damit sie beim Krafttraining mit weniger Aufwand schneller ihre Zielvorstellung erreichen. **Viel wichtiger ist das »timing«**, d. h. die rasche KH-Zufuhr nach dem Ausdauertraining für einen schnellen Glykogenaufbau bzw. eine unmittelbare Proteinzufuhr nach dem Krafttraining, um die Muskelhypertrophie zu fördern. (Das ist auch für das Muskelaufbautraining von älteren Menschen von Bedeutung.)

➤ **Das »timing« der Substratzufuhr ist sowohl beim Ausdauer- als auch beim Krafttraining wichtig.**

1.1.10 Anabolie, Katabolie

Bei Wachstumsprozessen sind aufbauende, **anabole Hormone** wie Somatotropin (STH), Testosteron und Insulin notwendig. Katabol wirkende Hormone wie Glukokortikoide führen zum Eiweißabbau (Katabolismus) und fördern den Umbau der Aminosäuren in der Glukoneogenese zu Glukose.

Der Proteinabbau erfolgt zunächst durch Aufspaltung in die einzelnen Aminosäuren. Von den Aminosäuren wird die Aminogruppe abgespalten und daraus in der Leber **Harnstoff** gebildet. Der andere Rest wird oxidativ abgebaut. Harnstoff ist

das Stoffwechselprodukt des EW-Stoffwechsels und wird im Urin ausgeschieden. Bestimmte Aminosäuren (überwiegend verzweigt-kettige) können bei Bedarf zu Glukose umgewandelt werden (Glukoneogenese).

Auch das EW der Mitochondrien wird innerhalb von 3 Wochen abgebaut. Etwa 5% der Mitochondrien werden pro Tag umgesetzt.

➤ **Je höher die Belastungsintensität, desto mehr Mitochondrien werden abgebaut!**

Üblicherweise wird bei Belastung und ausreichender Versorgung mit Nährstoffen der gesamte Mehrbedarf an Energie durch die Oxidation von Fetten und/oder Kohlenhydraten gedeckt, sodass die Energiebereitstellung aus Eiweiß unter Belastung praktisch keine Rolle spielt! Nur bei Kohlenhydratmangel werden Proteine im größeren Umfang zur Energiebereitstellung herangezogen.

1 g Eiweiß ergibt bei vollständiger Verbrennung 4,3 kcal. Wegen der spezifisch dynamischen Stoffwechselwirkung stehen dem Organismus aber tatsächlich nur ca. 3 kcal/g zur Verfügung. Mit einem Liter Sauerstoff werden aus Eiweiß 4,5 kcal bereitgestellt.

1.2 Was ist Ausdauer?

Definition

Ausdauer ist die Fähigkeit der Muskelzelle bei Belastung verbrauchtes ATP zu resynthesisieren.

Die umfassendste Definition von Ausdauer ist folgende:

Diese Definition beinhaltet alle sonst in der Literatur verwendeten Definitionen, die meist nur einen bestimmten Teilaspekt der Ausdauer beschreiben (z. B. Ausdauer ist die Fähigkeit, mit 70% der $\dot{V}O_{2max}$ möglichst lange zu laufen, oder Ausdauer ist die Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung).

➤ **Wie kann ATP synthetisiert werden?**

ATP wird – wie in den vorangegangenen Kapiteln geschildert – auf 4 verschiedene Arten synthetisiert: dabei unterscheidet man 2 aerobe und 2 anaerobe Produktionswege.

1.2.1 Anaerobe Ausdauer

1.2.1.1 Alaktazid anaerobe Ausdauer

Die Energiegrundlage der alaktazid anaeroben Ausdauer ist die Spaltung von Kreatinphosphat.

Da Kreatinphosphat eine dem ATP ähnliche chemische Verbindung ist, kann die Spaltung und Energiefreisetzung augenblicklich und mit einer dem ATP-Zerfall gleichen Geschwindigkeit erfolgen. Mit der dabei freiwerdenden Energie wird ATP resynthetisiert.

Kreatinphosphat ist daher die erste Energieressource, die bei Erhöhung des Energieumsatzes einspringt und damit einen kritischen ATP-Abfall verhindert.

Die maximale Energiemenge ist ca. 7 kcal. Wird die Kreatinphosphatspaltung maximal beansprucht, dann sind (bei Trainierten) Leistungen bis zu **12 W/kg KG** möglich. Allerdings ist der Energiespeicher in 7 s geleert und die hohe Leistung kann nicht länger aufrechterhalten werden. Die Kreatinphosphatspaltung erreicht somit praktisch augenblicklich das dem Energieumsatz entsprechende Niveau und wird innerhalb von **10 s** wieder heruntergefahren. Anschließend übernehmen andere ATP-liefernde Systeme die Energiebereitstellung.

1.2.1.2 Laktazid anaerobe Ausdauer

Die Energiegrundlage bei laktazid anaeroben Belastungen ist die anaerobe Glykolyse, also der anaerobe Glukoseabbau zu Pyruvat.

Diese Form der Energiebereitstellung muss dann zur aeroben Energiebereitstellung »dazugeschaltet« werden, wenn der Gesamtenergiebedarf größer ist, als aerobe Stoffwechselforgänge bereitstellen können. Das hat nichts mit einem Sauerstoffmangel zu tun, sondern mit der begrenzten oxidativen Enzymmenge in den Mitochondrien.

➤ **Sauerstoff ist im Muskel immer ausreichend vorhanden!**

Wenn beim anaeroben Glukoseabbau im Muskel mehr Pyruvat produziert wird als oxidativ im Zitronensäurezyklus abgebaut werden kann, entsteht Laktat.

Laktat führt im Muskel und im Blut zur zunehmenden Übersäuerung mit Milchsäure (Laktatazidose). Im Blut ist der Laktatanstieg auf insgesamt 14 mmol/l die maximal tolerierbare Säurekonzentration (Azidose), die nach ca. 40 s erreicht wird.

Limitierend für die anaerobe Ausdauer ist nicht der Glukosevorrat (Muskelglykogen), sondern die **Laktatazidose**. Denn wegen der Azidose muss die Belastung abgebrochen werden, und eine Erholungspause ist zum Abbau der Azidose erforderlich.

Mittels anaerober Glykolyse ist eine Leistung von **ca. 6 W/kg KG** möglich bzw. können max. 15 kcal, jedoch nur einmal, zur Verfügung gestellt werden, wegen des Pasteur-Effekts. Diese 15 kcal können bei maximaler Nutzung der Glykolyse in ca. 40 s umgesetzt werden. Bei geringerer Leistung, und daher nicht so schnellem Laktatanstieg, kann die gleiche Energiemenge bis etwa 3 min gestreckt werden, ist jedoch immer **nur einmal nutzbar!** Auch dabei kann ein Laktatspiegel von 15 mmol/l erreicht werden.

➤ **Länger als 3 min kann eine Belastung mit so hoher Intensität nicht fortgesetzt werden, weil die Glykolyse durch den Pasteur-Effekt heruntergefahren und gehemmt wird.**

Bitte nicht durcheinander bringen: Die anaerobe Energiebereitstellung ersetzt niemals die aerobe, auch nicht teilweise! Die anaerobe Energiebereitstellung wird zu der auf Hochtouren laufenden oxidativen Energiebereitstellung immer nur hinzugeschaltet.

1.2.2 Aerobe Ausdauer

1.2.2.1 Intensiv aerobe Ausdauer

Die Energiegrundlage der intensiv aeroben Belastungen ist der ausschließlich **oxidative Glukoseabbau**.

Der oxidative Glukoseabbau dient bei Belastungsintensitäten über 65% der $\dot{V}O_{2max}$ der Energiebereitstellung. Dabei wird Glukose hauptsächlich oxidativ abgebaut, weil dabei die Energiebilanz pro Liter Sauerstoff um 6,4% günstiger ist als bei