

Energiestoffwechsel

Andreas Schmid

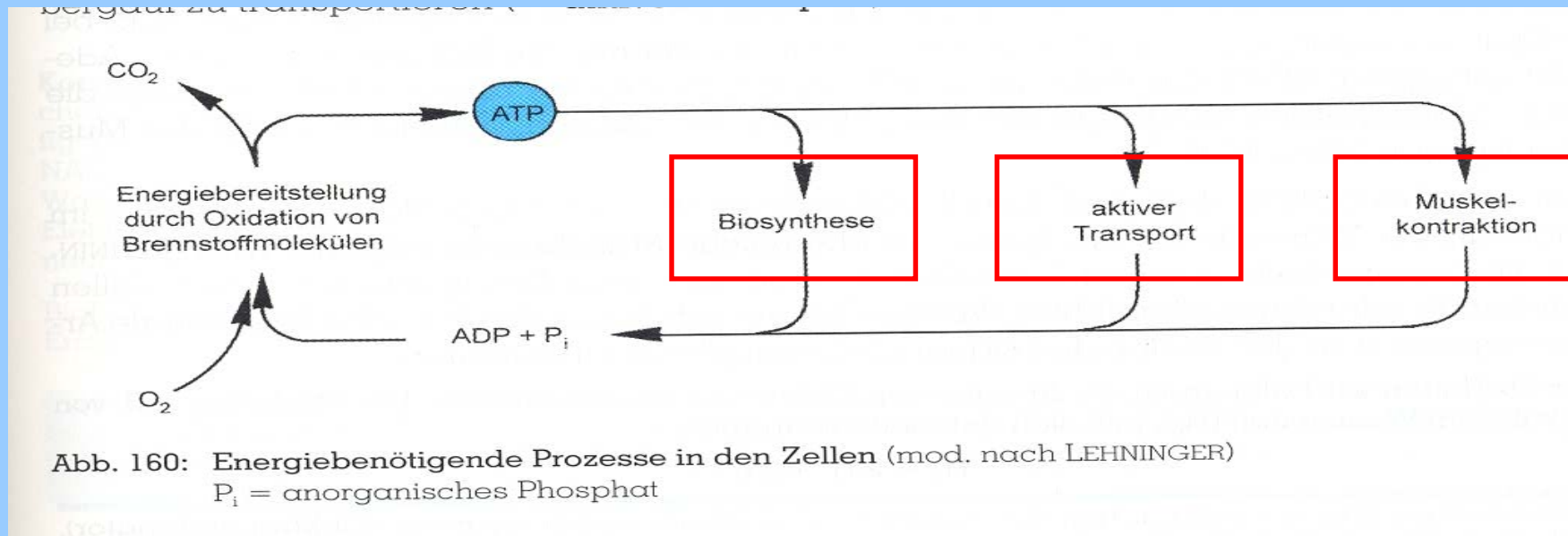
Medizinische Universitätsklinik Freiburg

Abt. Präventive und Rehabilitative Sportmedizin

Energiestoffwechsel



Energiestoffwechsel



Energiestoffwechsel

Das Konzept

“ATP als primärer und universeller
Energieförderer in den Zellen”

wurde bereits 1941 von Lipmann postuliert!

Energiestoffwechsel

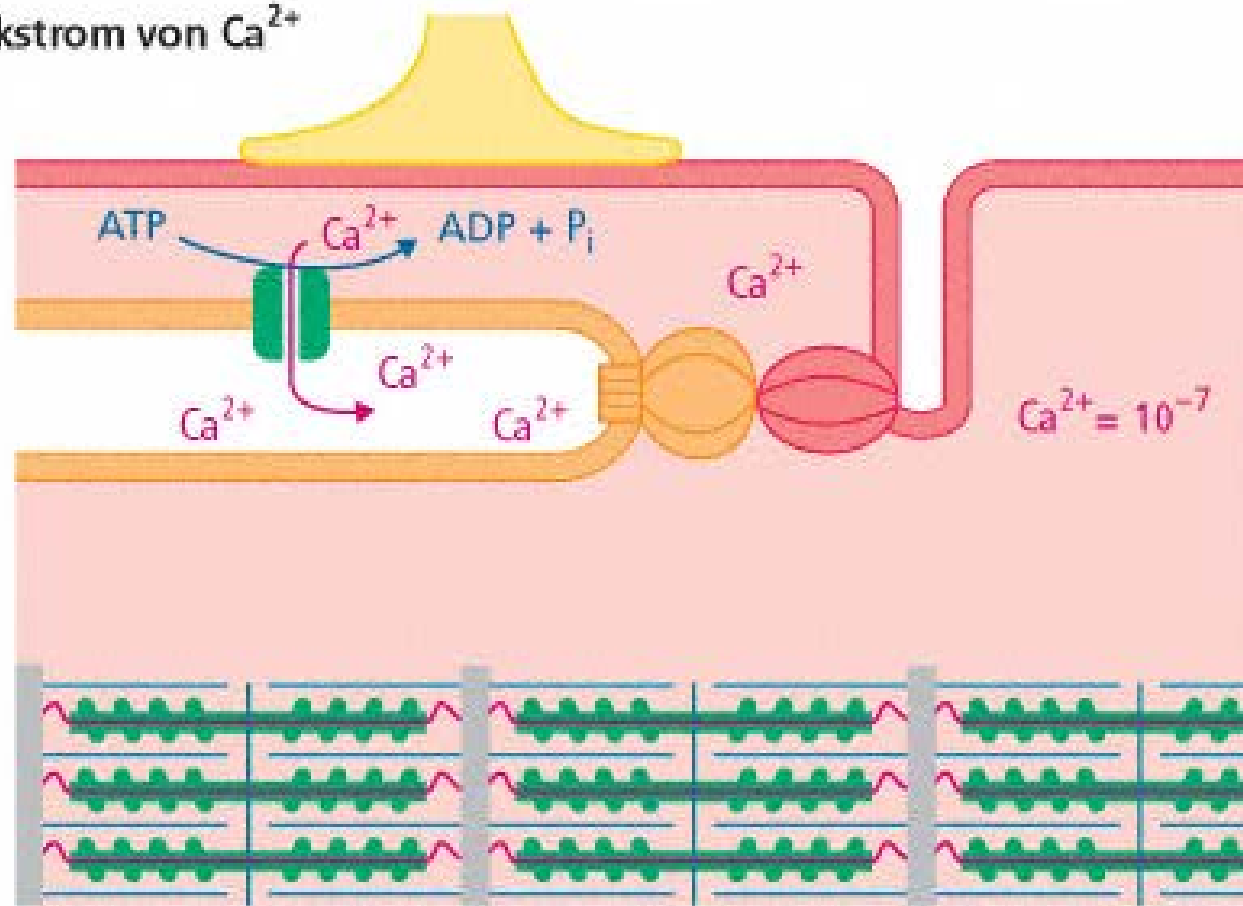
Hydrolyse von Adenosintriphosphat (ATP) in
Adenosindiphosphat (ADP) + Phosphat (Pi)

= 30 KJ/mol ATP

ATP-Vorrat im Muskel ist sehr gering, z.B. für 3-4
Muskelkontraktionen mit einer Belastungszeit von
1-2 sec.

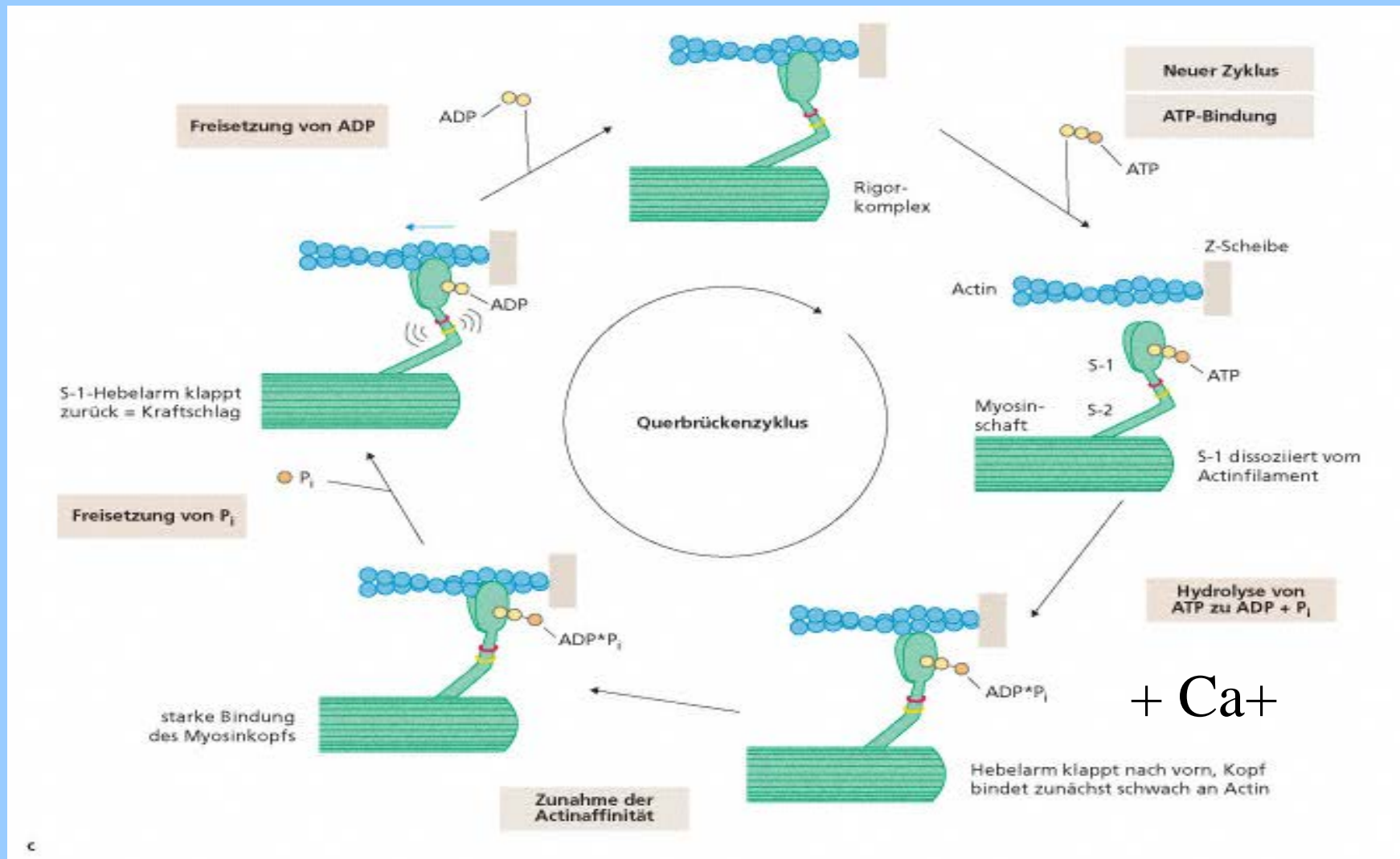


Rückstrom von Ca^{2+}



Relaxation

Muskelkontraktion - Querbrückenzyklus



Energiestoffwechsel

Der Wiederaufbau von ATP aus ADP (**ATP-Resynthese**) erfolgt auf drei Wegen:

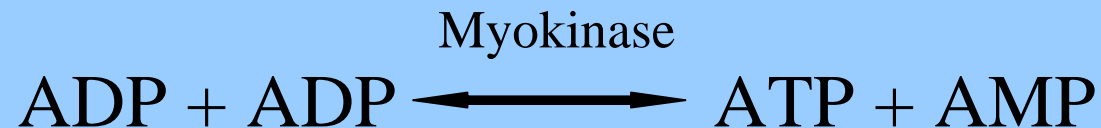
Energiestoffwechsel

Der Wiederaufbau von ATP aus ADP (**ATP-Resynthese**) erfolgt auf drei Wegen:

- anaerob alaktazid aus Kreatinphosphat
- anaerob laktazid (anaerobe Oxidation)
- aerob (aerobe Oxidation)

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Myokinase-Reaktion:



- untergeordnete Rolle in der Energiebereitstellung
- sportmedizinische Bedeutung, da AMP über Ammoniak zu Harnstoff und das spätere IMP zu Harnsäure abgebaut wird

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Lohmann-Reaktion:



- sehr schnelle Energie
- für kurze Zeit
- im Zytoplasma

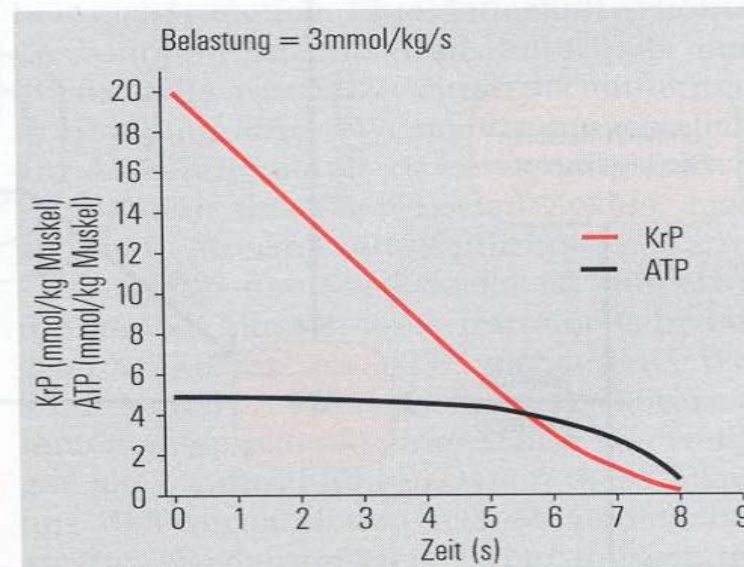
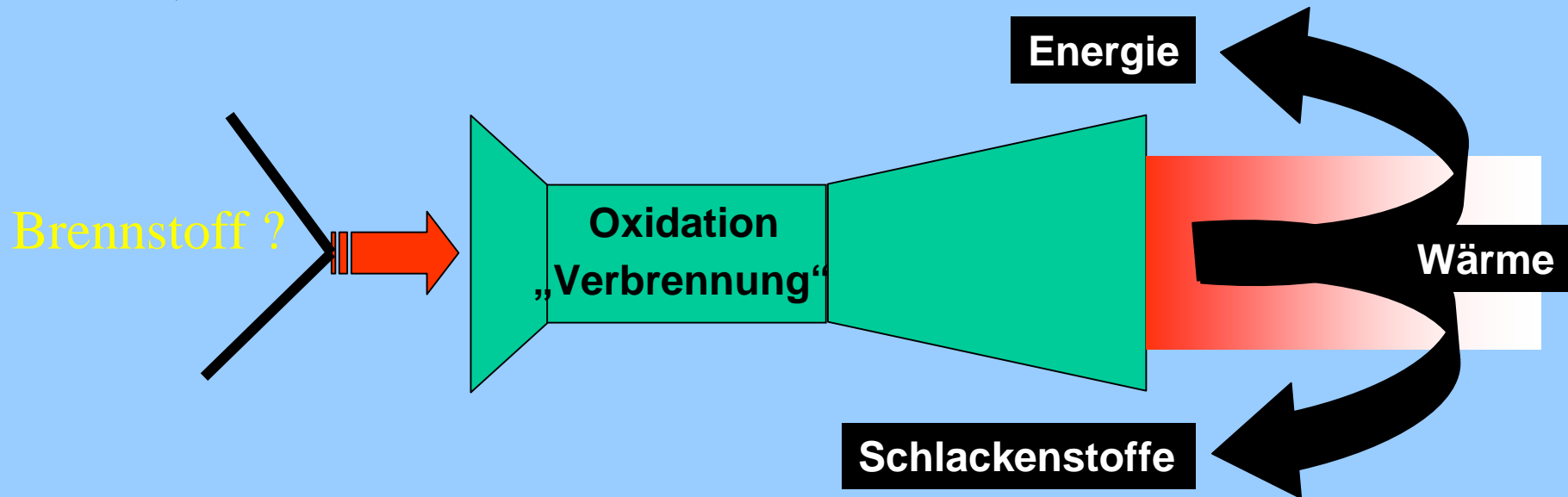


Abb. 1-2: Zeitverhalten von ATP und Kreatinphosphat bei einer Belastung mit einem Energieverbrauch von 3 mmol/kg/s ATP. Anfangskonzentrationen: ATP = 5 mmol/kg Muskel. KrP = 20 mmol/kg Muskel.

Energiebilanz und Energiezufuhr

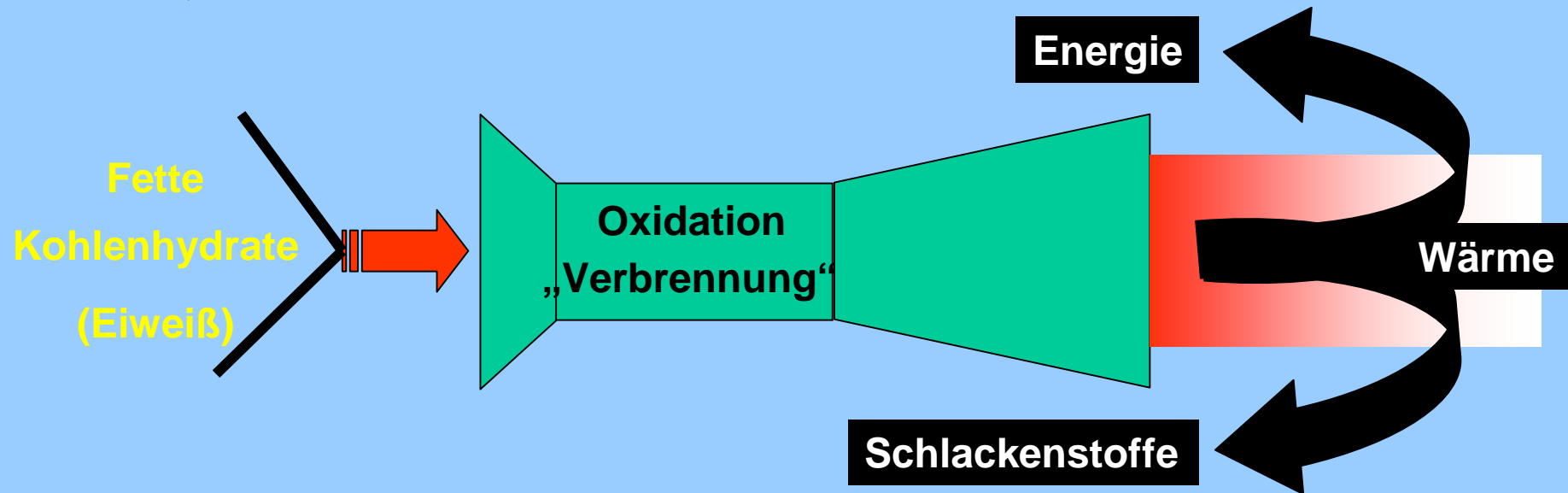
- ➔ Erhaltung der Körperwärme
- ➔ Muskeltätigkeit, Verdauung, Stoffwechsel
- ➔ Gehirnleistung
- ➔ Wachstum



Eine ausreichende Energiezufuhr ist für die Funktion des Organismus unerlässlich, insbesondere unter intensiver und erschöpfender körperlicher Belastung !

Energiebilanz und Energiezufuhr

- Erhaltung der Körperwärme
- Muskeltätigkeit, Verdauung, Stoffwechsel
- Gehirnleistung
- Wachstum

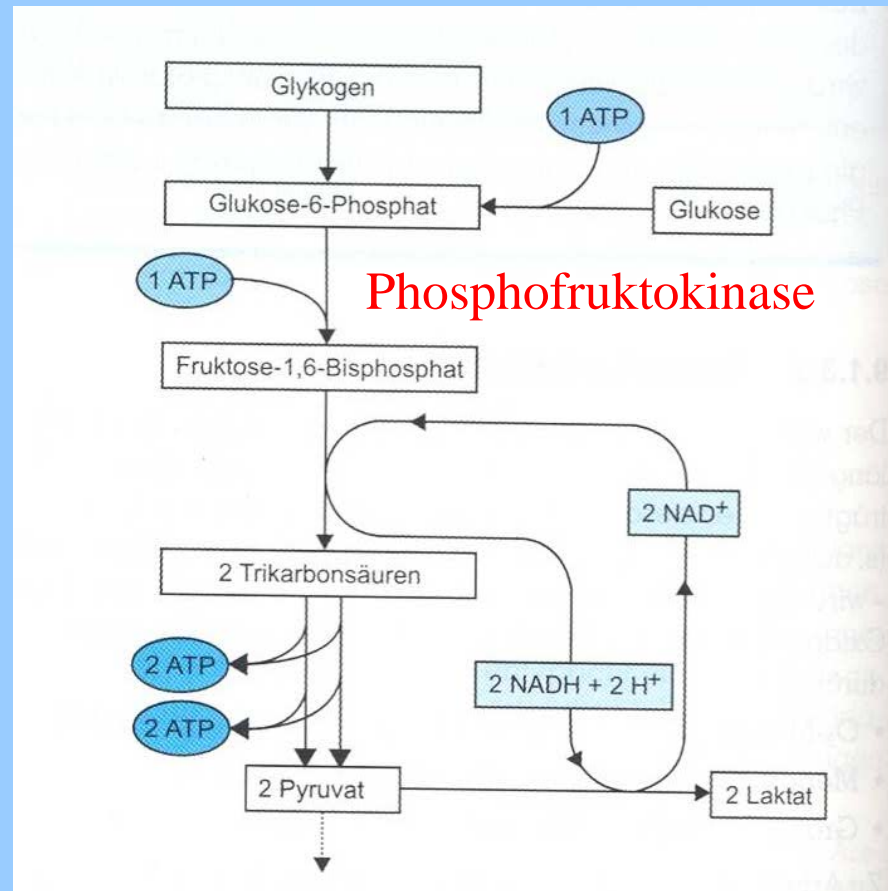


Eine ausreichende Energiezufuhr ist für die Funktion des Organismus unerlässlich, insbesondere unter intensiver und erschöpfender körperlicher Belastung !

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Anaerob laktazide ATP-Resynthese (anaerobe Glykolyse):

- Schlüsselenzym:
Phosphofruktokinase



Energiestoffwechsel

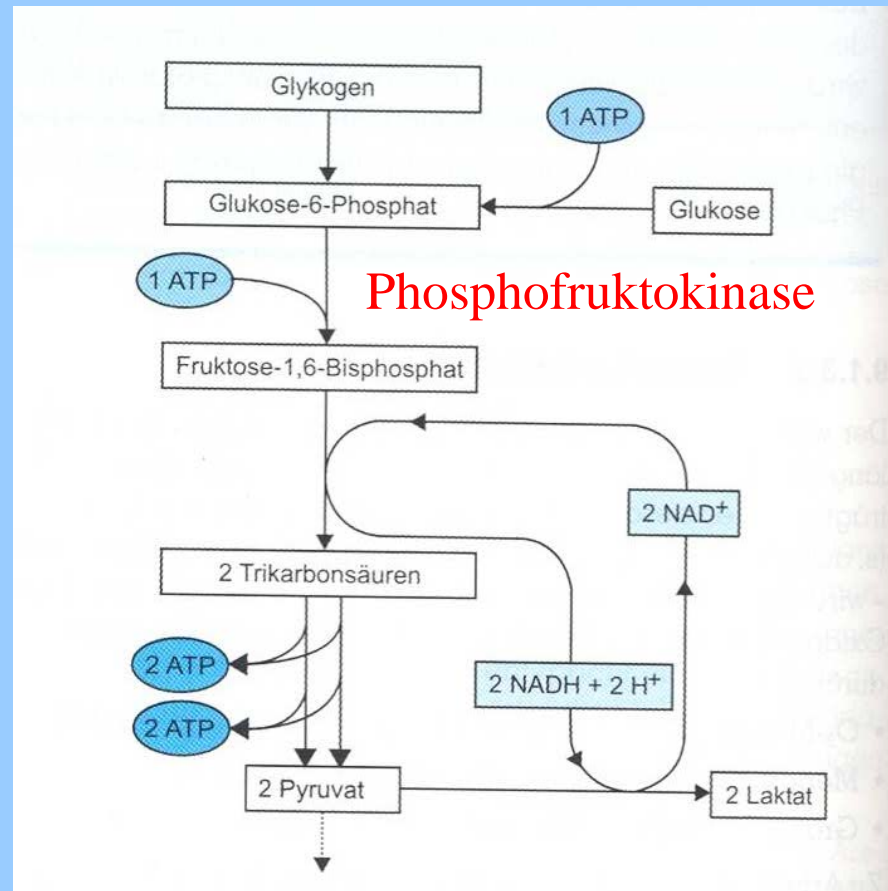
Enzyme

- sind zum überwiegenden Teil hochmolekulare **Eiweißverbindungen**
- katalysieren (starten oder beschleunigen) chemische Reaktionen ohne sich selber zu verändern
- katalysieren nur die Reaktion eines Substrates (**Wirkungsspezifität**)

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Anaerob laktazide ATP-Resynthese (anaerobe Glykolyse):

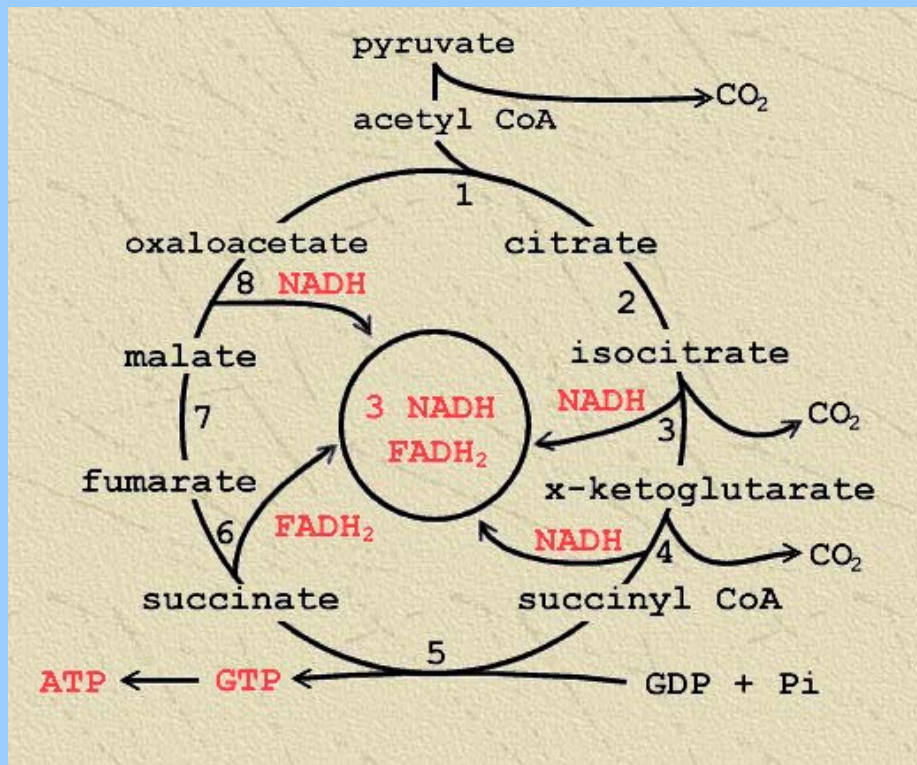
- Schlüsselenzym:
Phosphofruktokinase



Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Aerobe Glukose- und Fettsäureoxidation:

Zitrat- bzw. Krebszyklus



Beta-Oxidation:

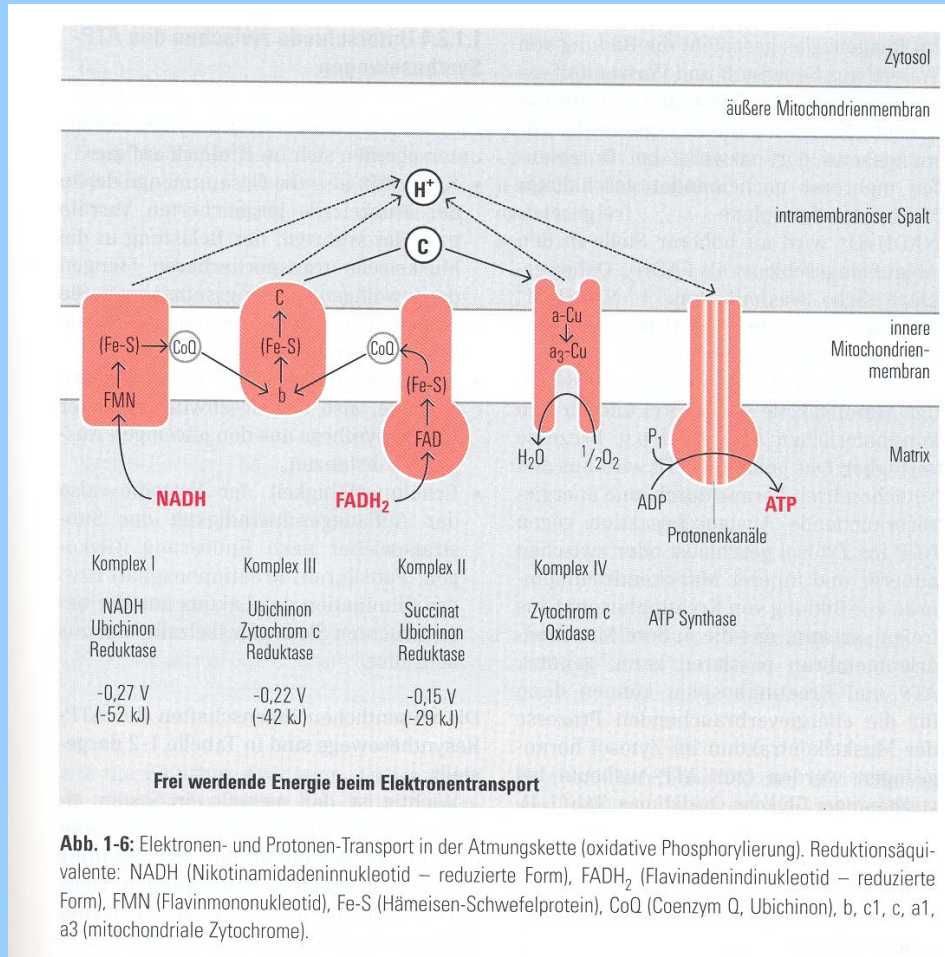
Fettsäurenoxidation zu
Acetyl-CoA im
Mitochondrium

Summary of Kreb's cycle

1. 3 NADH + H
2. 1 FADH₂
3. 1 GTP (ATP)-substrate level phosphorylation
4. 2 CO₂

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Atmungskette:



Frei werdende
Energie beim
Elektronentransport

Abb. 1-6: Elektronen- und Protonen-Transport in der Atmungskette (oxidative Phosphorylierung). Reduktionsäquivalente: NADH (Nikotinamidadeninnukleotid – reduzierte Form), FADH₂ (Flavinadenindinukleotid – reduzierte Form), FMN (Flavinmononukleotid), Fe-S (Hämeisen-Schwefelprotein), CoQ (Coenzym Q, Ubichinon), b, c1, c, a1, a3 (mitochondriale Zytochrome).

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

ATP-Ausbeute bei vollständiger Glukoseoxidation:

Tab. 1-1: Die ATP-Ausbeute bei vollständiger Glukoseoxidation

Reaktionsfolge	ATP-Ausbeute pro Glukose
Glykolyse: von der Glukose zum Pyruvat (im Zytosol)	
Phosphorylierung der Glukose	-1
Phosphorylierung von Fruktose-6-Phosphat	-1
Dephosphorylierung von 2 Molekülen 1,3-BPG	+2
Dephosphorylierung von 2 Molekülen Phosphoenolpyruvat	+2
Bildung von 2 NADH bei der Oxidation von 2 Molekülen Glycerin-3-Phosphat	
Umwandlung von Pyruvat in Azetyl-CoA (in den Mitochondrien)	
Bildung von 2 NADH	
Zitronensäurezyklus (in den Mitochondrien)	
Bildung von 2 Molekülen Guanosintriphosphat aus 2 Molekülen Succinyl-CoA	+2
Bildung von 6 NADH bei der Oxidation von jeweils 2 Molekülen Isozitat, α -Ketoglutarat und Malat	
Bildung von 2 FADH ₂ bei der Oxidation von 2 Molekülen Succinat	
oxidative Phosphorylierung (in den Mitochondrien)	
2 NADH aus der Glykolyse liefern jeweils 2,5 ATP* (bei NADH-Transport über den Glycerinphosphat-Shuttle)	+5
2 NADH aus der oxidativen Decarboxylierung von Pyruvat liefern jeweils 2,5 ATP*	+5
2 FADH ₂ aus dem Zitronensäurezyklus liefern jeweils 1,5 ATP	+3
6 NADH aus dem Zitronensäurezyklus liefern jeweils 2,5 ATP	+15
Nettoausbeute pro Glukose	+32

* Anmerkung: Die Angaben zur ATP-Ausbeute basieren auf neueren Erkenntnissen.

Energiebereitstellung und energetische Substrate

Energiebereitstellungsformen

anaerob-alaktazid (1)	ATP, ADP, AMP
anaerob-alaktazid (2)	KrP, Pi
anaerob-laktazid (3)	Glykolyse (NADH₂)
aerob (4)	Glukose-Oxidation
aerob (5)	Fettsäure-Oxidation
anaerobe Reserve (6)	Myokinase-Reaktion AMP-Abbau
aerobe Reserve (7)	Proteinabbau Aminosäure-Oxidation

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Übersicht:

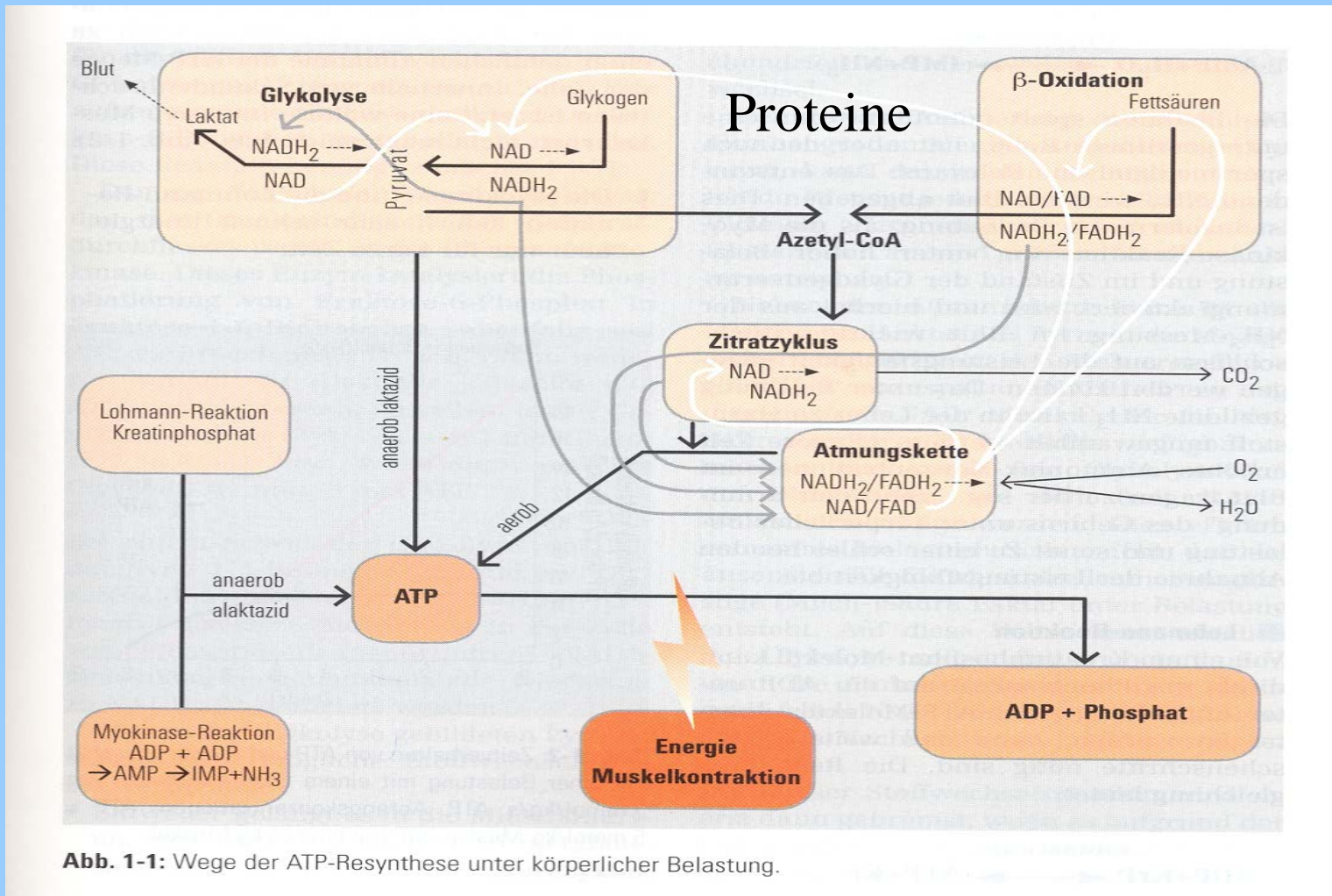
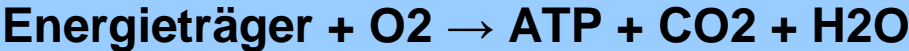
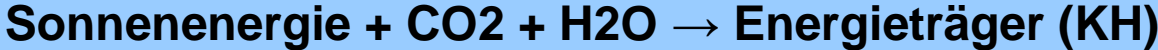
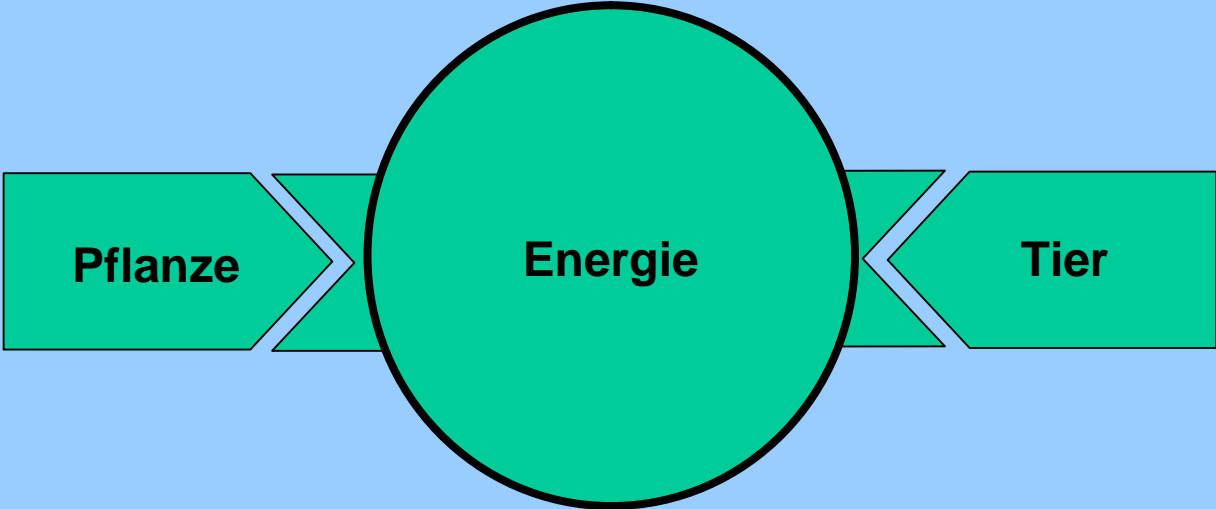


Abb. 1-1: Wege der ATP-Resynthese unter körperlicher Belastung.

Energiebilanz und Energieerhalt

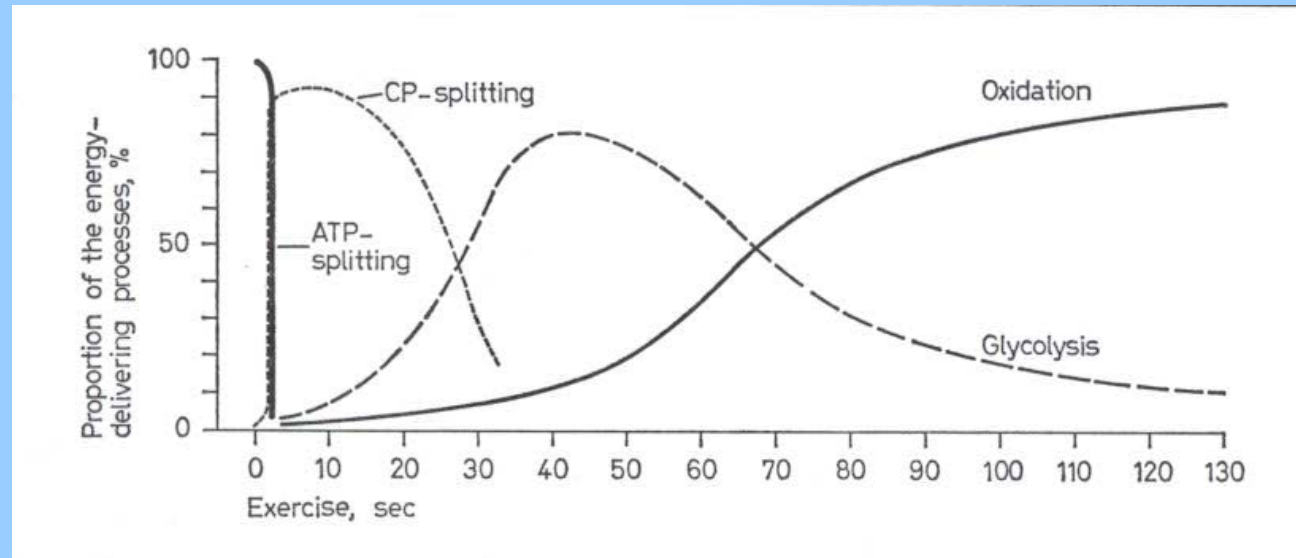


Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

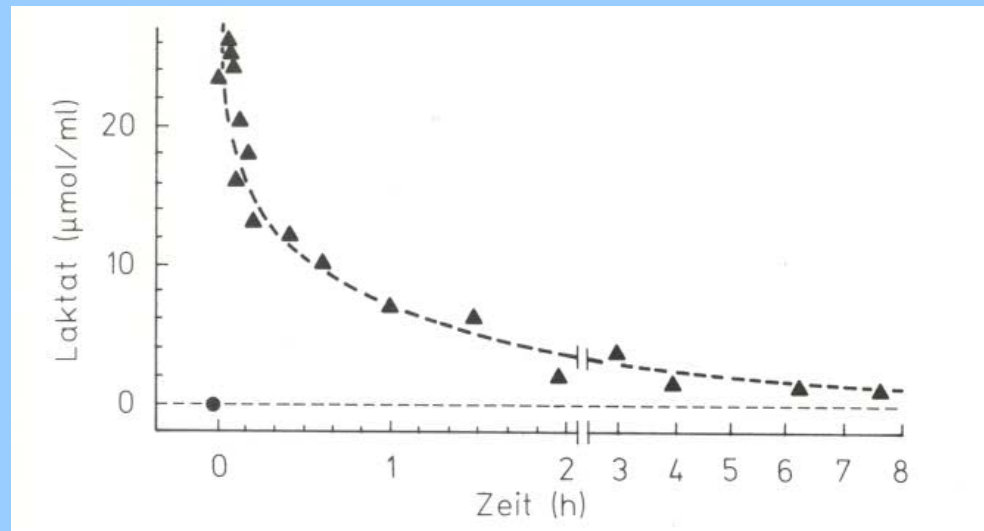
Eigenschaften der verschiedenen ATP-Resynthesewege:

	Gehalt [$\mu\text{mol/g}$]	Maximale Flußrate [$\mu\text{mol/g/s}$]	Maximale Arbeits- dauer	Sportbeispiele
ATP, KP → ADP, K	20-25	1,6-3,0	< 10 s	Gewichtheben, Sprung, Sprint, Gymnastik
Glykogen → Laktat	300	1,0	≤ 1 min	400-m-Lauf, 100-m-Schwimmen Tennis
Glykogen → CO ₂ , H ₂ O	3600	0,5	≤ 1 h	Eiskunst, Fechten, Boxen, 10000-m-Lauf Handball Fußball
Fettsäuren → CO ₂ , H ₂ O	1200	0,24	> 1 h	Marathon, Skilanglauf, Straenradrennen Hockey

Steuerung der Energiebereitstellung – Zeitdauer und Intensität



Energiebereitstellung und energetische Substrate



Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Anteil der Stoffwechselwege bei unterschiedlichen Belastungen

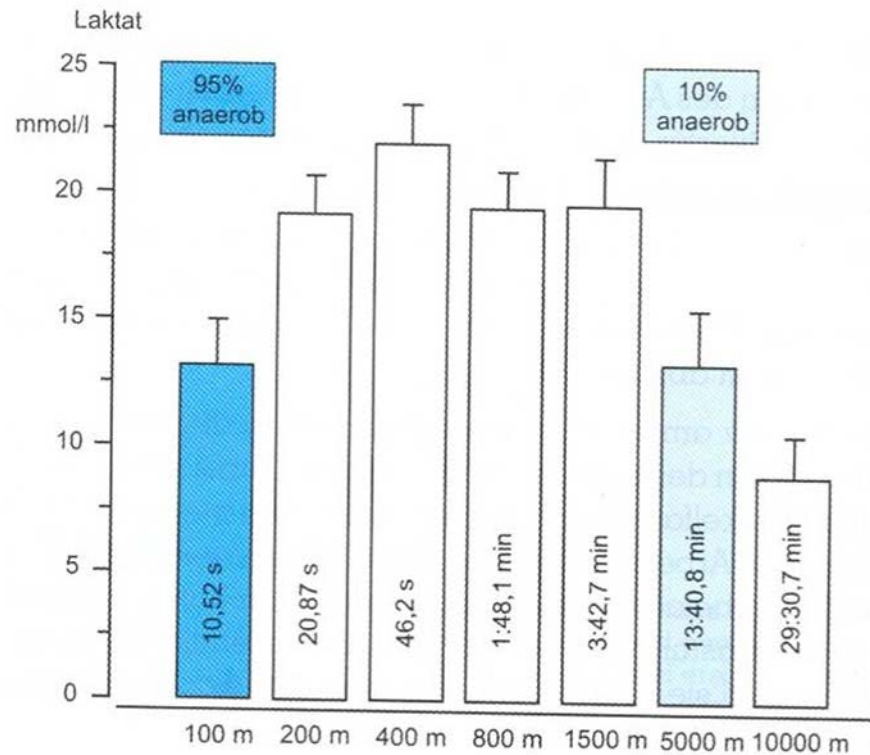
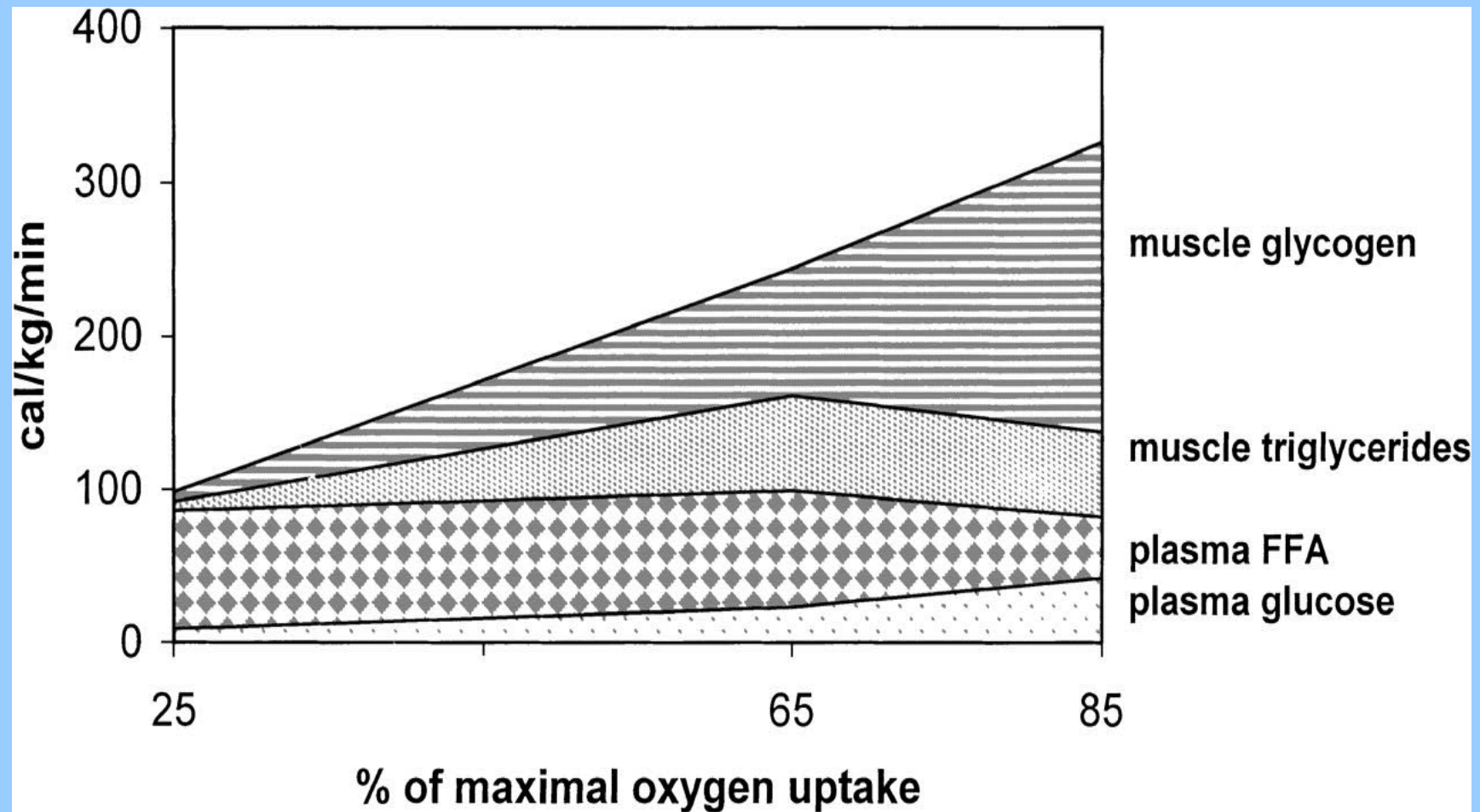


Abb. 173:
Blutlaktatwerte (Mittelwert und Standardabweichung) nach maximaler Belastung in unterschiedlichen leichtathletischen Laufdisziplinen sowie prozentuale Anteile der anaeroben Energiebereitstellung an der Gesamtenergiebereitstellung (Daten aus KINDERMANN/KEUL 1977)

Energiebereitstellung und Substratnutzung Oxidativer Substratumsatz im arbeitenden Muskel in Abhängigkeit der Belastungsintensität



Energiebereitstellung und energetische Substrate

Fasertypisierung und Energiebereitstellung



MUSKELFASERSPEKTRUM - Übersicht			
Fasertyp	Schnellkontrahierende Faser (FT - fast twitch)		Langsamkontrahierende Faser (ST - slow twitch)
	fast twitch glycolytic	fast twitch oxidative	
Kurzbezeichnung	FTG	FTO	ST
Synonyma (bisherige Nomenklatur)	weiße Faser fast twitch white Typ II B - Faser FF- (fast fatigue) Faser A-Faser	rote Faser fast twitch red Typ II A - Faser FR - (fast resistant)- Faser C-Faser	rote Faser slow twitch intermediate Typ I - Faser B-Faser
Morphologische und metabolische Charakteristik	wenig kapillarisiert weniger Mitochondrien weniger Myoglobin Kreatinphosphat, Glykogen Enzyme der Glykolyse	reichlich kapillarisiert viele Mitochondrien viel Myoglobin Glykogen, Neutralfette Enzyme des oxydat. Abbaus	reichlich kapillarisiert viele Mitochondrien viel Myoglobin Glykogen, Neutralfette Enzyme des oxydat. Abbaus
dominierender Stoffwechsel	Glykolyse	oxidative Phosphorylierung	oxidative Phosphorylierung
Trainingswirkung	metabolische Differenzierung intensive Belastung ← intensive Belastung → extensive Belastung kurzzeitige Belastung extensive Belastung		
Einsatz	- Schnellkraft - Kraft - Schnellkraft - Maximalkraft	- Kraft - Ausdauer - Maximalkraft	- Ausdauer
ATP-ase Gehalt	hoch	mäßig	niedrig

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Regulation:

- Enzyme/Schlüsselenzyme

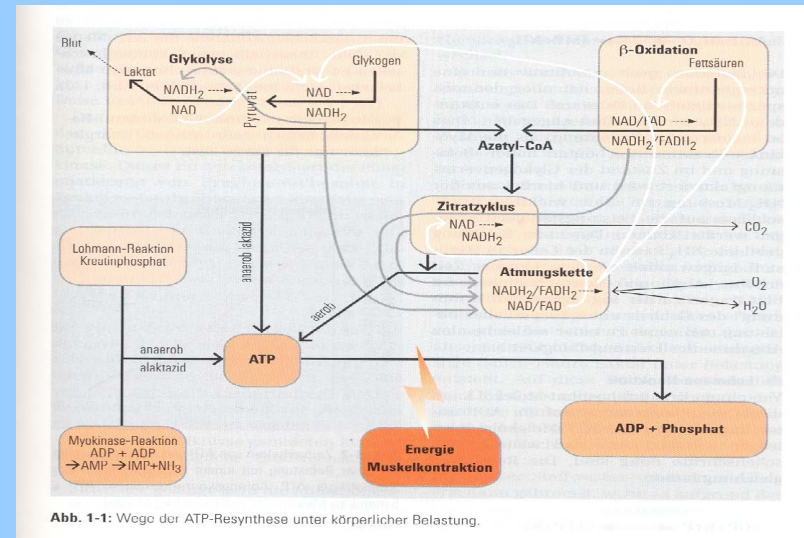
z.B. pH-Optimum

- ADP-Konzentration in Mitochondrien

- $\text{NADH} + \text{H}^+/\text{NAD}$ hoch, Zitratzyklus gehemmt

- Enzym-Hemmung durch Produkte

- Angebot von Vorstufen, Co-Enzymen, Co-Faktoren, Hormone



Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Laktatleistungsdiagnostik:

Laktatkonzentration ist das Resultat aus

- Laktatbildung
- Laktatdiffusion
- Laktattransport
- Laktatelimination

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Laktatleistungsdiagnostik:

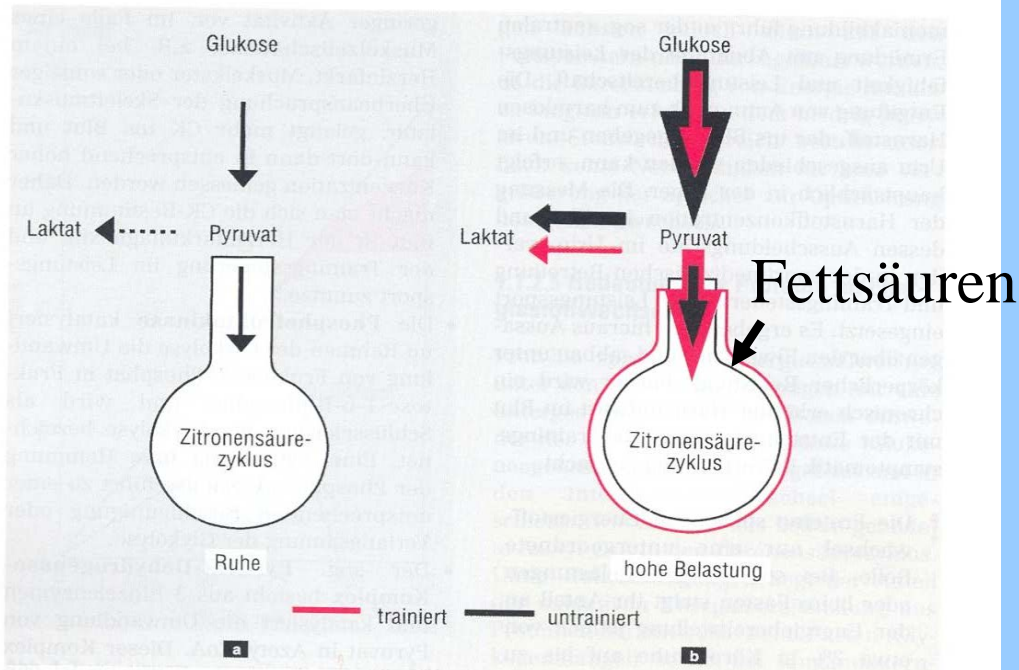


Abb. 1-8: Enzymatische Leistungsfähigkeit des Zitronensäurezyklus

a) In Ruhe reicht die Verbrennungskapazität des Zitronensäurezyklus aus, um praktisch alles in der Glykolyse anfallende Pyruvat zu verbrennen. Es wird kaum Laktat gebildet.

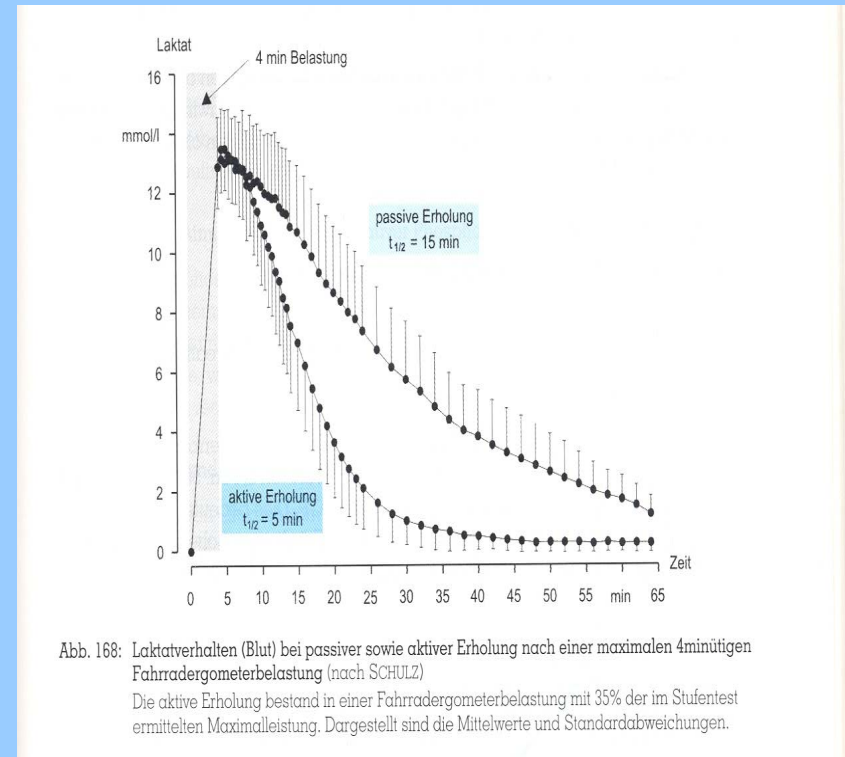
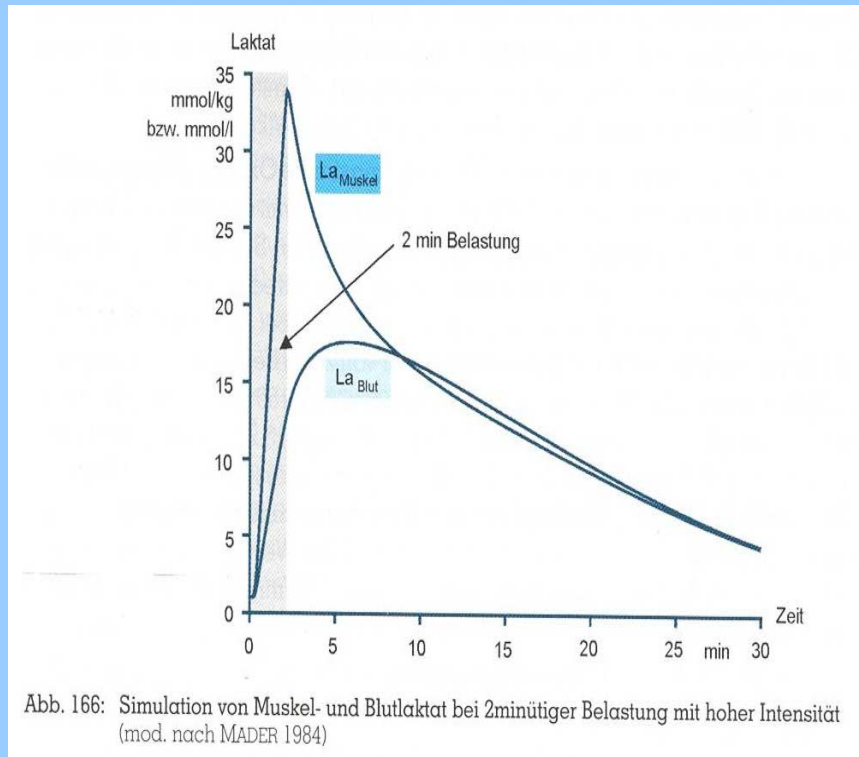
b) Bei hoher Belastung fällt sehr viel Pyruvat an. Die verfügbaren aeroben Enzyme reichen nicht aus, um alles anfallende Pyruvat zu verbrennen. Dieses wird in zunehmendem Maße in Laktat umgewandelt. Nach Training sind mehr Enzyme vorhanden, das anfallende Pyruvat wird bei gleicher absoluter Belastung, aber auch bei gleicher prozentualer Belastung, bezogen auf die beim Trainierten höhere maximale Leistungsfähigkeit, in geringerem Maße in Laktat umgewandelt. Gleichzeitig kommt es beim Ausdauertrainierten zu einer Verschiebung der energetischen Kapazitäten; während das oxidative System in seiner Funktion verbessert wird, sinkt die glykolytische Kapazität ab, es fällt weniger Pyruvat an. Die Laktatkurve wird nach rechts verschoben (s. a. Abb. 1-16).

Laktatelimination in

- Leber (Glykogen)
- Herz
- aktive und nicht-aktive Muskulatur

Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Erholungszeit des “Laktates”



Energiestoffwechsel – ATP-Resynthese

Sauerstoffschuld:

