



Spiroergometrie

Grundlagen



Definition

Die **Spiroergometrie** - synonyme Bezeichnungen „*Ergospirometrie*“ und „*Ergospirographie*“ - ist ein diagnostisches Verfahren. Mit dem sich qualitativ und quantitativ die Reaktion von Herz, Kreislauf, Atmung und Stoffwechsel auf muskuläre Arbeit sowie die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit beurteilen lassen.

(HOLLMANN/HETTINGER, Schattauer 2000)



(Spiro-)Ergometrie – wofür?

- ⊗ Beurteilung der Leistungsfähigkeit/Belastbarkeit bei Gesunden und Kranken
- ⊗ Kontrolle der Leistungsfähigkeit vor und pharmakologischen oder chirurgischen Eingriffen
- ⊗ Objektivierung von Trainingseffekten
- ⊗ Gutachterliche / arbeitsmedizinische Beurteilung (z.B. G26)
- ⊗ Aufdeckung latenter Symptome, die erst unter Belastung sichtbar werden, z.B. ERBS, HRST, RR-Anstiege
- ⊗ Objektivierung funktioneller Veränderungen, die in Ruhe auftreten; z.B. AV-Blockierung
- ⊗ Trainingsempfehlungen für Gesunde und Kranke



Physikalische Grundlagen

⊗ Leistung = Arbeit pro Zeiteinheit

⊗ Arbeit = Kraft x Weg (kpm/sec)

⊗ Beispiel – pro Sekunde 1 Kilopond 1 Meter hochheben oder im Stufentest:

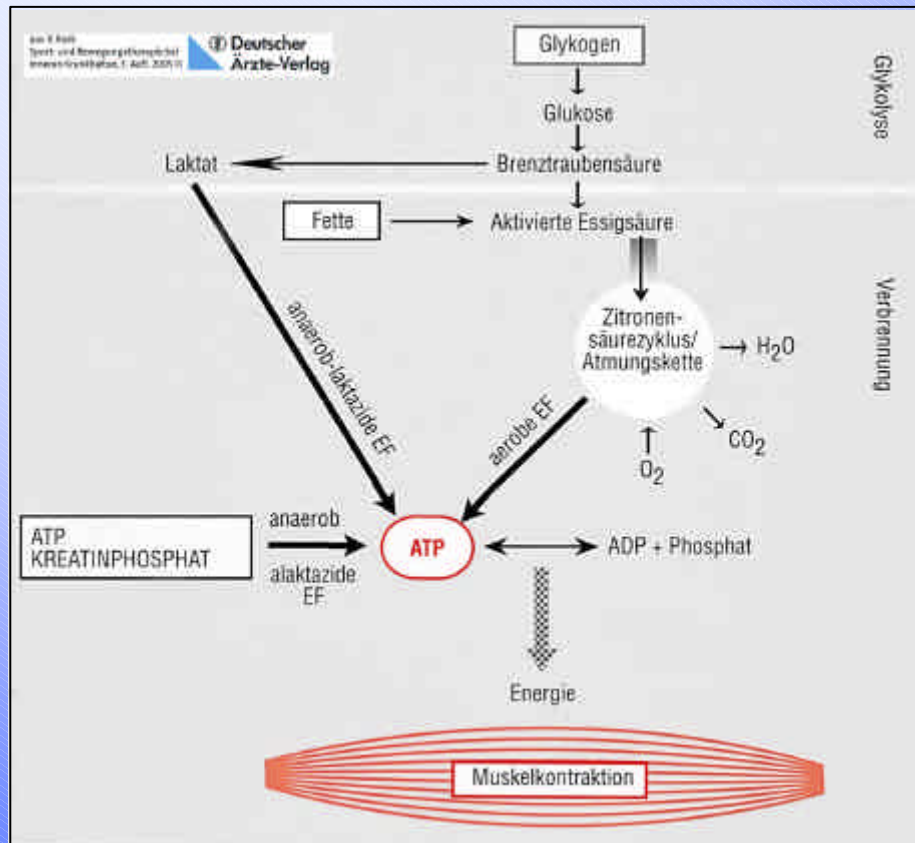
80kg Mann steigt 30x/min 0.5m hohe Stufe = $(0.5 \times 80) / 2 = 20$ kpm/sec

1kpm/s \approx 10 Watt (1 Watt \approx 6 kpm/min)

→ Leistung von 200 Watt



Energiebereitstellung





Wesentliche Meßgrößen in der Spiroergometrie

- **Primäre Größen:**

\dot{V}_E = expiratorisches Atemminutenvolumen (l/min)

F_{ECO_2} = expiratorische Konzentration von CO_2 (Volumen %)

$? F_{EO_2}$ = Konzentrationsdifferenz für O_2 zwischen
In- und Expiration (Volumen %)

- **Abgeleitete Größen:**

$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \cdot ? F_{EO_2}$ (l/min) *

$\dot{V}CO_2 = \dot{V}_E \cdot F_{ECO_2}$ (l/min)

* in geschlossenen Spirographen primäre Größe



Wesentliche Meßgrößen in der Spiroergometrie

- Quotienten:

$$RQ = \frac{\dot{V}CO_2}{\dot{V}O_2} \quad \text{respiratorischer Quotient}$$

$$A\ddot{A}_{O_2} = \frac{\dot{V}_E}{\dot{V}O_2} \quad \text{Atemäquivalent für } O_2$$

$$A\ddot{A}_{CO_2} = \frac{\dot{V}_E}{\dot{V}CO_2} \quad \text{Atemäquivalent für } CO_2$$

$$O_2 - \text{Puls} = \frac{\dot{V}O_2}{Hf} \quad (\text{ml}) \quad O_2 - \text{Aufnahme pro Herzschlag}$$



Die wichtigsten gemessenen oder berechneten alveolären Atemgasfraktionen

$$V_E \quad (\text{Atemzugvolumen}) \quad = V_D + V_{EA}$$

$$\dot{V}_E \quad (\text{Atemzeitvolumen}) \quad = \dot{V}_A + \dot{V}_D$$

$$\dot{V}_{O_2} \quad (\text{O}_2 \text{ Aufnahme}) \quad = \dot{V}_I \cdot F_{IO_2} - \dot{V}_E \cdot F_{EO_2}$$

$$\dot{V}_{CO_2} \quad (\text{CO}_2 \text{ Abgabe}) \quad \sim \dot{V}_E \cdot F_{EO_2}$$

$$RER \quad (\text{Resp. Austauschrate}) = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}$$

oft: RQ (Respir. Quotient)

pCO_2 (Kohlendioxidpartialdruck)

pO_2 (Sauerstoffpartialdruck)

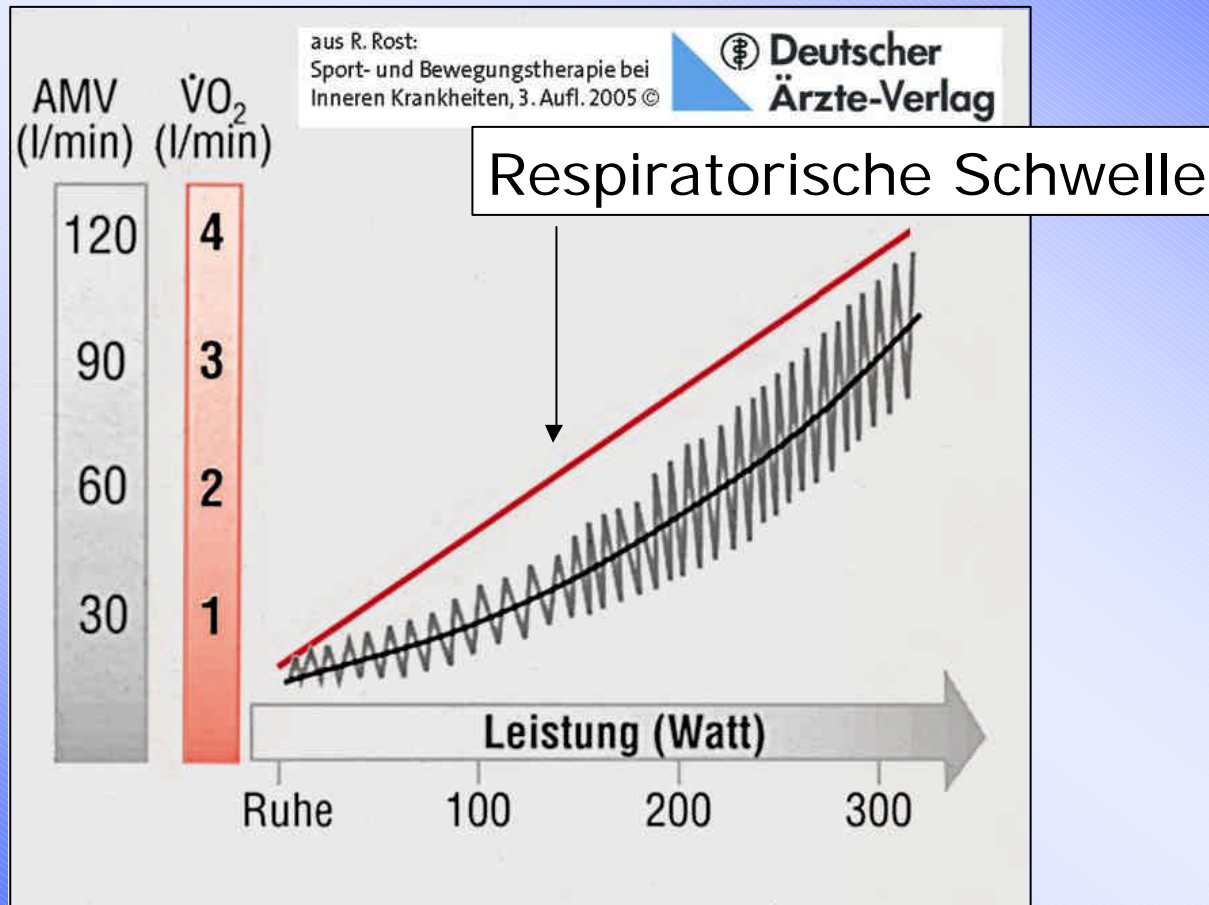


Definitionen

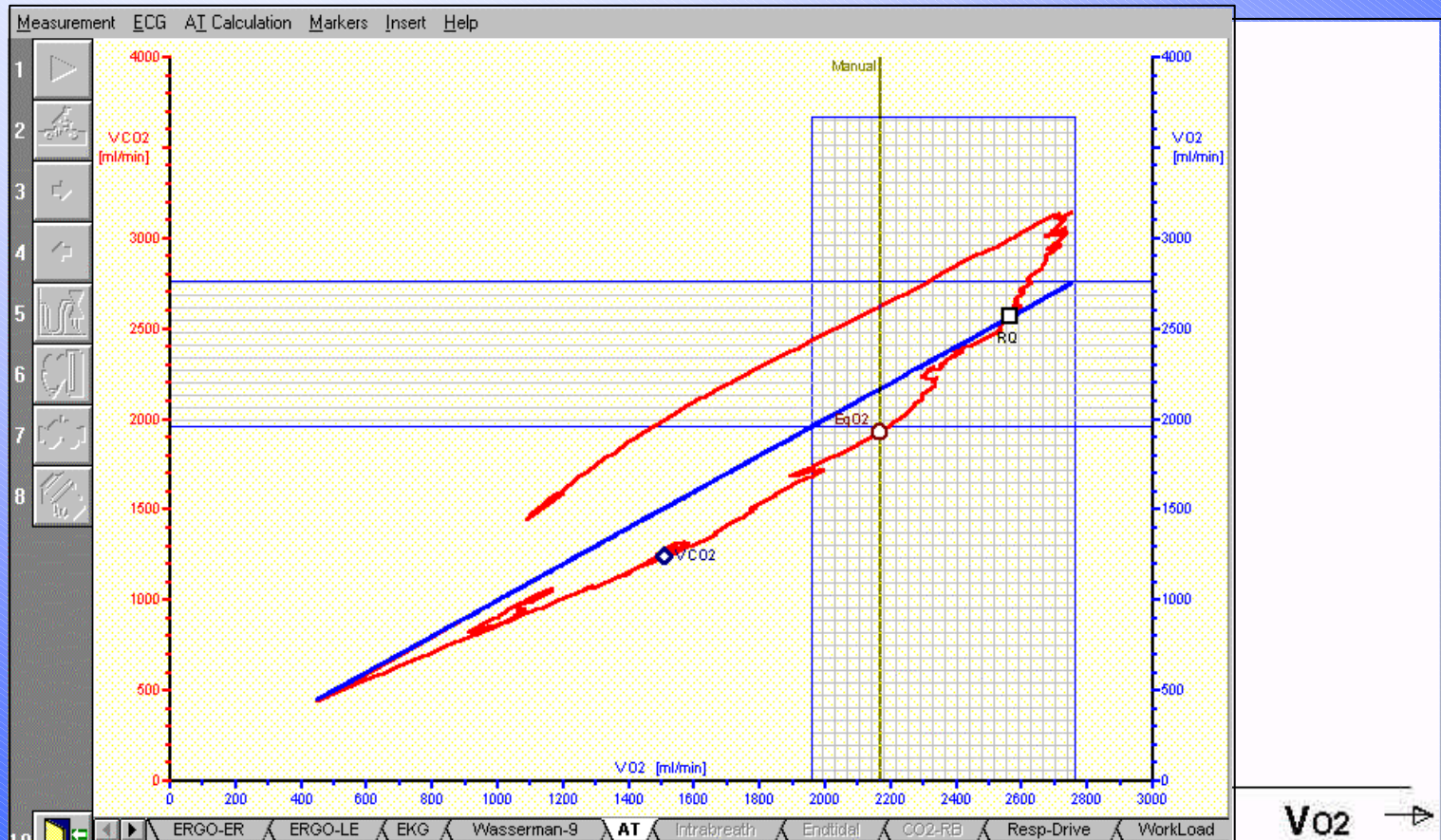
- ✘ Peak-VO₂ – VO₂ bei maximal erreichter Belastung
- ✘ VO₂max – VO₂ nicht weiter gesteigert, Plateaubildung obwohl Belastung noch ansteigen kann



VO₂max



Schwellenkonzept „respiratorisch“



$\dot{V}O_2$ →



Respiratorische Austauschrate (Respiratory exchange ratio RER)

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}$$

normale Mischverbrennung: $\sim 0,83 - 0,87$

reine Glucoseverbrennung



$$RQ = \frac{6CO_2}{6O_2} = 1,0$$

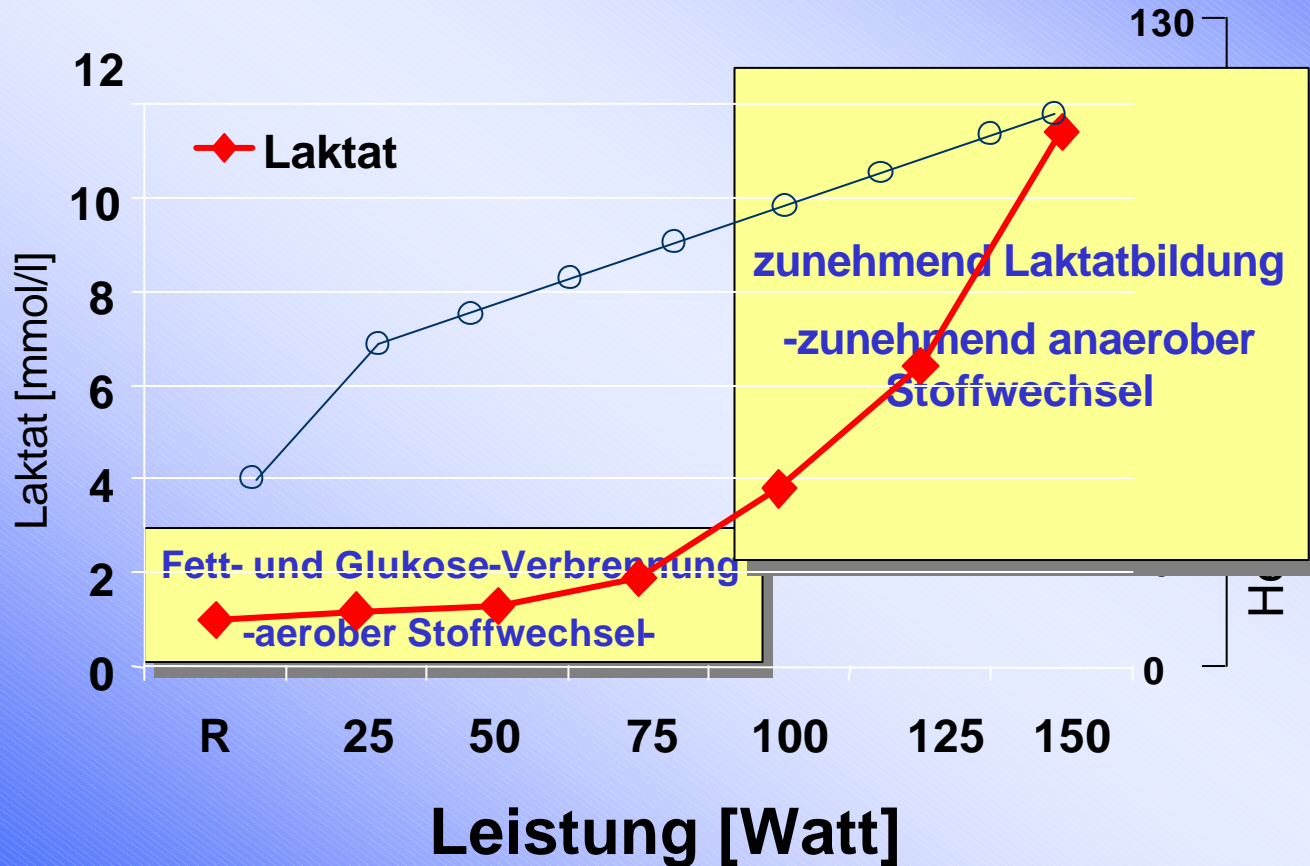
reine Fettverbrennung (Tripalmitin)



$$RQ = \frac{102 CO_2}{145 O_2} = 0,7$$

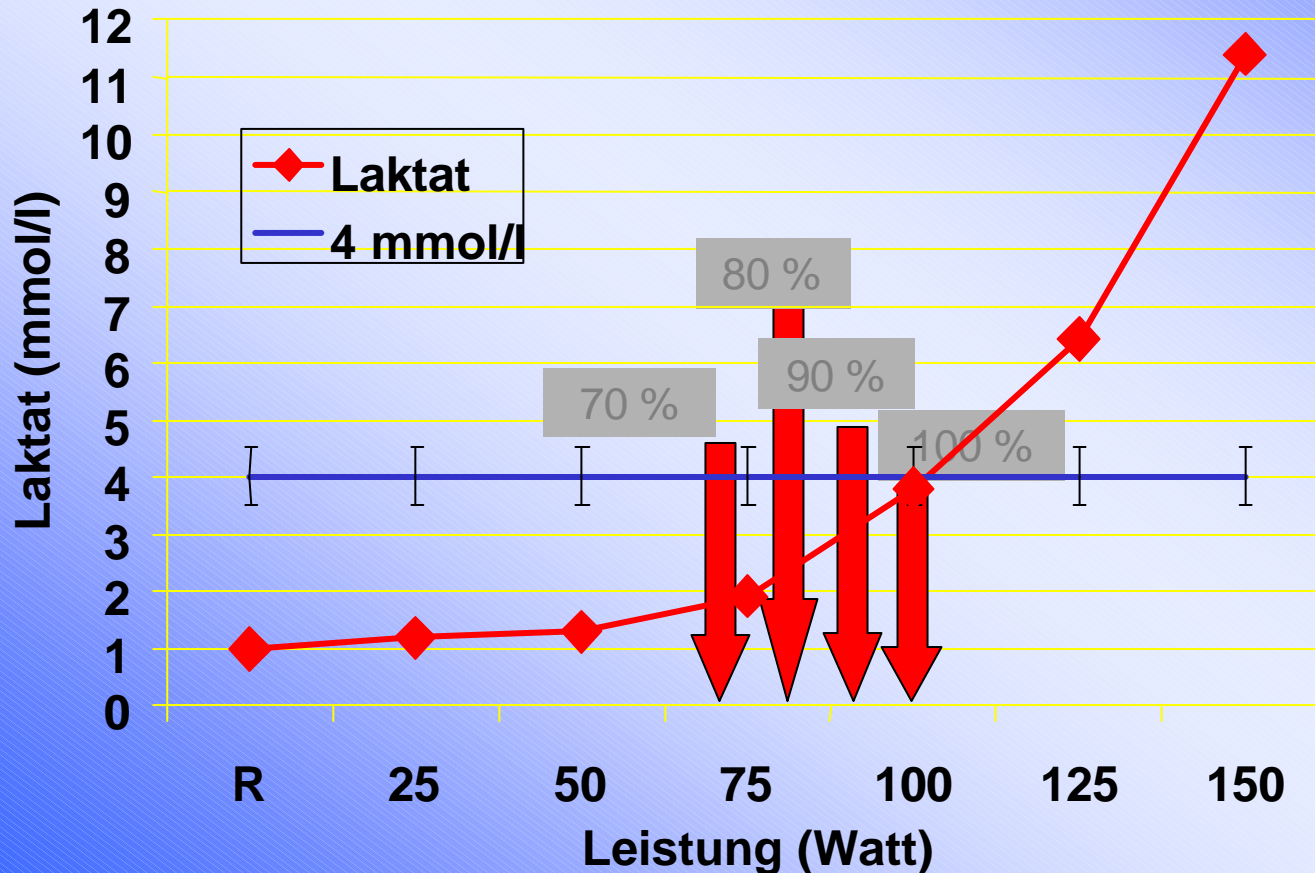


Stoffwechselanteile





Prozentuale Anteile der „Dauerleistung“ zur Einschätzung der Belastungsintensität





Kriterien - Leistungsfähigkeit

Maximal-Test

max. Belastungsstufe

max. L (Watt)
max. V (m/s)
rel. max. L (Watt/kg)

max. Sauerstoffaufnahme

max. VO₂ (ml/min)
rel. max. VO₂
(ml/min*kg)

Submaximal-Test

physical work capacity 170

PWC 170 (Watt)
rel. PWC (Watt/kg)

aerob-anaerobe Schwelle

AS (Watt)
AS (m/s)
AS (VO₂)



PWC = Physical working capacity

	Männer	Frauen
PWC ₁₃₀	1,5	1,25 Watt/kg
PWC ₁₅₀	2,0	1,6 Watt/kg
PWC ₁₇₀	2,5	2,0 Watt/kg



Kriterien der Ausbelastung

max. Herzfrequenz	Fahrrad 200 – Lebensalter (Jahre) Laufband: 210 – Lebensalter (Jahre)
max. Atemäquivalent = max. $\dot{V}_E / \text{max. } \dot{V}_{O_2}$	= 30
max. resp. Quotient = max. $\dot{V}_{CO_2} / \text{max. } \dot{V}_{O_2}$	= 1,1 (= 1,0 für Hochausdauertrainierte)
max. Laktat	= 8 (= 5 für Hochausdauertrainierte)



Beurteilung der Leistungsfähigkeit

Relative maximale Sauerstoffaufnahme
[ml/min·kg Körpergewicht]

60 - 80

Höchstleistungssportler

- Marathon
- Schwimmen
- Rudern

50 - 59

Hochleistungssportler

- Bergsteigen
- Skifahren
- Spilsportarten

40 - 49

Sportler

- Tanzen
- Wasserski



Beurteilung der Leistungsfähigkeit

Relative maximale Sauerstoffaufnahme
[ml/min·kg Körpergewicht]

16 – 20 Leichte bis mäßige Einschränkung

10 – 15 Moderate bis schwere Einschränkung

6 - 9 Schwere kardiopulmonale Erkrankung

< 6 Kritische kardiopulmonale Erkrankung

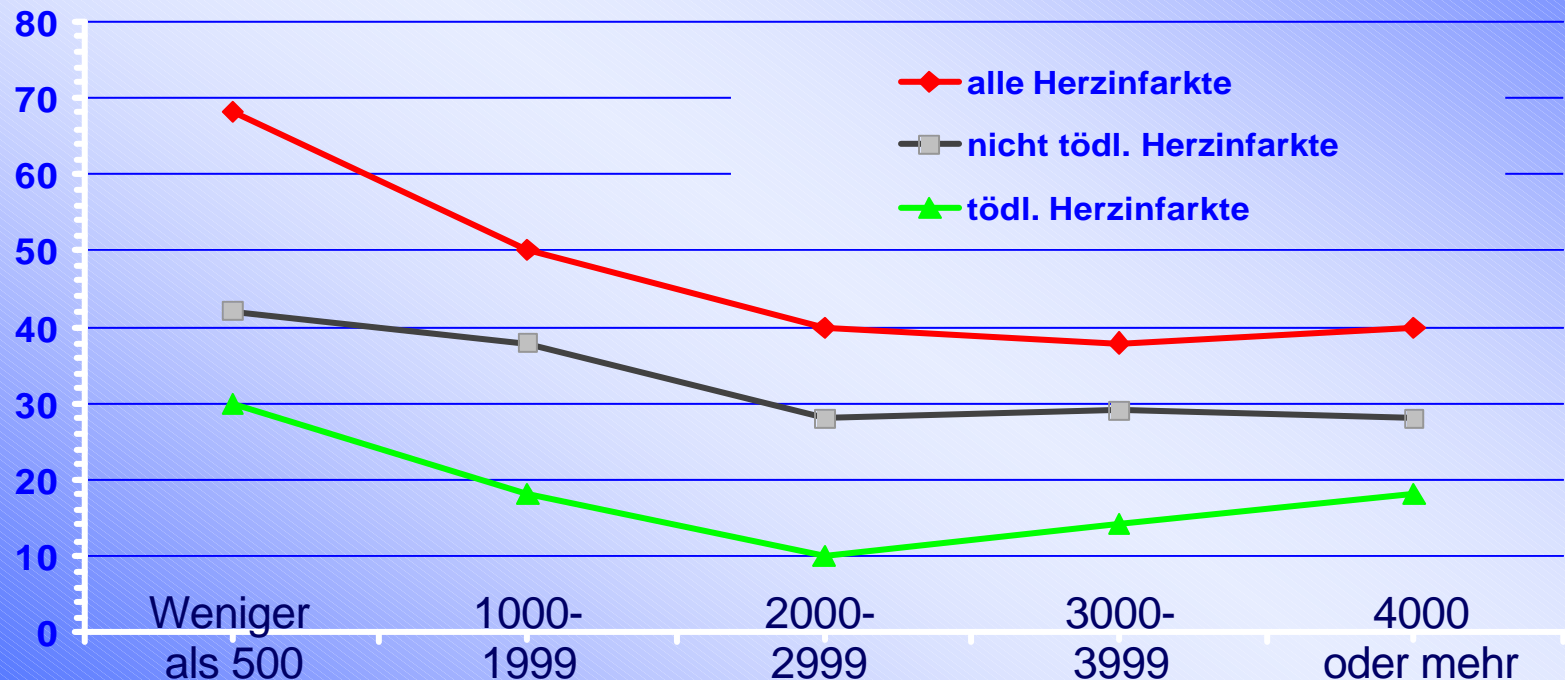


Trainingsempfehlungen



Kardiovaskuläre Ereignisse und Bewegung

Kardiovaskuläre Ereignisse pro 100 000 Personen-Jahre



Kalorien-Verbrauch pro Woche durch körperliche Aktivität



Kalorienverbrauch

Kalorienverbrauch bei sonstigen Tätigkeiten	in 15 min	in 30 min	in 45 min	in 60 min
Auto fahren	23	46	69	92
Bügeln	30	60	90	120
Fernsehen	18	36	54	72
Gartenarbeit	76	152	228	304
Gartenarbeit ohne elektrische Geräte	51	102	153	204
Heimwerken	45	90	135	180
Holz hacken	140	280	420	560
Klavierspielen	36	72	108	144
Kochen	34	68	102	136
Liegen	11	22	33	44
Putzen, Bügeln	59	118	177	236
Sex aktiv	72	144	216	288
Sex passiv	32	64	96	128
Sitzen	19	38	57	76
Spazieren gehen	54	108	162	216
Stehen	23	46	69	92
Tragen, mittleres Gewicht	92	184	276	368
Treppen steigen	104	208	312	416

Kalorienverbrauch bei sonstigen Tätigkeiten	in 15 min	in 30 min	in 45 min	in 60 min
Auto fahren	36	72	108	144
Bügeln	47	94	141	188
Fernsehen	29	58	87	116
Gartenarbeit	120	240	360	480
Gartenarbeit ohne elektrische Geräte	81	162	243	324
Heimwerken	71	142	213	284
Holz hacken	221	442	663	884
Klavierspielen	57	114	171	228
Kochen	54	108	162	216
Liegen	17	34	51	68
Putzen, Bügeln	93	186	279	372
Sex aktiv	114	228	342	456
Sex passiv	51	102	153	204
Sitzen	30	60	90	120
Spazieren gehen	86	172	258	344
Stehen	36	72	108	144
Tragen, mittleres Gewicht	145	290	435	580
Treppen steigen	164	328	492	656

60kg

95kg



METs – metabolic equivalent

- ✘ Faktor, um den die Ruhe-Sauerstoffaufnahme gesteigert wird
- ✘ Beispiel: Person walkt 30 min lang mit 4,8 km/h ($\approx 3,3$ METs) \rightarrow 99 METmin



METS

Je nach Höhe des Verbrauchs können Tätigkeiten daher eingeteilt werden in:

- leichte körperliche Aktivität = < 3 METS oder < 4 kcal/Min
- moderate körperliche Aktivität = 3-6 METS oder 4-7 kcal/Min
- intensive körperliche Aktivität = > 6 METS oder > 7 kcal/Min



Aerobe Aktivität

- ✘ 30 min moderat an 5 Tagen oder 20 min intensiv an 3 Tagen (IA) bzw. eine Kombination (IIa)
- ✘ Auch möglich → 10 min Einheiten 3x tgl. (IB)
- ✘ Liegt zwischen 450 und 750 METs / 540 – 900 Kalorien
- ✘ Intensive Aktivität → deutlicher Anstieg der Herzfrequenz / außer Atem / (schwitzen)
- ✘ Zusätzlich zu aktivem Alltag



Aktiver Lebensstil

- ☒ Jede mögliche Treppe steigen
- ☒ Schrittzähler nutzen (Ziel: 10000 Schritte/Tag → 6,4 km)
- ☒ Weiter entfernten Parkplatz vom Büro oder Geschäft suchen und zu Fuß gehen
- ☒ Eine Station früher aussteigen und gehen
- ☒ In der Mittagspause einen Spaziergang machen
- ☒ Bewegen mit Freunden oder in der Gruppe



„Krafttraining“

- ✘ Mindestens an 2 Tagen pro Woche (IIa)
- ✘ 8-10 Übungen für die großen Muskelgruppen an zwei oder mehr Tagen pro Woche (nicht aufeinanderfolgend)
- ✘ 8 – 12 Whl.



Zusätzlicher Benefit

- ⊗ Je mehr man macht – desto besser IA
- ⊗ Einhalten der Energiebilanz



„Dosierung“

- ✘ Umfänge von körperlicher Aktivität
- ✘ Intensität
- ✘ Dauer
- ✘ Häufigkeit

- ✘ Der genaue Verlauf der Dosis-Wirkungs-Beziehung ist unklar



Trainingsherzfrequenz

Trainingsherzfrequenz (für moderates Training) =

$$((HF_{\max} - HF_R) \times (40 \text{ bis } 60\%)) + HF_R$$

Faustformel:

$$HF_{\max} = 220 - LA \rightarrow \text{z.B. } 180 \text{ S/min}$$

$$HF_R = 60 \text{ S/min}$$

$$(180 - 60) \times 0,5 + 60 = 120 \text{ S/min}$$



Trainingsherzfrequenz

Trainingsherzfrequenz (für intensives Training) =

$$((HF_{\max} - HF_R) \times 85\%) + HF_R$$

Faustformel:

$$HF_{\max} = 220 - LA \rightarrow \text{z.B. } 180 \text{ S/min}$$

$$HF_R = 60 \text{ S/min}$$

$$(180 - 60) \times 0,85 + 60 = 162 \text{ S/min}$$



Karvonen-Formel 1988

$$TP = RP + (MP - RP) * TI$$

TP Trainingspuls

MP Maximalpuls (wenn nicht messbar; ca. 220-Lebensalter)

RP Ruhepuls (am besten gleich nach dem Aufwachen messen)

TI Trainingsintensität in Relation zur individuellen Leistungsfähigkeit ergibt sich wie folgt:

0,6 - 0,7 bei 45-90 Minutenlauf

0,7 - 0,8 bei 30-45 Minutenlauf

0,8 - 0,9 bei 20-30 Minutenlauf

0,9 - 1,0 bei 20-60 Sekundenlauf

$$TP = 60 + (180 - 60) * 0,8$$

$$TP = 156 \text{ S/min}$$



Borg-Skala

20
19 sehr, sehr schwer
18
17 sehr schwer
16
15 schwer
14
13 etwas stärker
12
11 leicht
10
9 sehr leicht
8
7 sehr, sehr leicht

RPE-Werte →

**Received perception
of exertion**

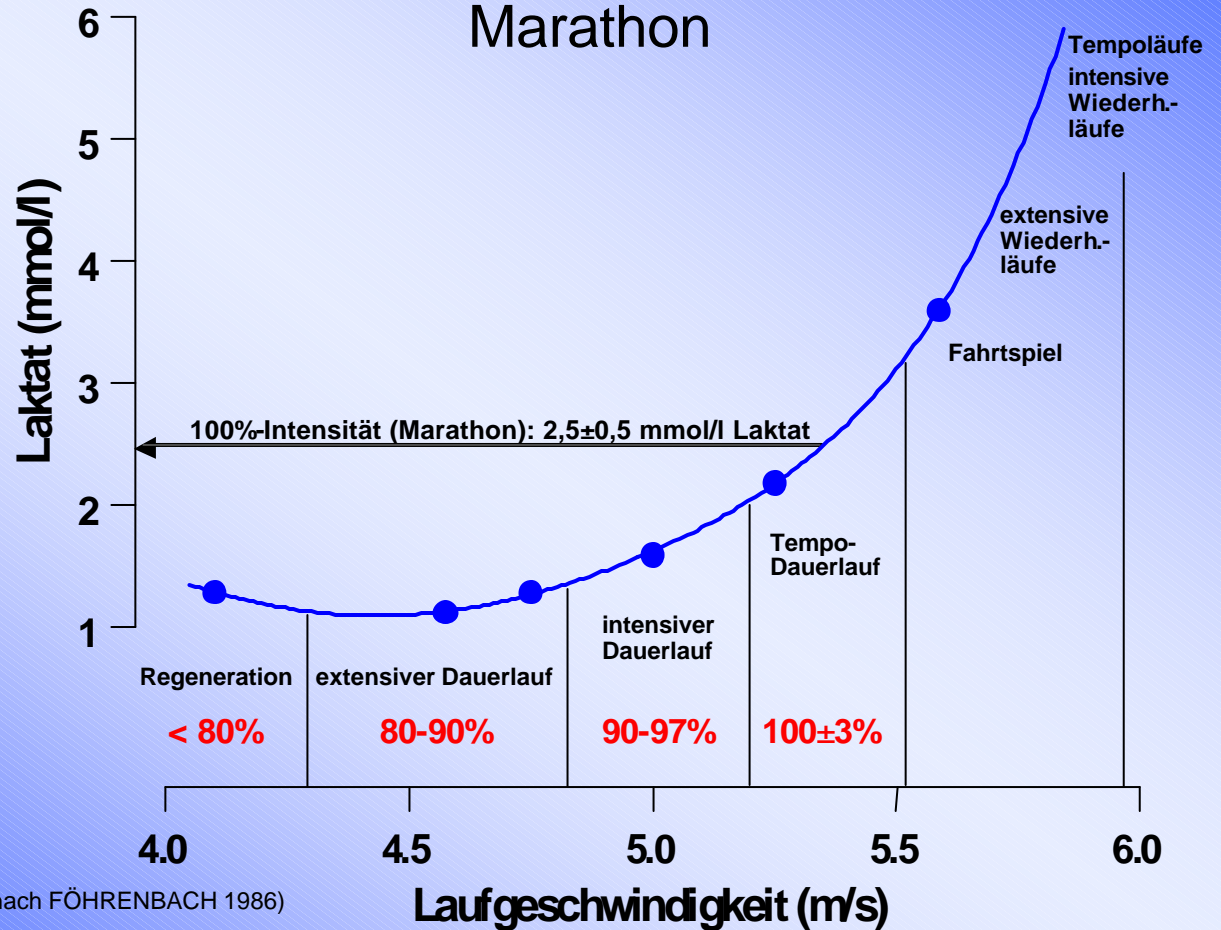


Borg - Interpretationen

- ✘ > 18 - Patient ist ausbelastet
- ✘ 15 – 16 - die aerob-anaerobe Schwelle ist überschritten
- ✘ 12 – 13 – geeignet für Trainingsempfehlungen



Trainingsempfehlung Leistungssport Marathon



(nach FÖHRENBACH 1986)

- Historische Entwicklung
- Parameter
 - metabolisch
 - respiratorisch
- Schwellenkonzeptionen
- Muskelstoffwechsel
- Leistungsfähigkeit
 - Orientierungswerte
 - Altersgang
 - „Fit – Unfit“
 - Ausbelastung
- Energieumsatz
- Trainingsempfehlungen**
- Zusammenfassung



Besonderheiten für Ältere



Physiologische Aspekte

- Abnahme der Grundschnelligkeit
- Rückgang Muskelmasse (ca. –50% zwischen 20 und 90 J.) und Kraft
- Verschlechterung der Koordination und Flexibilität
- Abnahme der Ausdauerleistungsfähigkeit (VO₂max minus 5 – 15% pro Dekade; damit verbunden Abnahme der AVDifferenz sowie des CO; ggf. geringeres SV)
- Abnahme der HF (6 bis 10 S/min pro Dekade)



Kontraindikationen

- ✘ Kein Unterschied zu Kontraindikationen bei jüngeren Personen → absolut und relativ
- ✘ Akuter Myokardinfarkt;
- ✘ Instabile AP
- ✘ Unkontrollierte Arrhythmien
- ✘ Akute Herzinsuffizienz
- ✘ „Nicht eingestellter Blutdruck“
- ✘ Kardiomyopathien etc.



Empfehlungen

- ✘ Einsatz großer Muskelgruppen → Walking, Schwimmen etc.
- ✘ Training von Flexibilität; Koordination
- ✘ Krafttraining – Whl. 10 bis 15
- ✘ Aktiver Lebensstil

- ✘ Nicht anders als bei jüngeren Personen, angepasst an den jeweiligen Zustand



Aktuelle Empfehlungen für den Herzsport



Empfehlungen – international

- (mind. 5) 7 x pro Woche 30 (- 60) min aktiv
- Steigerung der Alltagsaktivitäten
- 2 x pro Woche angepasstes Krafttraining
- Strukturierte und überwachte Trainingsprogramme für Risikopatienten



Empfehlungen - DGSP

Textkasten

Leitlinien zur Bewegung in der kardiovaskulären Sekundärprävention

Körperliche Aktivität

- mäßige Intensität, dynamische Belastung, Herzfrequenz im ischämie- und symptomfreien Bereich
- vier bis fünf Trainingseinheiten pro Woche
- 30 bis 45 min pro Trainingseinheit
- zusätzlich aktive Lebensweise



Aktuelle Empfehlungen für die COPD



Trainingsempfehlungen

- ✘ Optimal mind. 3x/Woche
- ✘ Etwa 60 bis 80% der maximalen Leistungsfähigkeit; ggf. als Intervalltraining
- ✘ Mind. 30 Minuten

- ✘ Training der unteren, aber auch oberen Extremitäten (Übungen 6 bis 12 x wiederholen)

- ✘ Training von Koordination und Flexibilität



Besonderheiten für Adipöse



Indirekte Kalorimetrie

$$EE_{\text{Stunde}} = \dot{V}_{\text{O}_2} \cdot (3,9 + 1,1 \cdot RQ) \cdot 60$$

$$\rightarrow EE_{\text{Stunde}} = \text{kcal/h}$$

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = \text{l/min}$$

$$RQ = \dot{V}_{\text{CO}_2} / \dot{V}_{\text{O}_2}$$



Erfolgreiches Gewicht halten (- 30 kg; 5,5 Jahre)

- ✘ Fettreduktion in der Ernährung
- ✘ Häufige eigenständige Gewichtskontrollen
- ✘ Selbstbeobachtung bei Nahrungsaufnahme

- ✘ **Körperliche Aktivität ! (ca. 2800 kcal/Woche Verbrauch – McGuire et al. 1998 bzw. 60 bis 90 min moderat aktiv pro Tag Haskell et al. 2007)**