

Aus der I. Medizinischen Abteilung der Allgemeinen Poliklinik der Stadt Wien (Vorstand: Doz. Dr. *H. Czitober*) und dem Österreichischen Institut für Sportmedizin (Direktor: Prof. Dr. *L. Prokop*)

Kriterien der körperlichen Leistungsfähigkeit

Limitierende Faktoren und diagnostische Kriterien des Ausdauerleistungsvermögens

Von W. Reiterer

unter Mitarbeit von *N. Bachl*

Als Supplemente werden Arbeiten angenommen, die nach den „Redaktionellen Hinweisen“ (siehe letzte Textseite der „Wiener medizinischen Wochenschrift“) nicht in den laufenden Heften der Zeitschrift erscheinen können. Für die Supplemente gelten die gleichen urheberrechtlichen Bestimmungen bzw. Abmachungen wie für die laufenden Hefte.

Redaktion und Verlag

Abkürzungen

A $\dot{A}O_2$	Atemäquivalent für Sauerstoff ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$)	PER	Ermüdungsgrad 6 bis 20 (Borg)
BE	Basenüberschußwert, meq/l	Poe	Ösophagusdruck, cm H ₂ O
BI	Broca-Index (100 × kg/[cm — 100])	PulmVR	pulmonalvaskulärer Gefäßwiderstand, Einheiten, dyn × sec × cm ⁻⁵
BP	Blutdruck in Ruhe (R), Maximalwert (max) mm Hg	PVR	peripherer Gefäßwiderstand
avDO ₂	Differenz zwischen arteriellem und gemischtvenösem Sauerstoffgehalt, Vol.‰	\dot{Q}	Herzminutenvolumen, l/min, l/min/m ² KO = Herzindex (CI)
an EN	anaerobe Energiebereitstellung, kcal, cal/kg, ‰ (des Gesamtenergiebedarfes)	RQ	respiratorischer Quotient
FAI ‰	prozentuelle Leistungseinbuße, Watt-Sollwert (44) erreicht = 100‰	an SW	anaerobe Schwelle, l/min $\dot{V}O_2$, ‰ $\dot{V}O_{2max}$, Zuordnung zur Herzfrequenz oder Watt-Stufe
fh	Herzfrequenz, beats/min	S \bar{v}	gemischtvenöse Sauerstoffsättigung, ‰
flow _{expir}	Spitzenströmung in der Ausatemphase, l/sec	SV	Schlagvolumen, ml, ml/m ² KO = Schlagvolumenindex (SVI)
fr	Atemfrequenz, Atemzüge/min	t _t	Arbeitszeit, Minuten
FVC	forcierte Vitalkapazität (kombiniert mit gleichzeitiger Darstellung von Volumen und Flow auf einem XY-Schreiber)	$\dot{V}A$	alveoläre Ventilation, l/min
METS	Vielfaches des Sauerstoff-Ruhebedarfes von 3,5 ml/kg/min	$\dot{V}A/\dot{Q}$	Ventilations-Perfusionsverhältnis
O ₂ -P	Sauerstoff-Puls, ml/beat ($\dot{V}O_2/fh$)	$\dot{V}CO_2$	Kohlensäureabgabe, l/min
pA'CO ₂ , pA'O ₂	endexpiratorische Gaskonzentrationen als Partialdruck	VD/VT	funktionaler Totraumanteil am Atemzugvolumen
PAEDP	enddiastolischer Pulmonalarteriendruck, mm Hg	$\dot{V}E$	Atemminutenvolumen, l/min
PB	Body-Kammerdruck, cm H ₂ O	$\dot{V}O_2$	Sauerstoffaufnahme, l/min, ml/kg KG/min, METS
PCP	Lungengefäß-Kapillardruck, mm Hg	Wl _{tol}	tolerierete Belastungsstufe, Watt
		Wl _{tot}	geleistete Arbeit, Watt-Minuten

Aus drucktechnischen Gründen sind zeitbezogene Dimensionen, z. B. „ $\dot{V}O_2$ “, derart „VO₂“ wiedergegeben.

Die Leistungsfähigkeit des Menschen ist bestimmt durch das Zusammenwirken verschiedener *Organsysteme* mit unterschiedlichen Funktionsreserven. Als wesentliche Komponenten für das motorische Leistungsvermögen gelten:

1. Die Koordination zwischen *Zentralnerven-* und *Muskelsystem*.
2. Das *kardio-pulmonale System* zum Transport energieliefernder Substrate und deren Abbauprodukte einschließlich der Temperaturregulation.
3. Die Beschaffenheit des *Muskels* mit seiner Fähigkeit, energiereiche Verbindungen bereitzustellen, in äußere Arbeit umzusetzen und zu resynthetisieren.

Die Funktionsbreite und das Zusammenspiel der Organsysteme bestimmen mit Körperbaumerkmalen die alters- und geschlechtsabhängige, individuelle Höchstleistung, d. h. eine normale, über- oder unterdurchschnittliche motorische Leistungsfähigkeit (Abb. 1).

Zu den *motorischen Eigenschaften* zählen die Koordination, Flexibilität¹⁾, Ausdauer, Kraft und Schnelligkeit. Dem *Ausdauerleistungsvermögen* im besonderen kommt für die Rehabilitation aus kardiologischer Sicht und für die Sport- und Arbeitsmedizin die entscheidende Bedeutung zu.

Ausdauer ist durch die Fähigkeit gekennzeichnet, ein gegebenes Belastungsniveau über einen längeren Zeitraum zu tolerieren und kann somit als „Ermüdungswiderstandsfähigkeit“ definiert werden. Für die Unterteilung in *lokale Muskelausdauer* und *allgemeine Ausdauer* — je nach Einsatz von weniger bzw. mehr als ein Siebtel bis ein Sechstel der gesamten Skelettmuskulatur — sind hierbei die Beanspruchungsformen, wie statische und dynamische Arbeit, Arbeitszeit und Belastungsintensität, und folglich die vorwiegend genutzten Energiequellen — aerobe und anaerobe Energiebereit-

¹⁾ Die willkürlich mögliche Beweglichkeit in einem oder mehreren Gelenken.

stellung — zu beachten (Tab. 1 und Abb. 2). Hinsichtlich der Tätigkeit der Muskel unterscheidet man eine *isotonische Kontraktion*, bei der die Spannung (Kraft) gleich bleibt und nur eine Längenänderung zustande kommt, von einer *isometrischen Kontraktion*, bei der die Länge des Muskels gleich bleibt und nur eine Spannungsänderung einsetzt. Bei den meisten Bewegungen läuft eine *auxotone Kontraktion* ab, die sowohl isometrische als auch isotonische Komponenten enthält. Isotonische Tätigkeit (*dynamische Arbeit*) überwiegt bei körperlicher Arbeit oder sportlicher Betätigung mit Geschwindigkeitsleistung (Sprung, Wurf und Lauf), während isometrische (*statische*) Arbeit bei Kraftübungen (Haltearbeit, Tragen von Lasten, Gewichtheben und Ringen) vorherrscht. Nach Art, Dauer und Intensität der täglichen Muskelbeanspruchung zeigt sich eine morphologisch und biochemisch differenzierbare Anpassung der Muskelfasern an die gestellten Aufgaben:

1. Die *weiße* oder *phasische* Muskelfaser ist besonders geeignet für kurze dynamische Arbeit mit großer Kraftentfaltung durch einen größeren Gehalt an Kreatinphosphat und durch eine höhere glykolytische Aktivität.
2. Die *rote* oder *tonische* Muskelfaser wird statischen Belastungsformen und einer Ausdauerbelastung besser gerecht. Der Farbton wird durch den höheren Myoglobingehalt bedingt und erklärt somit die bevorzugte oxydative Energiegewinnung durch Glukose- und Fettmetabolismus.
3. Die *Mischform* besitzt biochemische und morphologische Eigenschaften beider Hauptgruppen (2, 15, 20, 21, 22, 26, 34, 41, 55, 59).

Für den Übergang aus der Ruhe in den Zustand körperlicher Maximalleistung (*Muskelarbeit*) kann der Organismus auf um das 10- bis 20fache steigerbare Funktionsreserven zurückgreifen. In den ersten Sekunden wird die nötige Energie aus dem ATP-Speicher *Kreatinphosphat* und durch die sofort verfügbare anaerobe Energiegewinnung aus dem Abbau von Glukose zu

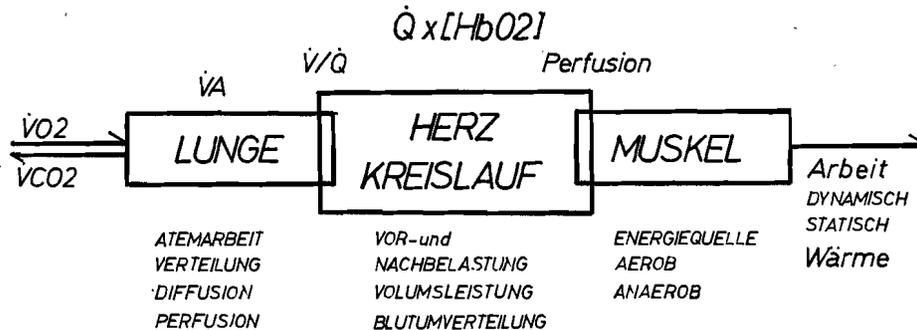


Abb. 1. Interaktion von Organsystemen während körperlicher Belastung. Transportkapazität (Conductance) für Sauerstoff ($Q \times HbO_2$) und energieliefernde Substrate sowie für die Stoffwechselprodukte Kohlensäure und Wärme (VO_2 = Sauerstoffaufnahme; VCO_2 = Kohlensäureabgabe; V_A = alveoläre Ventilation; V/Q = Ventilations-Perfusionsverhältnis; Q = Herzminutenvolumen).

Laktat gedeckt. Die Aktivität aerober Prozesse steigt nur allmählich an, um dann jedoch bis in den Bereich mittelschwerer Belastungsintensität die dominierende Energiequelle für ATP (Adenosintri-phosphat) zu sein. Durch die Spaltung der energiereichen Phosphatverbindung wird die Muskelzelle zu Kontraktion und Aktivierung zellerhaltender Vorgänge befähigt (Tab. 1 und Abb. 2). Bei einer extrem raschen Zuwachsrate der Belastungsintensität werden die anaeroben Energiereserven einzig allein die Zeitdauer der Maximalleistung bestimmen: z. B. Sprint. Über Stoffwechselforgänge während intermittierender Belastung — z. B. 30 Sekunden Arbeit, 30 Sekunden Pause — bestehen noch keine klaren Vorstellungen. Die erreichte Sauerstoffaufnahme entspricht der durchschnittlichen Leistung (average power output = APO [26, 51]).

Es überrascht zuweilen, daß Patienten mit beträchtlich eingeschränkter Leistungsbreite erhebliche körperliche Arbeit leisten können: Abladen von Lasten und handwerkliche Arbeiten. Bei Analyse des Arbeitsprozesses stellt sich heraus, daß das Arbeitspensum durch unbewußt gewählte Pausen in viele kleine Teilbelastungen aufgeteilt wird.

Um den Sauerstofftransport zur aeroben Energiegewinnung in der Muskelzelle aus der kompletten Oxydation von Kohlenhydraten und Fettsäuren zu gewährleisten, müssen Atmungs- und Herz-Kreislaufsystem lückenlos ineinandergreifen. Sobald die maximale Transportkapazität erreicht ist und der aerobe Umsatz an energiereichen Verbindungen im Muskel selbst durch die Belastungsintensität überfordert ist, muß die Produktionsrate von ATP im verstärkten Maße durch anaerobe Energiegewinnung (Glykolyse: Abbau von Glukose lediglich bis zu Pyruvat) aufrechterhalten werden. Durch den schlechten Wirkungsgrad des nichtoxydativen Substratabbaues kann die nötige Konzentration an energiereichen Verbindungen im arbeitenden Muskel nicht weiter bereitgestellt werden und die zunehmende Laktatazidose kann weder abgepuffert noch respiratorisch kompensiert werden: Die Grenze des körperlichen Leistungsvermögens ist erreicht (2, 12, 16, 25, 27, 34, 53, 59). Eine Einschränkung der Leistungsbreite wird — abgesehen von neuromuskulären Erkrankungen — auf die Funktionsstörung jener Organsysteme zurückzuführen sein, die dem Muskel „vorgeschaltet“ sind: Herz-Kreislauf und Lunge (Abb. 1). Untersuchungen unter Ruhebedingungen werden versagen, um die beeinträchtigten Funktionsreserven aufzuzeigen. Erst der Streß der körperlichen Belastung wird eine mögliche Leistungseinbuße und abnorme Reaktionen offenbaren. Durch ein breites Spektrum an Meßwerten (Tab. 2) können diese Veränderungen und Abweichungen vom Normalverhalten erkannt und exakt gemessen werden.

Mittels leistungsphysiologischer Untersuchungen (Ergometrie) kann das Phänomen *körperliche Ausdauerleistungsfähigkeit* durch drei Hauptkriterien umfassend beschrieben werden:

1. Die Sauerstoffaufnahme als Produkt der Volumsleistung des Herzens und der nutzbaren Sauerstofftransportkapazität des Blutes (*aerobic power*).
2. Die anaeroben Energiereserven im arbeitenden Muskel (*anaerobic power*) und die Höhe der anaeroben Schwelle (*anaerobic threshold*).
3. Die *metabole Belastungszidose* (Toleranz und Versuch zur akuten respiratorischen Kompensation).

Tab. 1. Verfügbare Energie und Abbauwege in der Muskelzelle.

ANAEROB	(1) $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{P} + \text{freie ENERGIE}$
	(2) $\text{Kreatinphosphat} + \text{ADP} \rightarrow \text{Kreatin} + \text{ATP}$
	(3) $\text{Glykogen oder Glucose} + \text{P} + \text{ADP} \rightarrow \text{Laktat} + \text{ATP}$
AEROB	(4) $\text{Glykogen} + \text{FFA} + \text{P} + \text{ADP} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ATP}$

Leistungsbreite, Leistungseinbuße und abnorme Reaktionen unter körperlicher Belastung können bereits durch eine gezielte *Anamnese* vom erfahrenen Untersucher abgeschätzt werden. Im Gespräch mit dem Probanden wird auf mögliche Herz-, Kreislauf- und Lungenerkrankungen eingegangen. Die Anamnese wird ergänzt durch Fragen nach Hauptsymptomen: Präkordiale Schmerzen, Arrhythmie- und Atemnotsensationen, Auswurf; Zuordnung der Beschwerden dem Grad der körperlichen Aktivität, Veränderung der Symptome unter körperlicher Belastung; Toleranz der täglichen Belastung im Beruf, im Haushalt; Vergleich mit Gleichaltrigen; Erholungsphase nach Belastung usw.

Zur genauen Einstufung der Leistungsbreite und zur Objektivierung zugrunde liegender pathophysiologischer Mechanismen bedarf es stufenweise aufwendigerer Untersuchungen. Hierzu werden *Belastungstests mit dynamischer Arbeit* (Kletterstufe, Fahrrad- und Laufbandergometer) eingesetzt, um objektive und subjektive Meßwerte zu erhalten (Tab. 2). Durch diese Belastungsformen werden die globalen Funktionsreserven der Lunge hinsichtlich des effektiven Gasaustausches (Atemarbeit in Relation zur alveolären Ventilation) und die Volumsleistung des Herzens (Pumpfunktion) geprüft. Für besondere Fragestellungen (Myokardfunktion, Blutdruckregulation) werden *statische Belastungstests* (Handgrip-Test) von Interesse sein. Bei dieser Belastungsform bewirkt die isometrische Kontraktion kleiner Muskelgruppen eine beträchtliche Druckbelastung des kardio-vaskulären Systems (1, 10, 23, 31, 32, 35, 37, 41, 42, 44, 46, 59).

Als Basisdiagnostik für klinisch-physiologische Untersuchungen wählen wir die symptomlimitierte maximale Fahrradergometrie mit stufenweise ansteigender Belastung (44). Dann folgen die rechnerunterstützte Ergospirometrie und gegebenenfalls die Bestimmung der

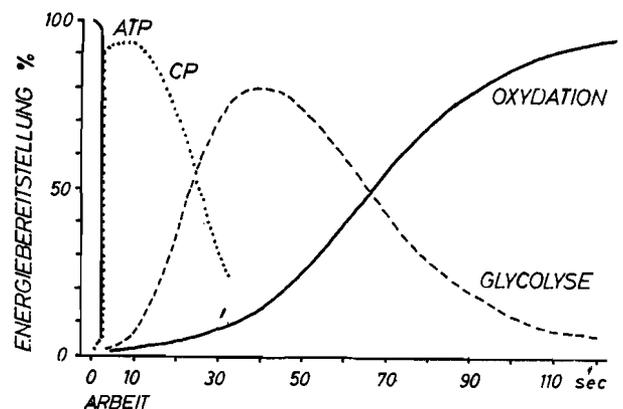


Abb. 2. Anteile energieliefernder Prozesse zu Beginn der Muskelarbeit (nach J. Keul u. Ma. [26]).

Tab. 2. Meßgrößen eines Belastungstests (modifiziert nach W. Reiterer, 1975).

OBJEKTIVE PARAMETER	SUBJEKTIVE PARAMETER
EINFACHE	
= Belastungsstufe in Relation zum Sollwert	= Ermüdungsgrad (PER)
= Herzfrequenz	= Symptome (Dyspnoe; Angina-pectoris-Score)
= EKG (Form- und Rhythmusanalyse)	= Mitarbeit, Motivation
= Blutdruck	
= Atemfrequenz	
AUFWENDIGE	
= METABOLIK	
Blutgasanalyse (pH, BE, SaO ₂) Laktat	
= RESPIRATION und GASAUSTAUSCH	
Atemzugvolumen, Atemfrequenz, Atemminutenvolumen, Flow-expir; Sauerstoffaufnahme, Kohlensäureausscheidung, respiratorischer Quotient, Atemäquivalent für Sauerstoff; endexpiratorischer (alveolärer) Sauerstoff- und Kohlensäuredruck, alveoläre Ventilation, funktioneller Totraum; Sauerstoffpuls; anaerobe Energiebereitstellung, anaerobe Schwelle.	
= ZENTRALE HÄMODYNAMIK	
Druckmessung im grossem und kleinem Kreislauf; Sauerstoffsättigung arteriell und gemischtvenös; Herzminutenvolumen, Schlagvolumen, arterio-venöse Sauerstoffsättigungsdifferenz, Kreislaufwiderstände, Arbeitsindex für den Ventrikel; Ventilations-Perfusions-Verhältnis, Re-li-Shunt	

zentralen Hämodynamik unter dynamischer und statischer Belastung (46, 47, 49). Bei besonderer Fragestellung wird die Prüfung der Lungenfunktion nötig (Respirationsvolumina, Residualvolumen, Atemwegswiderstände, Volumen-Fluß-Druck-Beziehungen, Closing Volume, Diffusionskapazität, Abschätzung einer gleichmäßigen Belüftung durch Fremdgas-Ein- und -Auswaschung, Shunt-Bestimmung, Blutgasanalyse u. a.). Für Patienten mit koronarer Herzkrankheit bringen Koronarangiographie, Ventrikulo- und Myokardszintigraphie mehr Aufschluß über pathologisch-anatomische Herzveränderungen als Ursache der beeinträchtigten Myokardfunktion.

Bevor die Hauptkriterien der körperlichen Ausdauerleistungsfähigkeit im Detail besprochen werden, wird noch ein kurzer Überblick über die diagnostischen Untersuchungstechniken Ergometrie und Ergospirometrie gegeben.

Ergometrie

Die standardisierte ergometrische Untersuchung, sei es als Fahrrad- oder Laufbandergometrie, ist das klassische Untersuchungsmodell zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Trainierten, Normalpersonen und Patienten. Der Ablauf der Untersuchung kann durch ein Flußdiagramm veranschaulicht werden (Tab. 3). Mit der Forderung nach einer klar definierten Fragestellung wird einerseits der Zuweisende zu einer sorgfältigen Indikationsstellung bemüht, andererseits kann der Untersucher besser den diagnostischen Aufwand festlegen. Der Untersuchungsplan sollte die symptomlimitierte Ausbelastung vorsehen, d. h. der Abbruch des Tests erfolgt wegen

fehlender Anpassung an die Belastungsintensität (muskuläre Ermüdung, physische Erschöpfung PER 18/19) oder wegen Alarmzeichen (Tab. 4 a bis c). Die Analyse und Interpretation der Untersuchungsdaten wird sich auf die erhobenen einfachen Meßwerte stützen (Tab. 2). Unter Beachtung des subjektiven Ermüdungsgrades (Selbsteinschätzung durch den Probanden) und der tolerierten Belastungsstufe wird eine etwaige Leistungseinbuße — „FAI %“, prozentueller Anteil der Ist-Leistung am Leistungssoll — sicher erkannt und bewertet.

Bei gewichtsabhängigen Sollwerten werden Übergewichtige „benachteiligt“. Doch nicht zu Unrecht, da die kardiopulmonalen Funktionsreserven nicht parallel gehen mit dem Überhang an Körpergewicht. Somit wird insbesondere für gewichtsabhängige Belastungen (z. B. Stiegensteigen) die verminderte Leistungsbreite sichtbar.

Der Beginn und das Ausmaß abnormer Reaktionen, wie Angina-pectoris-Beschwerden, EKG-Veränderungen, Dyspnoe, Belastungshypertonie u. a., müssen in Relation zur Belastungsintensität und tolerierten Belastung (FAI %) gesehen werden. Zum Beispiel sollte die Belastungsdyspnoe bei einer Leistungseinbuße unter 80% des Sollwertes (FAI % = 80) Anlaß zu weiterführenden Untersuchungen mit höherem Aufwand geben (Tab. 5).

Den Anforderungen nach zumutbarem Zeitaufwand und diagnostischer Aussagekraft wird die *rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie* (2-Minuten-Stufen-Test, 2-Minuten-Increment-Test [43, 44, 46]) am besten gerecht (Abb. 3).

Zu Testformen mit 4- oder 6minütiger Arbeitszeit pro Belastungsstufe (relatives Steady-State, rektangulär-

Tab. 3. Flußdiagramm eines Belastungstests (nach W. Reiterer [44]).

ZUWEISUNG zur Untersuchung nach Prüfung von VORBEFUNDEN (klinischer Status, blutchemische Befunde, EKG, Thorax-Roentgen)	
FRAGESTELLUNG	absolute KONTRAINDIKATIONEN AUSSCHLIESSEN
UNTERSUCHUNGSPLAN	maximaler symptomlimitierter Test orientierender Test (Untersuchungsaufwand)
Ausführung	
ZIELGROESSEN für gewählte Parameter	objektive und subjektive Parameter, Verhalten und Ver- änderung
ABBRUCHKRITERIEN ?	o Alarmzeichen o Zielgroessen erreicht (z.B. PER 18/19) o Fragestellung hinreichend beantwortet
Abbruch	
ANALYSE und INTERPRETATION der Untersuchungsdaten	
BEFUND DOKUMENTATION	

progressive Ergometrie) oder kontinuierlich bzw. in Minutenabständen ansteigender Belastungsintensität (trianguläre Ergometrie) bestehen entscheidende Vorteile: Der Test ist von kurzer Dauer (8 bis 14 Minuten); die Probanden erholen sich rasch, da ein Abbruch der Untersuchung durch die fehlende Anpassung an die ansteigende Belastungsintensität gegeben ist; die symptomlimitierte maximale Leistung wird klar definiert durch die tolerierte Belastungsstufe und durch die geleistete Arbeit (Watt \times min): die Zeitintervalle pro Belastungsstufe genügen, um einfache subjektive und objektive Meßwerte zu erheben und um abnorme Reaktionen und Alarmzeichen einer physischen Intoleranz zu erkennen und einzuschätzen. Durch die enge lineare Beziehung zwischen tolerierter Belastung und erreichter Sauerstoffaufnahme kann mit großer Genauigkeit auf die tatsächliche Sauerstoffaufnahme rückgeschlossen werden (Abb. 4). Der Einfluß des Körpergewichtes ist nur bei ausgeprägter Adipositas (Broca-Index über 115) zu beachten (bis zu 20% höhere VO_2 pro Belastungsstufe). Durch rechnerunterstützte Auswertung ergospirometrischer Meßwerte ergeben sich neue Gesichtspunkte zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit (siehe dort).

Durch das Untersuchungsmodell der einfachen Ergometrie ist bereits eine entscheidende Aussage über die körperliche Leistungsfähigkeit und über allfällige limitierende Faktoren möglich. Unter der Voraussetzung einer hohen Belastungsintensität — als Optimum ist die symptomlimitierte maximale Belastung anzusehen; ansonsten muß von einer orientierenden Belastung gesprochen werden, d. h. der Test wird beim Erreichen von

Tab. 4 a. Ermüdungsgrad (PER, perceived exertion rate [G. Borg]). Tab. 4 a bis c aus W. Reiterer (44).

6		14	
7	sehr sehr leicht	15	schwer
8		16	
9	sehr leicht	17	sehr schwer
10		18	
11	mässig leicht	19	sehr sehr schwer
12		20	
13	etwas schwer		

Tab. 4 b. Rate score der Angina-pectoris-Beschwerden.

0	kein Schmerz	III	leicht
I	sehr gering	IV	schwer
II	gering	V	sehr schwer

Tab. 4 c. Alarmzeichen als absolute Abbruchkriterien.

- o Rhythmus- und Leitungsstörung
- o ausgeprägte Ischämie- und Läsionszeichen im EKG
- o Blutdruckabfall, übermäßiger Blutdruckanstieg (über 250/130 mm Hg bei Patienten über 50 Jahre)
- o gleichbleibender Blutdruck mit EKG-Veränderungen und Dyspnoe
- o rasch zunehmende Intensität der präkordialen Schmerzen, des Gefühls der Atemnot und des Ermüdungsgrades (PER)
- o gestörte neuromuskuläre Koordination

IN KOMBINATION ERHOEBTE WERTIGKEIT !

Tab. 5. Beurteilung der Leistungsbreite (FAI %) bei einem Ermüdungsgrad (PER) von 17 bis 18 (nach W. Reiterer [44]).

FAI: > 105 %	sehr gut belastbar
95 - 105 %	gut belastbar
80 - 95 %	mäßig gut belastbar
70 - 80 %	vermindert belastbar
< 70 %	eingeschränkte Leistungsbreite infolge (Abbruchkriterium).

Zielgrößen, wie 75 Watt, Herzfrequenz 130, beendet — können die Fragen nach

1. einer *Leistungsminderung* (FAI % unter 80),
2. *Objektivierung von subjektiven Beschwerden* (Herzklopfen: Extrasystolie, ausgeprägte respiratorische Arrhythmie, inadäquate Ruhe- und Belastungstachykardie; Herzschmerzen: Belastungskoronarinsuffizienz; Atemnot: Globusgefühl, Hyperventilation, belastungsinduzierter Bronchospasmus),
3. *EKG-Veränderungen* (Extrasystolie, funktionelle Endteilveränderungen, Belastungskoronarinsuffizienz),
4. abnormer *Herzfrequenzregulation* (hyperkinetische Reaktion, inadäquate Ruhe- und Belastungstachykardie, bradykarder Response; verzögerter Frequenzabfall in der Erholungsphase) und
5. abnormer *Blutdruckregulation* (Belastungshypertonie, ungenügender Druckanstieg, Hypotonie in der Erholungsphase)

bereits ausreichend beantwortet werden. Die ergometrischen Befunde beim Patienten (z. B. Hypertonie, koronare Herzkrankheit, obstruktive Lungenerkrankung, hyperkinetisches Syndrom, Trainingsmangel) tragen im Verein mit Anamnese, physikalisch-klinischer Untersuchung und sonstigen Zusatzbefunden, ergänzt durch Verlaufsbeobachtung und medikamentöse Intervention, zur Einstufung des Schweregrades der Funktionsstörung bei (9, 11, 37, 44, 46).

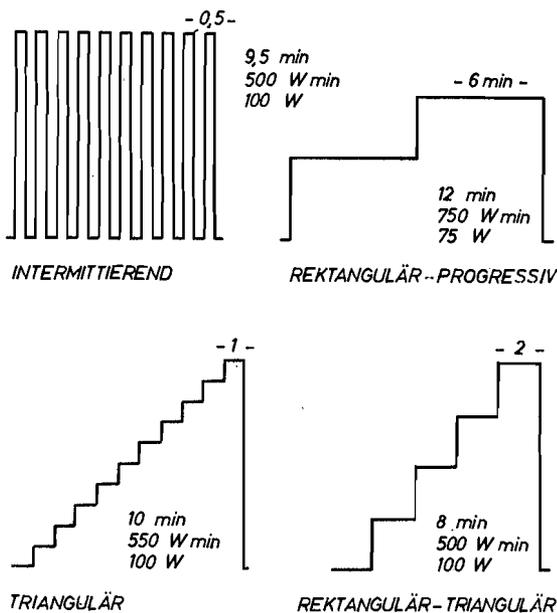


Abb. 3. Verschiedene Belastungsformen für ergometrische Untersuchungen (Fahrradergometrie). Gegenüberstellung von Arbeitszeit und geleisteter Arbeit ($W \times \text{min}$) und maximaler Belastungsstufe (Watt).

Ergospirometrie

Zur genauen Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit und der kardio-pulmonalen Funktionsreserven insbesondere bei limitierter Leistungsfähigkeit ermöglicht die rechnerunterstützte Ergospirometrie eine umfassende Diagnostik. Im Vergleich zur Ergometrie werden die einfachen, objektiven Meßwerte ergänzt durch Parameter der Metabolik, der Respiration und des Gasaustausches (Tab. 2). Die ergospirometrische Untersuchung mit Blutgasanalyse gibt als nicht invasiver Test mehr Einblick in die Funktionsreserven und Kompensationsmechanismen des kardio-pulmonalen Systems als die Summe von Einzelwerten der Herz-Lungenfunktion unter Ruhebedingungen (z. B. hämodynamische Zeitmaße, Ruhe-EKG, Thoraxröntgen, Ventrikelmechanik, Spirometrie, Bodyplethysmographie, Blutgasanalyse in Ruhe). Die Vielzahl an möglichen Meßwerten trägt dazu bei, *abnorme Reaktionen exakt zu vermessen und quantitativ zu erfassen*. Praktisch angewandt werden die Fragen nach der Arbeitsfähigkeit bei kardio-pulmonalen Erkrankungen und nach Trainingseffekten und Leistungsverbesserungen durch Maßnahmen der Rehabilitation und Pharmakotherapie objektiv beantwortet. Dies gilt vor allem auch für den Nachweis von Trainingseffekten beim Hochleistungssportler. Neben der rektangulär-triangularen Belastung kommen hier sportartspezifische Testverfahren (z. B. in wettkampfadäquater Zeit; Steady-state-Stufen zur Laktatbestimmung; Zuordnung der anaeroben Schwelle zur Laufleistung) und Untersuchungen mit an- und absteigender Belastungsintensität zur Anwendung (5—7, 32, 46).

In einem offenen System (Ergopneumotest, Fa. Jäger, Würzburg) wird die ausgeatmete Luftmenge (Mundstück- oder Maskenatmung) mittels eines Pneumotachographen aus dem Strömungs-Zeit-Integral bestimmt. Die Expirationsluft wird in einem halboffenen Mischbeutel gesammelt, woraus Gasproben fortlaufend abge-

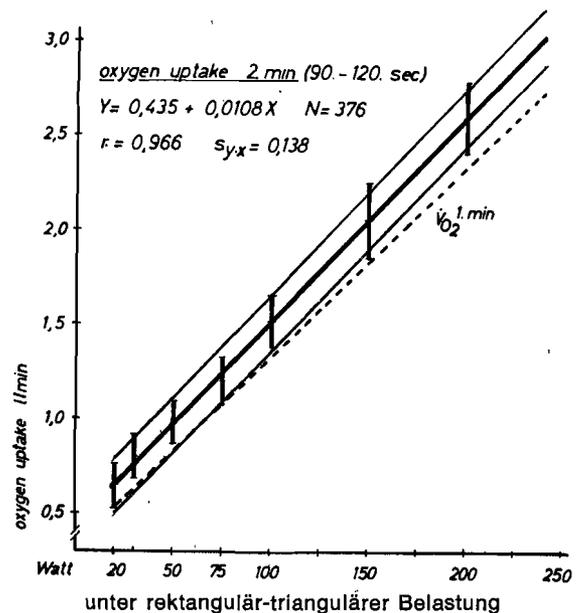


Abb. 4. Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme und Belastungsintensität (unter 75% der \dot{V}_{O_2} max) bei untrainierten normalgewichtigen (BI: 85 bis 105) Probanden im Alter zwischen 20 und 45 Jahren (aus W. Reiterer [46]).

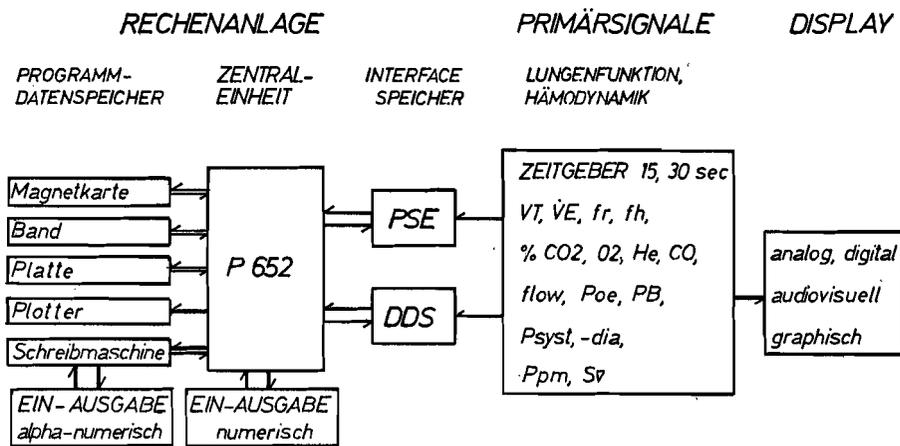


Abb. 5. Hardware-Konfiguration zur On-line-Analyse von Lungenfunktionsdaten, ergospirometrischen und hämodynamischen Meßwerten. Kardio-pulmonales Funktionslabor, Poliklinik Wien, I. Medizinische Abteilung (Fa. Jäger, Würzburg).

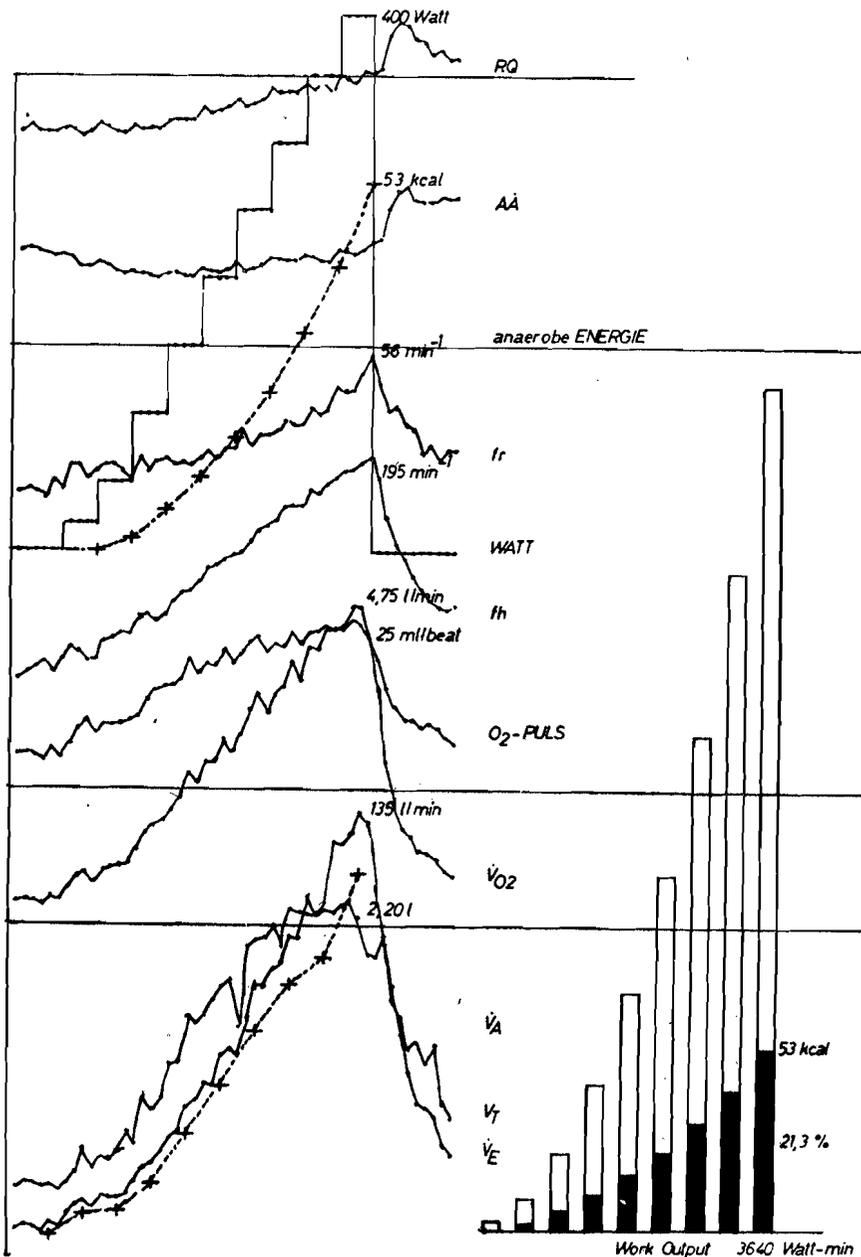
saugt werden. Aus der Gasanalyse der Ausatemluft (Differenz der Sauerstoffkonzentration zur Umgebungsluft, Kohlendioxidkonzentration), der Menge der Expirationsluft, der Herzfrequenz und der Belastungsstufe ergeben sich Primärdaten, aus denen mit Hilfe einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage (Olivetti, Jäger) in z. B. halbminütigen Intervallen abgeleitete Größen errechnet, ausgedruckt (alphanumerische Datenausgabe on-line) und sequentiell aufgezeichnet werden können (rechnergesteuertes Plotter-Diagramm on-line, off-line durch Datenspeicherung auf der Magnetplatte).

Die elektronische Ausrüstung des kardio-pulmonalen Funktionslabors der I. Medizinischen Abteilung der Allgemeinen Poliklinik Wien für die Datenverarbeitung und für die Analyse der Primärsignale (Preprocessing) ist in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Die Hardware-Konfiguration ermöglicht die On-line-Analyse von Lungenfunktionsdaten, ergospirometrischen und hämodynamischen Meßwerten (47). Durch eigene Entwicklungsarbeiten (Hardware, Software) konnte der Einsatzbereich des Prozeßrechners erweitert werden, wodurch ein Feedback-System (Ergometry-Supervising-System [46, 47]) zur Unterstützung des Untersuchungsleiters während einer aufwendigen leistungsphysiologischen Untersuchung

entstand (Tab. 6). Dieser Vorteil wird augenscheinlich, wenn es gilt, bei Risikopatienten abnorme Reaktionen als Zeichen der physischen Intoleranz der Belastungsintensität rechtzeitig zu erkennen. Die rechnerunterstützte Überwachung der ergometrischen Untersuchung besteht aus der kontinuierlichen Bewertung von einzelnen Meßwerten (Herzfrequenz fh, Atemminutenvolumen VE, Sauerstoffaufnahme VO₂, enddiastolischer Pulmonalarteriendruck PAEDP) hinsichtlich ihrer Abweichung von Soll- und Grenzwerten und aus der Berechnung abgeleiteter Größen on-line (FAI % der momentanen Belastung, Watt/kg KG; anaerobe Energiebereitstellung; alveoläre Ventilation, alveoläre [endexpiratorische] Gaskonzentrationen von O₂ und CO₂; hämodynamische Parameter, Blutgasanalyse). Auswerterroutinen nach Abschluß der ergospirometrischen Untersuchung verbessern die Befundanalyse und Interpretation durch graphische Darstellungen und ermöglichen den Zugang zu neuen Meßwerten (siehe anaerobe Schwelle). Durch Erweiterung des Untersuchungsaufwandes (blutige Druckmessung im großen und kleinen Kreislauf) werden hämodynamische Daten und abgeleitete Größen on-line dokumentiert (47, 49).

Tab. 6. EDV-Einsatz für leistungsphysiologische Untersuchungen.

- On-line Verarbeitung von Primärsignalen (Momentan-, Spitzen- und Mittelwert, zeitgetriggert Abgriff; analog-digital-Wandlung)
- Alphanumerische Datenausgabe, rechnergesteuertes Plotter-Diagramm (graphische Darstellung)
- Datenkompression und Abspeicherung zur Dokumentation und off-line Verarbeitung (Auswerterroutinen, Statistik)
- Berechnung von abgeleiteten Messgrößen on-line, off-line (anaerobe Energiebereitstellung, zentrale Hämodynamik)
- Bewertung von Daten (Abweichung vom Normalwertsbereich und vorgegebenen Grenzwerten)
- FEED-BACK-SYSTEM zur Prozessteuerung und Überwachung der Untersuchung (Lungenfunktion, Ergospirometrie, hämodynamische Untersuchung)



FS 261176

Abb. 6. Leistungsphysiologische Meßwerte bei einem Skilangläufer (ES 261176, $a = 21$, $KG = 76$ kg). Überzeichnetes Original des rechnergesteuerten Plotter-Diagramms mit sequentieller Darstellung halbminütiger Meßwerte (Zeichenerklärung siehe Text). Unter den Werten des Atemminutenvolumens (V_E) wird durch Kreuze die alveoläre Ventilation (V_A) markiert, welche durch intermittierende Analyse alveolärer Gasproben berechnet wird. Die Kreuze innerhalb der Belastungsstufen (20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 und 400 Watt à 2 Minuten) kennzeichnen den on-line errechneten Kalorienwert für die anaerobe Energie. Das Säulendiagramm zeigt kumulativ den nötigen Energiebedarf zur Arbeitsleistung, wobei die schwarzen Anteile den nicht durch aerobe Prozesse gedeckten Bedarf (= anaerobe Energiebereitstellung) illustrieren.

An Hand des Untersuchungsprotokolles eines Skilangläufers kann die Dynamik der einzelnen ergospirometrischen Meßwerte verfolgt werden (Abb. 6).

Atemminutenvolumen (V_E , l/min BTPS), Atemzugvolumen (V_T , l), Atemfrequenz (fr , min^{-1}): Bis zu mittelschwerer Belastungsintensität steigt die Atemfrequenz nur gering an, da das notwendige Atemminutenvolumen durch die vertiefte Atmung aufrechterhalten wird. Bei der Normalperson und beim Trainierten wird die Atem-

tätigkeit niemals zum leistungsbegrenzenden Faktor. Nicht der Gasaustausch, sondern die Volumsleistung des Herzens ist als limitierender Faktor für die Sauerstoffversorgung der arbeitenden Muskulatur anzusehen.

Alveoläre Ventilation (V_A), endexpiratorische (alveoläre) Gaskonzentrationen ($p\text{ACO}_2$, $p\text{AO}_2$, Torr): Intermittierend können endexpiratorische Gasproben gewonnen werden zur Berechnung der alveolären Ventilation (= effektive Atmung, CO_2 -Clearance) und des

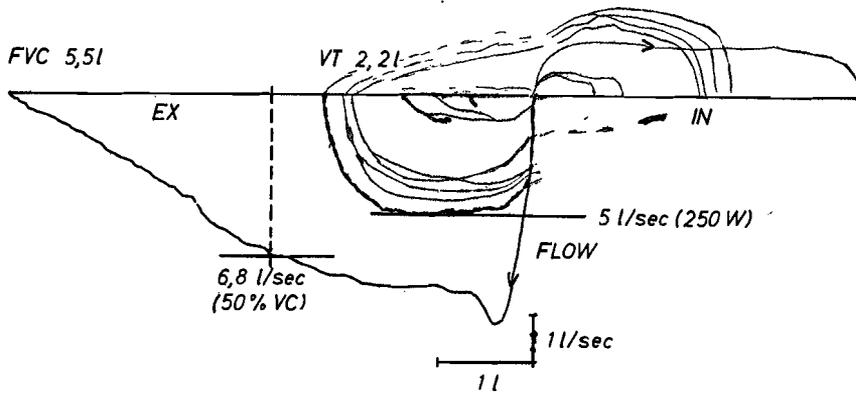


Abb. 7. Flow-Volumen-Diagramm während eines FVC-Manövers (= forcierte Vitalkapazitätsbestimmung) zur Illustrierung der Flow-Reserve unter körperlicher Belastung (250 Watt) bei einer Normalperson. Simultane Registrierung von Ausatemvolumen und Strömungsgeschwindigkeit durch einen XY-Schreiber; In- und Expiration getrennt.

funktionellen Totraumanteiles am Atemzugvolumen (VD/VT). Mit zunehmender Belastung fällt der VD/VT-Wert von 0,3 (in Ruhe) auf etwa 0,12 ab. Wegen der Hyperventilation zu Beginn der Arbeit und gegen das Belastungsende hin (respiratorische Kompensation der metabolen Azidose) zeigt die endexpiratorische O_2 -Druckkurve einen konkavbogigen Verlauf. Der endexpiratorische Kohlendruck steigt mit zunehmender Belastungsintensität, da vermehrt Kohlendioxid aus dem aeroben Abbau von Glukose und freien Fettsäuren anfällt (Abb. 8). Der simultane Vergleich mit arteriellen Gasproben (arterio-alveoläre Gasdruckdifferenz) lässt das Zusammenspiel zwischen alveolärer Ventilation und Lungenperfusion, d. h. den effektiven Gasaustausch, beurteilen (Abb. 1).

Maximale expiratorische Strömung ($flow_{\text{expir}}$, l/sec): Der beträchtliche Aufwand an Atemarbeit und somit an Sauerstoffaufnahme für die Atemmuskulatur bei hohen Atemminutenvolumina lässt sich abschätzen an der Zunahme des expiratorischen Spitzen-Flows bis auf 8,5 l/sec (in der Abbildung 6 nicht dargestellt). Der Vergleich der Flow-Volumen-Kurve unter Belastung mit den Flow-Volumen-Druck-Kurven bei forcierter Expiration (Bodyplethysmographie) lässt den leistungsbegrenzenden Faktor einer beeinträchtigten Atemmechanik (erhöhte Atemwegswiderstände, Bronchialkollaps) verständlich werden²⁾ (Abb. 7).

Sauerstoffaufnahme (VO_2 , l/min STPD), **Sauerstoffpuls** (O_2 -P, ml/beat), **Atemäquivalent** ($A\dot{A}O_2$), **respiratorischer Quotient** (RQ): Die momentane Sauerstoffaufnahme ist als Kriterium der Volumsleistung des Herzens anzusehen. Der rasche Anstieg der VO_2 als Reizantwort auf die zu tolerierende Belastungsstufe kennzeichnet das kardio-zirkulatorische Anpassungsvermögen (*Adaptation*), um die Bedürfnisse der arbeitenden Muskulatur nach aerober Energiebereitstellung zu befriedigen. Diese Anpassung vollzieht sich beim trainierten Herz mit großem Schlagvolumen rascher als bei Normalpersonen oder Patienten mit beeinträchtigter Herzfunktion (46). Bei alleiniger Betrachtung der Sauerstoffaufnahme unter Steady-state-Bedingungen geht diese Information verloren. Die Zuordnung der Sauer-

stoffaufnahme zur momentanen Belastungsstufe und zum Atemminutenvolumen führt zur Berechnung der *anaeroben Energiebereitstellung* und zur Bestimmung der *anaeroben Schwelle* (siehe S. 13). Die Abflachung der VO_2 - und O_2 -Puls-Kurven weist auf die nahende physische Leistungsgrenze hin.

Das Atemäquivalent (Quotient aus VE und VO_2) spiegelt den Ventilationsbedarf für einen effektiven Gasaustausch wider. Der Anstieg dieses Rechenwertes (in unserem Beispiel über 25) weist auf die einsetzende Hyperventilation hin, um die zunehmende metabolen Azidose durch vermehrte Abatmung der Kohlendioxid zu kompensieren.

Bei Patienten mit abnormer Verteilung der Lungenvolumina — erhöhtes Residualvolumen, Emphysem — wird das Atemzugvolumen in Anbetracht der gesteigerten funktionellen Residualkapazität nur ungenügend zur Abatmung der Kohlendioxid beitragen. Der verminderte Wirkungsgrad der Atmung — geringe CO_2 -Clearance unter Belastung — zeigt sich in einem frühzeitigen Anstieg des $A\dot{A}O_2$ auf überhöhte Werte (> 35) als Ausdruck einer kompensatorischen Hyperventilation.

Der respiratorische Quotient (VCO_2/VO_2) überschreitet den Wert von 1,0 als Hinweis für den Grenzbereich des körperlichen Leistungsvermögens um so später, je höher die anaerobe Schwelle gelegen und je größer der Anteil des Fettmetabolismus an der Energiegewinnung ist (26).

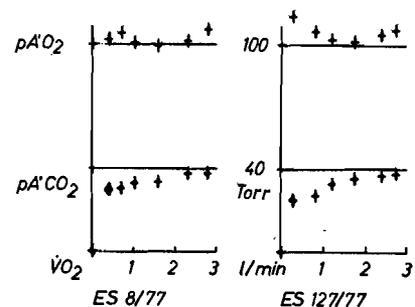


Abb. 8. Plotter-Diagramm on-line bestimmter endexpiratorischer Gaskonzentrationen von Sauerstoff und Kohlendioxid in Relation zur momentanen Sauerstoffaufnahme unter rektangulär-triangularer Fahrradergometrie bei Normalpersonen.

²⁾ „Flow-Reserve“ (Differenz zwischen Flow bei 50% der FVC und unter Belastung).

Für das Modell der stufenweise ansteigenden Belastung (rektangulär-triangular Ergometrie) wurde der Untersuchungsgang standardisiert und ergospirometrische Normalwerte erarbeitet (46). Durch diese Untersuchungsmethode werden absolute Maßzahlen als Kriterien der körperlichen Ausdauerleistungsfähigkeit der Beurteilung zugänglich: maximale Sauerstoffaufnahme, Adaptation an die Belastungsintensität, anaerobe Energiebereitstellung und anaerobe Schwelle.

Kriterien der körperlichen Ausdauerleistungsfähigkeit

Maximale Sauerstoffaufnahme, Adaptation an die ansteigende Belastungsintensität (aerobic power)

Die erreichte maximale Sauerstoffaufnahme unter körperlicher Belastung gilt als Hauptkriterium der körperlichen Leistungsfähigkeit und wird in l/min STPD, ml/kg/min und in METS angegeben³⁾. Dieser Meßwert kann als repräsentativ für die Volumsleistung des Herzens angesehen werden, denn

$$VO_2 = fh \times SV \times avDO_2$$

(SV = Schlagvolumen, $avDO_2 = CaO_2 - CvO_2$ = arterio-venöse Sauerstoffsättigungsdifferenz)

Das Schlagvolumen stellt den entscheidenden Faktor für die maximal mögliche Sauerstoffaufnahme dar, die um das Ende des 2. Lebensdezenniums erreicht wird und mit fortschreitendem Lebensalter infolge Abnahme der maximalen Herzfrequenz und auch des Schlagvolumens allmählich absinkt (Abb. 9). Neben dem Lebensalter und

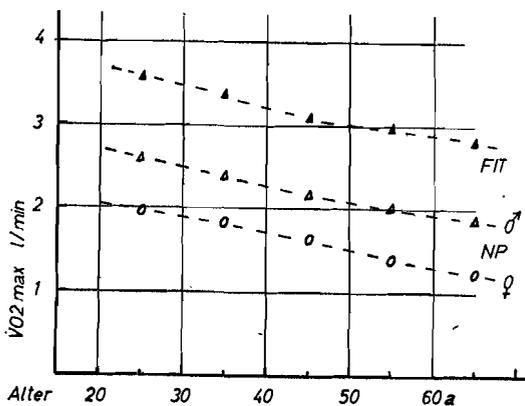


Abb. 9. Altersgang der maximalen Sauerstoffaufnahme. Durch Training wird der Abfall nicht aufgehalten, jedoch bleibt ein wesentlich höheres Niveau erhalten (modifiziert nach M. Niederberger u. Ma. [37]).

dem Geschlecht ist die körperliche Ertüchtigung die bestimmende Größe für die maximal erreichbare Sauerstoffaufnahme (obere Grenze etwa 80 bis 90 ml/kg/min, absolut gewertet über 6 l/min; eigene Beobachtung bei einem Weltklasseruderer 6,5 l/min, entsprechend 76 ml/kg/min). Ein Minimum von 15 bis 18 ml/kg/min erlaubt gerade ein von fremder Hilfe unabhängiges Dasein, d. h. um den täglichen körperlichen Belastungen gewachsen zu sein. Durch die Technik der intermittierenden Belastung — vom Patienten mit höhergradig limitierter

³⁾ METS = Ein Vielfaches des Sauerstoffbedarfes in Ruhe: 3,5 ml/kg/min, STPD = Standardbedingungen zur Berechnung der VO_2 (0° C, 760 mm Hg, trocken).

Leistungsfähigkeit unbewußt ausgeübt — können noch bemerkenswerte Leistungen vollbracht werden. Durch den Wechsel von Phasen mit zeitlich kurzem Belastungsimpuls (etwa 30 Sekunden) und gleich kurzen Ruheperioden wird der Sauerstoffbedarf nahezu auf die Hälfte der Dauerleistung vermindert (51).

Infolge der direkten Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme und Volumsleistung des Herzens liefert die Bestimmung der VO_2 über halbminütige Intervalle unter körperlicher Belastung aktuelle Informationen über die *Anpassung* des Atmung-Herz-Kreislaufsystems an die *ansteigende Belastung* bei Verwendung des Untersuchungsmodells „rektangulär-triangular Ergometrie“. Auf niedrigen Belastungsstufen mit geringem Intensitätszuwachs weicht die Sauerstoffaufnahme zur 1. Minute nur gering vom Meßwert zur 2. Minute ab (Abb. 4). Hieraus darf geschlossen werden, daß rasch ein adäquater Funktionszustand kardio-zirkulatorisch (gleichzusetzen der Volumsleistung) erreicht wird, der eine aerob orientierte Energiebereitstellung für die Muskelarbeit gewährleistet. Wir vergleichen die erreichten Werte der Sauerstoffaufnahme zur 1. und 2. Minute einer Belastungsstufe mit Normalwertsbereichen und bewerten die \pm -Abweichung als ein Vielfaches der einfachen Standardabweichung der Beziehung zwischen Belastungsintensität und Sauerstoffaufnahme (46). Als Diskriminanzfaktor für ein unterschiedliches Leistungsvermögen kommt dem Summenwert aus einzelnen Bewertungen (z. B. 25 bis 100 Watt, Tab. 9) über die Abweichung der Sauerstoffaufnahme zur 1. Minute die wesentlichste Bedeutung zu: Im Vergleich zur Normalperson steigt bei Trainierten die Sauerstoffaufnahme rascher an — die Anklingphase an eine Steady-state-Belastung ist verkürzt — und bei Patienten mit beeinträchtigter Herzfunktion finden wir eine deutliche Verzögerung (Minusabweichung) im Anstieg der Sauerstoffaufnahme. Unabhängig von unseren Untersuchungen entwickelte Auchincloss (4) ähnliche Vorstellungen. Dieses unterschiedliche Verhalten der VO_2 unter rektangulär-triangularer Fahrradergometrie verwenden wir als Kenngröße der *Adaptation* an die ansteigende Belastungsintensität (Tab. 7).

Bewertung der VO_2 max

Für wehr- und sportmedizinische Untersuchungen zur Selektion an Hand der Ausdauerleistungsfähigkeit stellt die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme eine entscheidende Methode dar. Im interindividuellen Vergleich wird der Proband mit der höheren maximalen Sauerstoffaufnahme eine gegebene Belastung besser tolerieren, da er im Hinblick auf sein maximales Leistungsvermögen weniger gefordert wird. Bei der Interpretation von Einzeldaten sind Probanden mit identischer VO_2 max (z. B. 4,5 l/min; eine bessere Vergleichsbasis für gewichtsabhängige Belastungen stellt die Angabe in ml/kg/min dar, das wären 65 ml/kg/min) noch nicht als leistungsgleichwertig anzusehen:

Unterschiede können abgeleitet werden durch Vergleich des Atemminutenvolumens zum Zeitpunkt der maximalen Sauerstoffaufnahme. Ein Proband mit 175 l/min ist gegenüber seinem VO_2 -gleichen Konkurrenten, der jedoch nur 135 l/min benötigt, als schlechter einzustufen, da ein beträchtlicher Anteil der Sauerstoffaufnahme (etwa 10 bis 15%) für die extreme Atemtätigkeit verlorengeht.

Tab. 7. Korrelationsmatrix mit Angabe von r , \bar{x} und s für hämodynamische und ergospirometrische Parameter bei 50 Watt (zentrale Hämodynamik in liegender Position, Steady-state-Bedingungen zur Berechnung abgeleiteter Größen nach dem Fickschen Prinzip — On-line-Analyse [47] —; rektangulär-triangularäre Ergometrie im Sitzen; gemischtes Krankengut mit unterschiedlicher Volumsleistung, bei 15 Probanden geringgradige Steigerung des enddiastolischen Pulmonalarteriendruckes [im Mittel auf 25 mm Hg erhöht]). Die Sauerstoffaufnahme zur 1. Minute der Belastungsstufe im Sitzen kann über die Sauerstoffaufnahme im Liegen im Steady-state zur Volumsleistung in Beziehung gesetzt werden. Hiermit eignet sich die Kenngröße der Adaptation zur qualitativen (semiquantitativen) Beschreibung der Volumsleistung (Abkürzungen siehe Verzeichnis; VO_2 lieg Δ = Abweichung des Meßwertes zur 1. Belastungsminute [VO_2 1.] vom Steady-state-Wert [SS] im Liegen).

Parameter	VO_2 lieg Δ	VO_2 SS lieg	VO_2 1. lieg	\dot{Q} lieg	SV lieg	SVI lieg	avDO ₂ -1	VO_2 1. sitz
VO_2 lieg		0,2406	-0,5435**	0,2594	-0,1285	-0,1181	-0,0941	0,1857
VO_2 SS lieg			0,68326***	0,4949**	0,0898	0,0443	0,1437	0,5360**
VO_2 1. lieg				0,2317	0,1743	0,1278	0,1968	0,3262
\dot{Q}					0,7283***	0,7500***	-0,7657***	0,1393
SV						0,9194***	-0,7617***	0,0910
SVI							-0,8172***	-0,0500
avDO ₂								0,2240
VO_2 1. sitz								
$\bar{x} \pm s$ (N=32)	0,21±0,11	1,07±0,13	0,86±0,15	11,69±2,3	112±22,4	57,4±9,9	9,38±1,5	0,94±0,13

F = 2,77 (7; 24) * 2P = 0,05 ** 2P = 0,01 *** 2P = 0,001
 2P = 0,05

Abgesehen von der Atemarbeit ergibt sich noch ein weiterer diskriminierender Faktor aus der Zeitdauer, in der die VO_2 max aufrechterhalten werden kann. Der Übergangsbereich zwischen vorwiegend aerober zu vermehrt einsetzenden anaerober Energiegewinnung (= anaerobe Schwelle; siehe dort) liegt im Hinblick auf die Sauerstoffaufnahme um so höher, je länger mit einer gegebenen VO_2 max gearbeitet werden kann (möglicher Bereich etwa 2 bis 10 Minuten). Mittels triangulärer Belastung (Abb. 3; Stufenhöhe 10 bis 25 Watt, je nach Leistungsvermögen) kann dieser Grenzbereich genau bestimmt werden, wobei eine maximale Ausbelastung durchaus nicht nötig ist bzw. bei symptomlimitierter Leistungsfähigkeit auch nicht erreicht werden kann. Die Sauerstoffaufnahme im Bereich der anaeroben Schwelle — definiert in l/min, ml/kg/min und in % der VO_2 max — stellt somit einen absoluten Parameter für das Ausdauerleistungsvermögen dar, um interindividuelle Unterschiede und Trainingseffekte darzustellen.

Auf submaximalen Belastungsstufen (definiert in Watt oder in Prozent der VO_2 max) trägt die momentane Sauerstoffaufnahme nicht zur Differenzierung hinsichtlich der körperlichen Leistungsfähigkeit bei. Unter rektangulär-triangularärer Belastung ist wohl beim Trainierten im Vergleich zur Normalperson ein rascherer Anstieg der Sauerstoffaufnahme zu beobachten — d. h. die Anklingphase an das Steady-state dieser Belastungsstufe ist kürzer —, eine deutlichere Abgrenzung von Probanden mit unterschiedlichem Leistungsvermögen gelingt jedoch erst durch Einbeziehung von Stoffwechselfparametern: Beim Trainierten setzt die metabolische Azidose später ein und der respiratorische Quotient überschreitet wesentlich verzögert die Marke 0,9.

Der Quotient Sauerstoff-Puls (O_2 -P = $VO_2 \times fh^{-1} = SV \times avDO_2$) ist ein nützlicher Index zur Beschreibung des Schlagvolumens und der arteriovenösen Sauerstoffsättigungsdifferenz (48). Ändert sich der O_2 -Puls beim Dauerleistungssportler trotz intensiven Trainings kaum und liegt der Wert im oberen Grenzbereich von 0,4 bis 0,5 ml/kg KG/beat, so ist anzunehmen, daß sich das Sauerstofftransportvermögen (Herzgröße, Schlagvolumen) nicht mehr vergrößern läßt. Eine

weitere Steigerung der Dauerleistungsfähigkeit durch Anheben der anaeroben Schwelle, durch größere Toleranz humoraler Veränderungen unter schwerer körperlicher Arbeit (metabole Azidose, Wasser- und Salzverlust; Hitzestau) und durch ökonomische Atemtechnik (großes Atemzugvolumen) ist trotzdem, wenn auch begrenzt, möglich.

Anaerobe Energiebereitstellung (anaerobic power)

Unter stufenweise ansteigender Belastung (rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie) hinkt die momentane Sauerstoffaufnahme dem pro Stufe erreichbaren Steady-state nach. Bei höherer Belastungsintensität — über der anaeroben Schwelle — kann sich ein aerobes Steady-state überhaupt nicht mehr einstellen, d. h. der nötige Energiebedarf wird durch die Intensität aerober Prozesse nur teilweise gedeckt, kann jedoch ausgeglichen werden durch die „anaerobe Energiebereitstellung“. Hierzu rechnen wir den Abbau von energiereichen Phosphatverbindungen (ATP, CP; = alaktazid) und die Spaltung von Glukose zu Pyruvat (Glykolyse; = laktazid) und Laktat sowie den Verbrauch von an Myo- und Hämoglobin gespeichertem Sauerstoff (Tab. 8).

Bereits während der ergospirometrischen Untersuchung können wir mit Hilfe einer Rechenanlage am Ende jeder Belastungsstufe einen Index für die anaerobe Energiebereitstellung berechnen und graphisch im Plotter-Diagramm der leistungsphysiologischen Meßwerte festhalten (Reiterer, 1976, definiert in kcal, cal/kg KG und in Prozent des Gesamtenergiebedarfes).

Die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme in den letzten Minuten der Ruhephase vor Belastung wird als Ruhereferenzwert für die weiteren Berechnungen gespeichert. Zu Beginn jeder Belastungsstufe wird die Belastungsgröße (Watt) über das Key-board in den Rechner eingegeben. Der Kalorienwert der gesamten Sauerstoffaufnahme während der einzelnen Belastungsphasen abzüglich des Ruhereferenzwertes stellt die „aerobe Energiebereitstellung“ dar (1 l O_2 wird 5,05 kcal gleichgesetzt, da bei rasch ansteigender Belastung nur der Glukosestoffwechsel zum Tragen kommt). Wird vom Sollenergiebedarf pro Belastungsstufe (= Watt \times min \times K1 \times K2; Faktor K1 = 0,014328 entsprechend dem kcal-Wert für 1 Watt; Faktor K2 = 4,7619 entsprechend einem angenom-

Tab. 8. Komponenten des on-line errechneten Index für anaerobe Energiebereitstellung unter stufenweise ansteigender Belastung (Reiterer, 1976).

	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50 kcal
I	II		III							
I	An Myo- und Hämoglobin gebundener Sauerstoff: ca 5 kcal									
II	Abbau von ATP und CP: ca 5 - 7,5 kcal									
III	Glykogen- und Glukoseabbau bis zur Milchsäure: ca 40 - 50 kcal (mögliche Maximalwerte beim Trainierten)									

menen Wirkungsgrad von 21%) die aerobe Energiebereitstellung abgezogen, so erhält man einen „Index für die anaerobe Energiebereitstellung“. Während der On-line-Analyse werden am Ende jeder Belastungsstufe die kumulativen Werte über den Key-board-printer ausgedruckt. Durch eine Off-line-Routine können die Energie-Compartmente als Säulendiagramm aufgezeichnet werden (Abb. 6).

Je nach Trainingszustand wurden bei Dauerleistungssportlern Werte bis zu 54 kcal (entsprechend 10,7 l Sauerstoff) gemessen; in cal/kg KG gewertet, reichen Einzelwerte bei Trainierten von 350 über 500 bis 800 cal/kg. Normalpersonen überschreiten kaum 200 bis 300 cal/kg KG. Die anaeroben Anteile am Gesamtenergiebedarf liegen zwischen 18 und 28%. Die Zunahme des aeroben Leistungsvermögens (gekennzeichnet durch eine höhere Sauerstoffaufnahme, ein größeres Herz- und Blutvolumen) führt zu einer Abnahme des Rechenwertes.

Eine große Ermüdungsausdauer der Muskulatur (Toleranz der metabolen Azidose) ist gekennzeichnet durch überaus große Kalorienwerte (z. B. 45 bis 55 kcal). Bei Patienten mit eingeschränkter myokardialer Pumpfunktion wurden bis zu 40% anaerobe Anteile bestimmt. Zwischen den Parametern der metabolen Azidose und dem On-line-Rechenwert anaerobe Energiebereitstellung besteht ein kurvilinearer Zusammenhang (siehe metabolische Azidose und [46]).

Anaerobe Schwelle (anaerobic threshold)

Unter zunehmender Belastungsintensität führt der vermehrte Einsatz anaerober energieliefernder Prozesse zur metabolen Azidose (Laktatazidose), die durch massive Hyperventilation nicht kompensiert werden kann. Der Beginn dieser Hyperventilation wird als anaerobe Schwelle bezeichnet (58).

Tab. 9. Leistungsphysiologische Meßwerte bei einem Skilangläufer (A: a = 20, KG = 71 kg; Belastungsstufen [Wl]: 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 und 400 Watt à 2 Minuten), einer untrainierten Normalperson (B: a = 52, KG = 95 kg; Wl: 20, 50, 100, 150 und 200 Watt à 2 Minuten) und einem Patienten mit koronarer Herzkrankheit, dessen Test wegen Angina-pectoris-Beschwerden abgebrochen wurde (C: a = 56, KG = 87 kg; Wl: 20, 50, 75 und 100 Watt à 2 Minuten).

PARAMETER	A	B	C	AUFWAND
Wlmax (Watt)	400	200	100	
Arbeitszeit (min)	17	10	8	ERGO-
Leistungseinbusse (FAI %)	175,4	101	56,5	METRIE
Watt x min	3240	1040	490	

VO ₂ max l/min	4,99	2,62	1,29	
ml/kg KG/min	70,3	27,6	14,9	
METS	20,1	7,9	4,2	
Adaptation (bis 100 W)				ERGO-
Σ Δ VO ₂ 1. min	1,54	0,49	-1,47	SPIRO-
aerobe power kcal	189,7	51,4	33,4	METRIE
anaerobe power kcal	31,4	19,6	11,9	
cal/kg KG	441,9	206,2	136,8	
%	14,2	27,6	35,6	
anaerobe Schwelle				
l/min VO ₂	3,9	1,9	(≈ 1,3)	
Watt	275	150	(≈ 100)	

pHmin	7,18	7,25	7,35	BLUTGAS-
BEmin	-15,9	-10,6	-4,5	ANALYSE

Zur Bestimmung dieses Meßwertes haben wir für die rechnerunterstützte Ergospirometrie ein Auswerteprogramm entwickelt: Die auf einer Magnetplatte gespeicherten Meßwertpaare von Atemminutenvolumen und Sauerstoffaufnahme werden über einen XY-Schreiber im Koordinatensystem aufgetragen. Durch die einsetzende Hyperventilation geht der lineare Zusammenhang zwischen beiden Variablen verloren. Diese Zone ist deutlich markiert und bei wiederholten Messungen außerordentlich gut reproduzierbar. Die Wahl einer triangulären Belastungsform (Stufenhöhe unter 25 Watt) verbessert die Genauigkeit der Auswertung insbesondere für sportphysiologische Untersuchungen (Abb. 10 und 11). Als weitere Hinweise für den Bereich der anaeroben Schwelle können der Anstieg des Atemäquivalentes für Sauerstoff und der Anstieg des respiratorischen Quotienten herangezogen werden.

Bei Skilangläufern haben wir diese Schwelle bei 80 bis 85% der maximalen Sauerstoffaufnahme gefunden. Dies erklärt die lange „Ermüdungswiderstandsfähigkeit“ von Spitzensportlern und unterscheidet sie hierdurch deutlich von Normalpersonen, bei denen die Schwelle je nach körperlicher Ertüchtigung zwischen 50 und 70% der VO_2 max anzusetzen ist. Bei fehlender Ausbelastung definieren wir die Schwelle in $ml\ VO_2/kg/min$ und ordnen diesem Grenzbereich die jeweilige Belastungsstufe (in Watt oder als FAI %) und Herzfrequenz zu. Letzterer Meßwert ist von praktischer Bedeutung für die Trainingsgestaltung, um auf einfache Art die nötige Belastungsintensität festzulegen, die zu einer über der anaeroben Schwelle gelegenen Herzfrequenz führt. Dieser Trainingsreiz fordert die Adaptation des kardio-pulmonalen Systems und führt letztlich zu einer Steigerung des Ausdauerleistungsvermögens. Beim Hochlei-

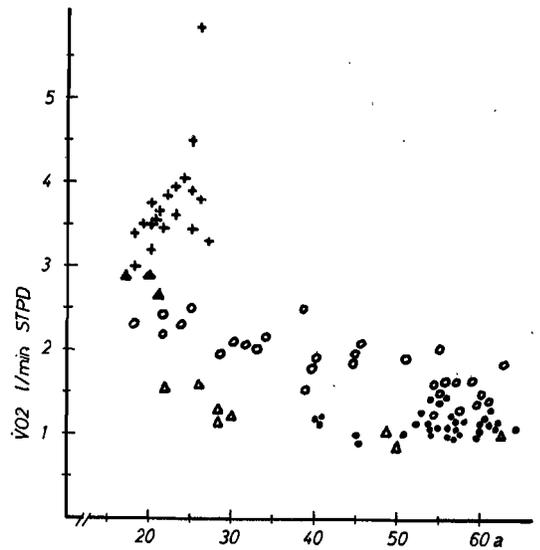


Abb. 11. Anaerobe Schwelle bei Normalpersonen, Trainierten und Patienten mit koronarer Herzkrankheit in l/min Sauerstoffaufnahme (bestimmt aus dem $VE-VO_2$ -Diagramm unter rektangulär-triangulärer Fahrradergometrie nach Reiterer). + = Skilangläufer, Maximalwert bei Weltklasseruderer, Δ = Ruderinnen, \circ = untrainierte männliche Probanden, Δ = weibliche Normalpersonen, \bullet = Patienten mit koronarer Herzkrankheit, symptomlimitiert.

stungssportler verbessert der Meßwert „anaerobe Schwelle“ die Überprüfung von Auswirkungen individueller Trainingsprogramme (Zuordnung der anaeroben Schwelle zu Laktatwerten, zur Herzfrequenz und zu sportartspezifischen physikalischen Leistungseinheiten (5, 7, 32) (Tab. 8 und Abb. 10).

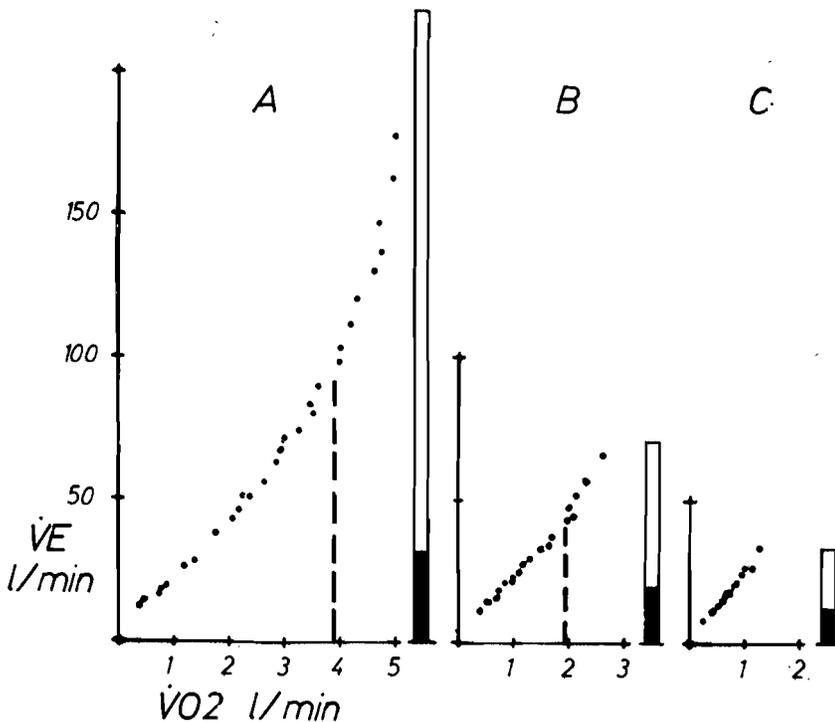


Abb. 10. Anaerobe Schwelle und Anteil der anaeroben Energiebereitstellung am Gesamtenergiebedarf (schwarzer Säulenteil). Überzeichnetes Original des rechnergesteuerten Plotter-Diagramms. Die strichlierte Linie markiert die anaerobe Schwelle in Liter VO_2 . Der Gesamtenergiebedarf für die tolerierte Belastung setzt sich aus der aerobischen und anaerobischen Leistung zusammen (Tab. 4).

Metabole Azidose

Wird der arbeitenden Muskulatur eine zunehmend höhere Leistung abverlangt, so kann der nötige Energiebedarf allein durch den oxydativen Abbau von freien Fettsäuren und von Glukose nicht gedeckt werden. Die Ursache hierfür liegt nicht in der zur Verfügung stehenden Sauerstoffkonzentration — der sogenannte kritische Sauerstoffdruck, pO_2 extrazellulär 10 mm Hg, wird nicht unterschritten —, sondern in der limitierten Enzymaktivität, wodurch Pyruvat als Endprodukt der Glykolyse nicht ausreichend in die Endoxydation eingeschleust werden kann: Die Laktatazidose setzt ein. (Pyruvat steht mit Laktat über das Laktatdehydrogenase-System in Beziehung, wobei das Gleichgewicht der Reaktion auf seiten der Laktatbildung steht.)

Zwischen dem Anstieg der Laktatkonzentration als Ausdruck der anaeroben Glykolyse und dem Abfall des pH-Wertes besteht eine hochsignifikante Beziehung ($r = -0,95$). Gleich gute Relationen bestehen zum Abfall der Standardbikarbonat-Konzentration als Maß der Alkalireserve. Der Anteil der Laktat-Pyruvat-Konzentration als Ursache der verminderten Bikarbonat-Konzentration beläuft sich auf 95%, der Rest ist dem Konzentrationsanstieg von freien Fettsäuren, Azetonazetat und Beta-Hydroxybutyrat zuzuschreiben. Die Anhäufung der sauren Stoffwechselprodukte kann durch die Puffersysteme im Blut nicht ausreichend kompensiert werden. Die massive Zunahme des Atemminutenvolumens kennzeichnet den Versuch der respiratorischen Kompensation (siehe anaerobe Schwelle) (24—28, 29, 31, 40, 56).

Aus den Primärdaten der *Blutgasanalyse* nach körperlicher Belastung (pH , pCO_2 , pO_2) sind die Kenngrößen des Säure-Basen-Haushaltes (Standardbikarbonat, Basenüberschuß) einer Berechnung (eigenes Computerprogramm) und Interpretation zugänglich. Der Grad der Ausbelastung (PER-Wert; symptomlimitierte Belastung) und die Methodik des ergometrischen Tests sind zu berücksichtigen, des weiteren der Zeitpunkt der Blutabnahme, da der Konzentrationsausgleich der sauren Stoffwechselprodukte (Laktat) zwischen Muskel und Blut nur langsam vor sich geht (2 bis 10 Minuten [51]). Die Beachtung des Sauerstoffdruckes (arterialisiertes Kapillarblut) ermöglicht zusätzlich die globale Beurteilung der Transportkapazität von Sauerstoff aus der Alveolarluft in das pulmonal-kapillare Blut: Bei Normalpersonen ist im Vergleich zum Ruhewert vor Belastung ein zwischen 5 und 10 mm Hg gelegener Anstieg des arteriellen Sauerstoffpartialdruckes zu erwarten.

Ausmaß und Toleranz der metabolen Azidose werden entscheidend vom Trainingszustand und Leistungsvermögen beeinflußt. Unter rektangulär-triangularer Belastung sind bei Trainierten und Normalpersonen (Blutabnahme in der 2. bis 3. Ruheminute nach Belastung) im Mittel pH-Werte von 7,19 bzw. 7,22 und Basenüberschußwerte von $-12,8$ bzw. $-11,7$ meq/l zu erwarten (Extremwerte bei Trainierten wurden mit $pH = 7,03$ und Basenüberschuß $= -25$ meq/l gefunden). Der Unterschied zwischen Trainierten und Normalpersonen wird erst deutlich, wenn wir die Meßwerte der metabolen Azidose mit der geleisteten Arbeit vergleichen: Trainierte 2231 Wattmin, Normalpersonen 1203 Wattmin (aus [46]). Zur Differenzierung innerhalb beider Gruppen und zur Wertung von Trainingseinflüssen beim

Leistungssportler trägt die Zuordnung der Meßwerte der metabolen Azidose (Basenüberschuß, Laktatkonzentration) zu physikalischen Leistungseinheiten (Belastungsstufe, geleistete Arbeit) und zu errechneten Parametern, wie anaerobe Energiebereitstellung und anaerobe Schwelle, entscheidend bei (*mehrdimensionale Betrachtung*). Sobald anaerobe Prozesse als Energiequelle für die Muskelarbeit nennenswert beitragen, überschreitet der Basenüberschußwert die Marke 5 meq/l und der errechnete Index für die anaerobe Energiebereitstellung 40 cal/kg KG (46).

Beim Hochleistungssportler führt zusätzliches und intensiveres Training oft nur zu einer geringen Steigerung der maximalen Sauerstoffaufnahme. Die Verbesserung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit wird sichtbar durch den Anstieg der anaeroben Schwelle mit verspätet einsetzender Ausschwemmung von Laktat und durch eine größere Toleranz der metabolen Azidose (Abb. 12).

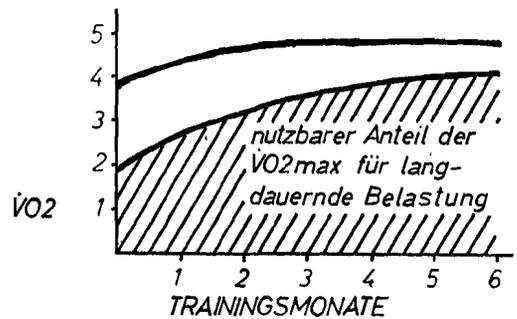


Abb. 12. Einfluß des Ausdauertrainings auf den nutzbaren Anteil der maximalen Sauerstoffaufnahme für langdauernde Belastung (modifiziert nach P. O. Astrand [2]). Dieser Grenzbereich entspricht der anaeroben Schwelle.

Schlußfolgerung

1. Die Funktionsreserven des kardio-pulmonalen Systems sind erst unter standardisierter körperlicher Belastung (*Ergometrie*) einer klinisch-physiologischen Betrachtung zugänglich. Die Auswahl von einfachen bis aufwendigeren Meßwerten führt zu einer deskriptiven und umfassenden Darstellung des Funktionszustandes der untersuchten Organsysteme. Die Beurteilung und Interpretation der Meßergebnisse muß von Daten aus mehreren Belastungsstufen ausgehen, um unter Beachtung von Referenzwerten (Normalwertsbereichen) im Hinblick auf subjektive Beschwerden abnorme Reaktionen als Ausdruck limitierender Faktoren der körperlichen Leistungsfähigkeit sicher zu erkennen.

2. Nach Überprüfung von Basisdaten, wie Anamnese, physikalisch-klinischer Untersuchungsbefund, Ruhe-EKG und Thoraxröntgen, wird sich die *Indikation* zur ergometrischen Untersuchung aus folgenden *Fragestellungen* ergeben:

- a) Screening (koronare Herzkrankheit, abnorme Blutdruckregulation, Leistungsbreite u. a.),
- b) Objektivierung von kardio-pulmonalen Beschwerden (Angina pectoris, Dyspnoe, Extrasystolie, Leistungsschwäche u. a.),
- c) Beurteilung der Leistungsbreite von Herz- und Lungenkranken (pathophysiologische Mechanismen, zumutbare berufliche Belastung),

d) Objektivierung von Interventionen (Verlaufs-kontrolle, medikamentöse Therapie, körperliches Training) und

e) Leistungsphysiologische Untersuchungen beim Trainierten.

3. Das von uns angegebene methodische Konzept der stufenweise ansteigenden Belastung (*rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie*) mit dem Ziel einer *maximalen* Ausbelastung des Probanden, beim Patienten *symptomlimitiert*, wird den genannten Fragestellungen gerecht und erlaubt ein verlässliches Urteil über das körperliche Leistungsvermögen. Diese Überlegung bleibt nicht beschränkt auf leistungsphysiologische Untersuchungen bei Normalpersonen, Trainierten und Hochleistungssportlern, sondern kann unter Beachtung der Methodik gefahrlos bei Patienten mit limitierter Leistungsfähigkeit eingesetzt werden.

4. Zur *Interpretation* ergeben sich als Basisdaten aus der ergometrischen Untersuchung *subjektive Angaben* (Ermüdungsgrad, Angina-pectoris-Rate-score, Dyspnoe-sensationen) und *einfache objektive Meßwerte* (tolerierte Belastungsstufe, Herzfrequenz- und Blutdruckregulation und EKG). Durch den Einsatz der elektronischen *Datenverarbeitung* wird die Bestimmung *aufwendiger Meßwerte* (ergospirometrische Daten, Blutgasanalyse, zentrale Hämodynamik) bereits während der Untersuchung möglich. Die kontinuierliche Bewertung der ergospirometri-schen Meßergebnisse und die Berechnung von abgeleiteten Größen mit der graphischen Darstellung sämtlicher Daten über die Dauer der Untersuchung führt zu einer quantitativen Beschreibung der körperlichen Leistungs-fähigkeit. Die Zuordnung von subjektiven Beschwerden und abnormen Reaktionen zu den jeweiligen Meßwerten läßt die zugrunde liegenden pathophysiologischen Mecha-nismen auffinden.

5. *Ergospirometrische Untersuchungen* mit Steady-state-Bedingungen (ausgenommen für hämodynamische und metabolische Untersuchungen) tragen hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme nicht zur Differenzierung von Probanden mit unterschiedlichem Leistungsvermögen bei. Die computerunterstützte Verrechnung der O₂-Aufnahme aus halbminütigen Perioden unter rektangulär-triangu-lärer Belastung führt zu neuen objektiven Meßwerten, wodurch die körperliche Leistungsfähigkeit aus klinisch-physiologischer und sportmedizinischer Sicht umfassender beschrieben werden kann:

a) *Adaptation* an eine ansteigende Belastung: Die Sauerstoffaufnahme zur 1. Minute einer Belastungsstufe kennzeichnet die Anpassung an eine ansteigende Bela-stung und ermöglicht eine qualitative Aussage über eine entsprechende Volumsleistung des Herzens. Beim Patien-ten mit beeinträchtigter Herzfunktion ist der Anstieg in der Sauerstoffaufnahme verzögert, die rascheste An-passung ist beim Trainierten zu beobachten.

b) *Anaerobe Energiebereitstellung*: Der Energie-bedarf für die Muskelarbeit wird größtenteils über die Transportkapazität des kardio-pulmonalen Systems für Sauerstoff (= aerobic power) gedeckt; nur zum geringen Teil spielen die muskeleigenen Energiereserven (anaerobe Energiebereitstellung, anaerobic power) eine Rolle. Letztere weisen einen höheren prozentuellen Anteil am Energie-Pool für die Muskelarbeit auf, sobald eine beeinträchtigte myokardiale Pumpfunktion (low output) vorliegt. Für sportphysiologische Untersuchungen können

Trainingseinflüsse auf die lokale Muskelausdauer durch den On-line-Rechenwert „anaerobe Energiebereitstel-lung“ objektiviert werden.

c) *Anaerobe Schwelle*: Die anaerobe Schwelle be-schreibt als Kenngröße der allgemeinen Ausdauerlei-stungsfähigkeit jenen Leistungsbereich (angegeben in Liter Sauerstoffaufnahme), ab dem der Energiebedarf für die Muskelarbeit nicht mehr alaktogen gewährleistet ist und somit die Laktatkonzentration zu humoralen Verände-rungen der metabolen Azidose führt. Aus sportmedizinischer Sicht gibt dieser Meßwert Auskunft über die Aus-wirkungen von Trainingsprogrammen auf den nutzbaren Anteil der maximalen Sauerstoffaufnahme für Ausdauer-belastungen.

6. Zur Beurteilung der *Atemmechanik* und *Effekti-vität der Atmung* (CO₂-Clearance) führen neben der Blutgasanalyse die Bestimmung des expiratorischen Flows und die intermittierende Analyse endexpiratori-scher Gasproben unter Belastung zur besseren Wertung limitierender Faktoren der körperlichen Leistungsfähig-keit aus pulmonologischer Sicht. Die vergleichende Zu-ordnung der gemessenen Atemströmung unter Belastung zur forcierten (FVC) Flow-Volumen-Kurve und zu bodyplethysmographischen Daten (Flow-Volumen-Al-veolardruck-Kurve) beleuchtet die mechanischen Atem-reserven, die Berechnung der alveolären Ventilation und des funktionellen Totraumanteiles des Atemzugvolumens unter Belastung läßt die Effektivität der Atmungstätig-keit sichtbar werden.

Zusammenfassung

Verlässliche Informationen über die Funktionsreser-ven des kardio-pulmonalen Systems sind nur durch ergo-metrische Untersuchungen zu erhalten. Unabdingbare Voraussetzung für die Interpretation der Meßwerte ist die genaue Kenntnis physiologischer Zusammenhänge zwischen den Organsystemen von Lunge-Herz-Kreislauf und Muskulatur.

Durch die Methodik der stufenweise ansteigenden Belastung (rektangulär-triangularäre Fahrradergometrie) werden die wichtigsten Fragestellungen einer leistungs-physiologischen Untersuchung, wie Leistungsbreite und abnorme Reaktionen, bereits mit einfacher, nicht auf-wendiger Untersuchungstechnik sicher erkannt.

Durch den Einsatz der Datenverarbeitung in der Analyse, Berechnung und graphischen Darstellung ergo-spirometrischer Meßwerte ergibt sich eine umfassende deskriptive Darstellung zur quantitativen Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit und limitierender Faktoren an Hand der Hauptkriterien aerobe (= Sauer-stoffaufnahme) und anaerobe Energiebereitstellung, anaerobe Schwelle und metabole Belastungsazidose. Die Abgrenzung der pulmonal bedingten Belastungsdyspnoe ist durch Erweiterung des Untersuchungsprogrammes mit Flow-Messung und Analyse alveolärer Gasproben sicher möglich. Für sportphysiologische Untersuchungen kann das Ausmaß der lokalen Ausdauer (anaerobe Energie-bereitstellung im Muskel) und das allgemeine Ausdauer-leistungsvermögen (anaerobe Schwelle in Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme) zahlenmäßig erfaßt werden.

Mit Unterstützung des Jubiläumsfonds der Österrei-chischen Nationalbank, Projekte Nr. 831 und 1081.

Für die apparative Ausrüstung sind wir der Fa. Jäger, Würzburg, zu Dank verpflichtet.

Abteilung, Labor

BEFUND

- O ERGOMETRIE (E)
O ERGOSPIROMETRIE (ES)
O ZENTRALE HÄMODYNAMIK (MHK)

Nr.: ____/____ Ko.: ____

Name: _____

Datum: _____

Stat.: _____

liegend O, sitzend O,
rektangulär-triangulär O, steady-state O

FRAGESTELLUNG: _____

Diagnosen: _____

Medikamente: _____ a=____ cm=____ kg=____ Hb=____

ABBRUCH DER BELASTUNG WEGEN:

muskulärer Ermüdung O, physischer Erschöpfung O, hoher Pulsfrequenz O,
hoher Blutdruckwerte O, Dyspnoe O, Angina-pectoris-Anfall O Grad ____

ab ____ Watt, PER_{max}____,

andere Gründe O:

EKG-Veränderungen O ab ____ Watt:

MESSWERTE:

EKG: Wilson O, Frank O, MC₄ O; VA O

Wl_{tol}____ Watt, ____ min, BP_R____/____ mm Hg BP_{max}____/____ mm Hg

Wl_{tot}____ Wattmin, t_t____ min f_h____ b/min f_{h_max}____ b/min

____ Watt/kg, ____ % FAI; BI: ____

MAXIMAL: $\dot{V}O_2$ ____/____ l/min; ____/____ ml/kg/min; ____/____ METS

$\dot{V}E$ ____/____ l/min; VT ____/____ l; RQ ____/____

anaerobe Energie ____/____ kcal (____/____ %); ____/____ cal/kg

anaerobe Schwelle ____/____ l/min $\dot{V}O_2$, ____/____ % $\dot{V}O_{2max}$

Flow_{expir} ____/____ l/sec; O₂-Puls ____/____ ml/beat

pH₁ ____/____, pH₂ ____/____; pO₂₁____, pO₂₂____; BE_A ____/____ meq/l

ZUSAMMENFASSUNG*

Leistungsbreite, Belastbarkeit*

Symptome*

EKG in Ruhe*

unter Belastung*

nach Belastung*

Frequenzregulation*

Blutdruckregulation*

Befunder

Befunddokumentation: Als Beispiel für die Dokumentation ergometrischer Untersuchungen zur Befundaussage ist das Formular des Kardio-pulmonalen Funktionslabors der I. Medizinischen Abteilung der Allgemeinen Poliklinik Wien angeführt. Neben den Eintragungen in die vorgedruckten Spalten ist gegebenenfalls ein Kommentar über die erhobenen Meßwerte anzuschließen mit Hinweisen für weiterführende Untersuchungen, differentialdiagnostischen Überlegungen sowie mit therapeutischen Empfehlungen.

- (1) *Arstila, M.*: Pulse-conducted triangular exercise test. *Acta med. Scand., Suppl.* 529 (1972).
- (2) *Astrand, P. O., und K. Rodahl*: Textbook of work physiology. New York 1970.
- (3) *Auchincloss, J. H., R. Gilbert und J. L. Bowman*: Response of oxygen uptake to exercise in coronary artery disease. *Chest* 65 (1974) : 500.
- (4) *Auchincloss, J. H., K. Ashutosh, S. Rana, D. Peppi, L. W. Johnson und R. Gilbert*: Effect of cardiac, pulmonary and vascular disease on one-minute oxygen uptake. *Chest* 70 (1976) : 486.
- (5) *Bachl, N.*: Ergospirometrische Längsschnittuntersuchung bei österreichischen Straßenradrennfahrern während der Vorbereitung für die Olympischen Spiele. *Österr. Journal f. Sportmedizin* 6 (1976) : 16.
- (6) *Bachl, N.*: Erfahrungen mit Laufbandergometertests im Hochleistungssport. Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft für klinische Atemphysiologie, Graz 1976.
- (7) *Bachl, N.*: Sportartspezifische Leistungsdiagnostik. Leibesübungen, Leibeserziehung 22 (1977, im Druck).
- (8) *Bishop, V. S., D. F. Peterson und L. D. Horwitz*: Factors influencing cardiac performance. In: *International Review of Physiology*. Vol. 9. Baltimore 1976.
- (9) *Borg, G.*: Physical performance and perceived exertion rate. Thesis, Lund 1962.
- (10) *Bruce, R. A.*: Exercise testing of patients with coronary heart disease. Principles and normal standards for evaluation. *Annals of Clinical Research* 3 (1971) : 323.
- (11) *Bruce, R. A., F. Kusumi und D. Hosmer*: Maximal oxygen intake and normographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *American Heart Journal* 85 (1973) : 546.
- (12) *Clement, D. L., und J. T. Shepherd*: Regulation of peripheral circulation during muscular exercise. *Progr. Cardiovasc. Dis.* 19 (1976) : 23.
- (13) *Cotes, J. E.*: Lung function. Assessment and application in medicine. Oxford 1975.
- (14) *Dempsey, J. A., J. M. Thomson, S. C. Alexander, H. V. Forster und L. W. Chosy*: Respiratory influences on acid-base status and their effects on O₂ transport during prolonged muscular work. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (15) *Di Prampero, P. E.*: Energy stores and supply in exercise. In: *Advances in exercise physiology, Medicine and Sports*. Vol. 9. Basel 1976.
- (16) *Ekelund, L. G., und A. Holmgren*: Central hemodynamics during exercise. *Circulation Research* 20 und 21, Suppl. I (1967) : 33.
- (17) *Gilbert, R., und J. H. Auchincloss*: Comparison of cardiovascular responses to steady- and unsteady-state exercise. *J. Appl. Physiol.* 30 (1971) : 388.
- (18) *Guyton, A. C., A. W. Cowley, D. B. Young, T. G. Coleman, J. E. Hall und J. W. DeClue*: Integration and control of circulatory function. In: *International Review of Physiology*. Vol. 9. Baltimore 1976.
- (19) *Harnoncourt, K.*: Leistungsbeurteilung der kardio-respiratorischen Funktion in Form eines Suchtests. *Wien. med. Wschr.* 126 (1976) : 274.
- (20) *Hollmann, W., und T. Hettinger*: Sportmedizin — Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Stuttgart 1976.
- (21) *Holloszy, J. O.*: Adaptation of muscular tissue to training. *Progr. cardiovasc. Dis.* 18 (1976) : 445.
- (22) *Howald, H.*: Ultrastructural adaptation of skeletal muscle to prolonged physical exercise. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (23) *Jones, N. L.*: Exercise testing in pulmonary evaluation: Rationale, methods and the normal respiratory response to exercise. *New England Journal of Medicine* 293 (1975) : 541.
- (24) *Keul, J., D. Keppler und E. Doll*: Beziehung zwischen Standardbicarbonat, pH-Wert und Lactat- und Pyruvatkonzentrationen im Blut während und nach körperlicher Arbeit. *Dtsch. med. Wschr.* 92 (1967) : 66.
- (25) *Keul, J.* (Hrsg.): Limiting factors of physical performance. Stuttgart 1973.
- (26) *Keul, J., E. Doll und D. Keppler*: Energy metabolism of human muscle. *Medicine and Sport*. Vol. 7. Basel 1972.
- (27) *Keul, J.*: The relationship between circulation and metabolism during exercise. *Medicine and science in sports* 5 (1973) : 209.
- (28) *Keul, J.*: Muscle metabolism during long lasting exercise. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (29) *Keyes, J. L.*: Blood-gas analysis and the assessment of acid-base status. *Heart & Lung* 5 (1976) : 247.
- (30) *Koeslag, J. H.*: Maximal heart rate and maximal oxygen consumption of long-distance runners and other athletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 16 (1976) : 17.
- (31) *Kubicek, F.*: Der Einsatz der Ergometrie in der Beurteilung der kardiovaskulären Arbeitskapazität. *Wien. klin. Wschr.* 85, Suppl. 19 (1973).
- (32) *Mader, A., H. Liesen, H. Heck, H. Philippi, R. Rost, P. Schürch und W. Hollmann*: Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin* 27 (1976) : 80.
- (33) *Matthys, H.*: Lungenfunktion als Grundlage der Diagnostik. *Praxis der Pneumologie* 29 (1975) : 71.
- (34) *McGilvery, R. W.*: The use of fuels for muscular work. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (35) *McMiken, D. F., und J. T. Daniels*: Aerobic requirement and maximum aerobic power in treadmill and track running. *Medicine and Science in Sports* 8 (1976) : 14.
- (36) *Meier-Sydow, J., U. H. Cegla und R. Dierkesmann*: Übersicht über einige neuere Begriffe der Atemmechanik. *Prax. Pneumol.* 30 (1976) : 725.
- (37) *Niederberger, M., F. Kubicek und W. Reiterer*: Leitlinien für die Ergometrie. *Acta Med. Austriaca* 2 (1975) : 33.
- (38) *Pärnat, J., A. Viru, T. Savi und A. Nurmekivi*: Indices of aerobic work capacity and cardio-vascular response during exercise in athletes specializing in different events. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 15 (1975) : 100.
- (39) *Pollock, M. L., R. L. Bohannon, K. H. Cooper, J. J. Ayres, A. Ward, S. R. White und A. C. Linnerud*: A comparative analysis of four protocols for maximal treadmill stress testing. *American Heart Journal* 92 (1976) : 39.
- (40) *Raimondi, G. A., R. J. M. Puy und M. L. Marchisio*: Validity of pCO₂ and pO₂ measurements in capillary blood during exercise. *Medicina* 34 (1974) : 229.
- (41) *Reiterer, W.*: Statische Belastung — eine Bereicherung für die erweiterte kardiologische Diagnostik? *Acta Med. Austriaca* 1 (1974) : 106.
- (42) *Reiterer, W., und H. Nissel*: Abnorme Blutdruckregulation unter statischer Belastung. *Acta Med. Austriaca* 1 (1974) : 131.
- (43) *Reiterer, W.*: Methode und Aussagekraft einer standardisierten Ergometrie. Vortrag, Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft für klinische Atemphysiologie, Graz 1973.

- (44) *Reiterer, W.*: Methodik eines rektangulär-triangularen Belastungstestes. *Herz/Kreisl.* 7 (1975) : 457.
- (45) *Reiterer, W.*: On-line-Analyse von anaerober Energiebereitstellung und Sauerstoffschuld während rektangulär-triangularer Fahrradergometrie. *Wien. klin. Wschr.* 88 (1976) : 527.
- (46) *Reiterer, W.*: Evaluation of physical performance by rectangular-triangular bicycle ergometry and computer-assisted ergospirometry. *Basic Res. Cardiol.* 71 (1976) : 482.
- (47) *Reiterer, W.*: Computer assisted evaluation of ergospirometric parameters and central hemodynamics in exercise testing. In: *Computers in Cardiology*. St. Louis 1976.
- (48) *Reiterer, W., R. Vogt und H. Czitober*: Einfluß der beta-Rezeptorenblockade auf Kriterien der körperlichen Leistungsfähigkeit, Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft für klinische Atemphysiologie, Graz 1976.
- (49) *Reiterer, W.*: Ergospirometrie und zentrale Häodynamik on-line. Arbeitstagung der Arbeitsgemeinschaft für klinische Atemphysiologie, Graz 1976.
- (50) *Roskamm, H., K. Wink, A. Lesch, J. Skinner, V. Schwendel, E. Lösel und H. Reindell*: Die Kontraktilitätsreserve des gesunden linken Ventrikels bei körperlicher Belastung. *Zeitschr. für Kreislaufforschung* 61 (1972) : 673.
- (51) *Šaltin, B., B. Essén und P. K. Pedersen*: Intermittent exercise: Its physiology and some practical applications. In: *Advances in exercise physiology, Medicine and Sport*. Vol. 9. Basel 1976.
- (52) *Scherrer, M., A. Studer und H. Bachofen*: Pulmonary gas exchange during physical exercise. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (53) *Shephard, R. J.*: Cardio-respiratory fitness — a new look at maximum oxygen intake. In: *Advances in exercise physiology, Medicine and Sport*. Vol. 9. Basel 1976.
- (54) *Smidt, U., und G. Worth*: Begutachtungsgrundlagen für die Leistungsbegrenzung von seiten der Lunge. *Pneumologie, Suppl.* (1976) : 75.
- (55) *Smith, E. E., A. C. Guyton, R. D. Manning und R. J. White*: Integrated mechanisms of cardiovascular response and control during exercise in the normal human. *Progr. Cardiovasc. Dis.* 18 (1976) : 421.
- (56) *Svarc, V., und J. Novak*: The changes of acid base balance during interval swimming training in trained and untrained men. In: *Metabolic adaptation to prolonged physical exercise*. Basel 1973.
- (57) *Tammivaara-Hilty, R.*: Physical working capacity in severe chronic obstructive lung disease. *Upsala J. Med. Sci.* 77 (1972) : 189.
- (58) *Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal und W. L. Beaver*: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Apply. Physiol.* 35 (1973) : 236.
- (59) *Wasserman, K., und B. J. Whipp*: Exercise physiology in health and disease. *American Review of Respiratory Disease* 112 (1975) : 219.

Anschrift des Verfassers: OA Dr. W. Reiterer, I. Medizinische Abteilung, Allgemeine Poliklinik, Mariannengasse 10, A-1090 Wien.