

H. Löllgen

E. Erdmann

A. Gitt (Hrsg.)

Ergometrie

Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis

3., vollständig überarbeitete Auflage

H. Löllgen
E. Erdmann
A. Gitt (Hrsg.)

Ergometrie

Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis

3., vollständig überarbeitete Auflage

Mit 111 Abbildungen und 178 Tabellen

 Springer

Prof. Dr. Herbert Löllgen, FACC, FAHA

Bermesgasse 32 b
42897 Remscheid

Prof. Dr. Erland Erdmann, FACC, FAHA, FESC

Uni Klinik Köln
Klinik für Innere Medizin III
Herzzentrum
Kerpener Straße 62
50937 Köln

Dr. Anselm K. Gitt, MD, FACC

Klinikum der Stadt Ludwigshafen
Herzzentrum
Institut für Herzinfarktforschung
Bremerstraße 79
67063 Ludwigshafen

ISBN 978-3-540-92729-7 Springer Medizin Verlag Heidelberg

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer Medizin Verlag

springer.de

© Springer Medizin Verlag Heidelberg 2010

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

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Planung: Peter Bergmann

Projektmanagement: Barbara Knüchel

Lektorat: Michaela Mallwitz, Tairnbach

Layout und Einbandgestaltung: deblik Berlin

Satz: TypoStudio Tobias Schaedla, Heidelberg

SPIN: 12194865

Gedruckt auf säurefreiem Papier

2111 – 5 4 3 2 1 0

Geleitwort

Die Charakterisierung der Belastbarkeit eines kardiovaskulär erkrankten Patienten mit Hilfe der Ergometrie ist eine der Basisuntersuchungen in der Kardiologie. Der breite Einsatz erfolgt darüber hinaus in der Pneumologie, in der Arbeitsmedizin zur Beurteilung der beruflichen Belastbarkeit sowie natürlich in der Sportmedizin. Die Tatsache, dass es sich um eine der etablierten Untersuchungsmethoden handelt, die häufig und in größter Breite in der Medizin eingesetzt wird, hat dazu geführt, dass mitunter detaillierte Kenntnisse über pathophysiologische Zusammenhänge, genaue Normalwerte und die Weiterentwicklung bestimmter Anwendungsverfahren in ihrer gesamten Breite in den Hintergrund treten. Somit werden die Möglichkeiten der Ergometrie vielfach unterschätzt und sind den Studierenden sowie den Ärzten in der Ausbildung und selbst Fachärzten oft nur unvollständig bekannt.

Das von den Herausgebern Löllgen/Erdmann/Gitt gestaltete Werk folgt der Idee, aus der Fülle von fachlichem Wissen und Informationen eine kompakte Zusammenstellung speziell für die Einarbeitung und Weiterbildung im Bereich von Belastungsuntersuchungen von Internisten, Kardiologen, Arbeitsmedizinern und Sportmedizinern zu erarbeiten. Beginnend mit physiologischen und pathophysiologischen Zusammenhängen werden verschiedene Methodiken und deren Bewertung beschrieben. Besonderer Wert wird auf pneumologische, arbeits- und sozialmedizinische Fragestellungen gelegt. Den Anspruch, detaillierte Kenntnisse über eine der wichtigsten und am breitesten anwendbaren Untersuchungsmethoden der Herz-Kreislauf-Medizin in seiner gesamten Breite, aber auch Tiefe zu vermitteln, haben die Herausgeber und die Autoren hervorragend erfüllt. Das Buch kann und soll dem Studierenden und dem Arzt in Ausbildung, aber auch all denjenigen dienen, die in ihrer täglichen Praxis diese Methode häufig anwenden.

Dem Buch ist zu wünschen, dass es dazu beiträgt, den hohen Qualitätsstandard der deutschen kardiovaskulären Medizin weiter zu fördern und als wissenschaftlich fundierter praktischer Leitfaden dieser Methode die Bedeutung zu erhalten, die es zweifelsfrei verdient.

Homburg/Saar, im Juli 2009

Michael Böhm

Präsident der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie/Herz- u. Kreislaufforschung

Vorwort zur 3. Auflage

Belastungsuntersuchungen sind unverändert wichtige diagnostische Maßnahmen in verschiedenen Fachdisziplinen. Auch im Zeitalter der viel beachteten und in der Regel teuren bildgebenden Verfahren ist die Ergometrie eine einfache und kostengünstige Untersuchungsmethode für Früherkennung, Diagnostik und Differenzialdiagnostik kardiopulmonaler Krankheiten und Funktionen.

Auch Patienten mit erheblich eingeschränkter kardialer oder pulmonaler Leistungsbreite werden heute belastet, um eine spezifische und effektive Therapie durchführen zu können. Für die Rehabilitation und Prognoseabschätzung, für gutachterliche Fragen sowie für die Indikation zur Organtransplantation ist die Ergometrie bis hin zur Spiroergometrie unentbehrlich. Wahrscheinlich ist die funktionelle Untersuchung des Herzens bei Patienten mit vermuteter Koronarischämie wichtiger als die radiologische Bildgebung mit oft unklaren Befunden. Nicht der koronare Kalknachweis entscheidet das therapeutische Procedere, sondern der Nachweis oder Ausschluss der Koronarinsuffizienz!

Bedeutsam sind selbstverständlich die leitliniengerechte Durchführung und Befundung. Nach wie vor werden die Qualitätsrichtlinien nicht ausreichend beachtet, häufiger Fehler ist eine unzureichende Ausbelastung. Auch die neuen bildgebenden Verfahren mittels Herzultraschall oder Kernspintechnik ermöglichen erst durch das Ergebnis der Belastung (Ergometrie oder Medikamente) eine weiterführende Aussage.

Die vorliegende Neuauflage berücksichtigt aktuelle Indikationen und Interpretationen unter Beachtung möglicher Fehlerquellen. Die breite Anwendung wird durch Beiträge aus den verschiedenen Fachgebieten, von der Pädiatrie über die Kardiologie bis zur Arbeitsmedizin, erläutert.

Wir danken nicht nur allen Autoren und Mitarbeitern aus den eigenen Abteilungen, sondern auch den Lektoren des Springer-Verlages, insbesondere Frau Mallwitz, für ihre hervorragende Zusammenarbeit. Wie immer sind kritische Anmerkungen und Hinweise willkommen.

Remscheid/Köln/Ludwigshafen, im Sommer 2009

Für die Autoren

Herbert Löllgen, Erland Erdmann, Anselm Gitt

Mitarbeiterverzeichnis

Bachl, Norbert, Prof. Dr. med.

Institut für Sportwissenschaften und Sportuniversität,
Institut für Sportmedizin
Auf der Schmelz 6, A-1150 Wien, Österreich

Dumitrescu, Daniel, Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internistische Intensivmedizinin), Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Erdmann, Erland, Prof. Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internistische Intensivmedizinin), Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Fahrenkrog, Ulrich, Dr. med.

Medizinische Klinik, Kardiologie, Pneumologie,
Sana-Klinikum
Burgerstr. 211, 42859 Remscheid

Franz, Ingomar-Werner, Prof. Dr. med.

Am Sägeloch 1, 79682 Todtmoos

Gerke, Roger, Dr. med.

Medizinische Klinik, Kardiologie, Pneumologie,
Sana-Klinikum
Burgerstr. 211, 42859 Remscheid

Giannitsis, Evangelos, Prof. Dr. med.

Klinik III für Innere Medizin (Kardiologie, Pneumologie,
Angiologie und internistische Intensivmedizinin)
Im Neuenheimer Feld 410, 69120 Heidelberg

Gitt, Anselm, Dr. med.

Medizinische Klinik, Kardiologie, Herzzentrum
Ludwigshafen
Bremserstr. 79, 67117 Ludwigshafen

Graf, Christine, Priv.-Doz. Dr. med. Dr. rer. nat.

Institut für Motorik und Bewegungstechnik,
Deutsche Sporthochschule Köln
Am Sportpark Müngersdorf 6, 50933 Köln

Hebestreit, Helge, Prof. Dr. med.

Kinderklinik der Universität Würzburg
Josef-Schneider-Str. 2, 97080 Würzburg

Hoppe, Uta C., Prof. Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internistische Intensivmedizinin), Universitätsklinik Köln
Kerpener Str. 62, 50937 Köln

Kelle, Sebastian, Dr. med.

Johns Hopkins University Medical School,
Department of Radiology, MRI Research
600 N. Wolfe Street Park Bldg., Room 334, MD 21287
Baltimore, USA

Kinzlbauer, Markus, Mag.

Institut Sportwissenschaften und Sportuniversität
Auf der Schmelz 6, A-1150 Wien, Österreich

Löllgen, Herbert, Prof. em. Dr. med.

Medizinische Klinik, Kardiologie, Pneumologie,
Sana-Klinikum
Bermesgasse 32, 42897 Remscheid

Löllgen, Deborah, Dr. rer. medic., Dipl.-Sportwiss.

Hellerstr. 45, 73728 Esslingen
Universitätsklinikum C.G. Carus
Klinik für Psychotherapie und Psychosomatik
01307 Dresden und
Biocomfort Diagnostics, Neuhausen a.d.F.

Michels, Guido, Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internistische Intensivmedizinin), Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Nagel, Eike, Prof. Dr. med.

Clinic Cardiovascular Imaging, King's College London,
Div. of Imaging Sciences, The Rayne Institute,
St. Thomas Hospital
4th Floor Lambeth Wing, SE1 7EH, London, UK

Preedel, H.-G., Prof. Dr. med.

Institut für Sportmedizin,
Deutsche Sporthochschule Köln
Carl-Diem-Weg 6, 50933 Köln

Rösler, Joachim, Prof. Dr. med.

FA Arbeitsmedizin, Sozialmedizin,
Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Rosenkranz, Stephan, PD Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internisti-
sche Intensivmedizin), Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Schmidt-Trucksäss, Arno, Prof. Dr. med. MA

Institut für Sport und Sportwissenschaften,
Medizinische Fakultät, Universität Basel
Brüglingen 33, CH-4052 Basel, Schweiz

Schneider, Christian, PD Dr. med.

Herzzentrum, Klinik III für Innere Medizin
(Kardiologie, Pneumologie, Angiologie und internisti-
sche Intensivmedizin), Universitätsklinik Köln
Kerpenerstr. 62, 50937 Köln

Schwarz, Stefan, Dr. med.

Asklepios-Klinik Hamburg-Harburg
Eißendorfer Pferdeweg 52, 21075 Hamburg

Steinacker, Jürgen M., Prof. Dr. med.

Medizinische Klinik, Sektion Sport- und
Rehabilitationsmedizin, Universität Ulm
Steinhövelstr. 9, 89070 Ulm

Steinberg, Thomas, Dr. med.

Medizinische Klinik, Kardiologie, Pneumologie,
Sana-Klinikum
Burgerstr. 211, 42859 Remscheid

Stierle, Ulrich, Prof. Dr. med.

Klinik für Herzchirurgie des Universitätsklinikums
Lübeck, Campus Lübeck
Ratzeburger Allee 160 23538 Lübeck

Tschan, Harald, Dr. med.

Institut für Sportwissenschaften und Sportuniversität
Auf der Schmelz 6, A-1150 Wien, Österreich

Völker, Klaus, Prof. Dr. med.

Institut für Sportmedizin, Universität Münster
Horstmarer Landweg 39, 48149 Münster

Abkürzungsverzeichnis

6-MWT	»6-minutes walk test« (6-min-Gehtest)	C.I.	Herzindex (»cardiac index«)
aADCO₂	aveolar-arterielle CO ₂ -Druckdifferenz	CCS	Canadian Cardiovascular Society
AaDO₂	arteriell-alveolare O ₂ -Druckdifferenz	CFR	koronare Flussreserve
ABC-Maßnahmen	Reihenfolge der Maßnahmen bei Reanimation	CI	chronotrope Inkompetenz oder Konfidenzintervall (je nach Zusammenhang)
ABDM	ambulantes Blutdruck-Monitoring	CMR	kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie
ABI	Knöchel-Arm-Index (»ankle brachial index«)	CO	Herzzeitvolumen (»cardiac output«) oder Kohlenmonoxid (je nach Zusammenhang)
ACVB	aortokoronare Venen-Bypass-Operation (»coronary artery bypass graft«, CABG)	CO-Hb	Carboxy-Hämoglobin
ADH	antidiuretisches Hormon	COPD	chronisch obstruktive Lungenkrankheit (»chronic obstructive pulmonary disease«)
ADL	»activities of daily living«	CPX	Herz-Lungen-Belastungstest (»cardio-pulmonary exercise testing«)
ADP	Adenosindiphosphat	CRP	C-reaktives Protein
AF	Atemfrequenz	CTEPH	chronisch thromboembolische pulmonale Hypertonie
AGW	Atemgrenzwert	C_vO₂	gemischtvenöser CO ₂ -Gehalt
AHA	American Heart Association	CVI	chronisch ventilatorische Insuffizienz
AICD	automatischer Kardioverterdefibrillator	cw	kontinuierlicher Doppler (»continous wave«)
AMP	Adenosinmonophosphat	ΔavDO₂	arteriovenöse O ₂ -Druckdifferenz
ANF	atrialer natriuretischer Faktor	DASI	»Duke Activity Status Index«
ANP	atriales natriuretisches Peptid	DKG	Deutsche Gesellschaft für Kardiologie
AÖF	Aortenklappenöffnungsfläche	DLCO	Diffusionskapazität der Lunge für Kohlenmonoxid
AP	Angina pectoris	DSMR	Dobutaminstress-Magnetresonanztomographie
AR	Atemreserve	EBM	evidenzbasierte Medizin
ARI	»absolute risk increase« (absolute Risikozunahme)	EDVI	enddiastolischer Volumenindex
ARR	absolute Risikoreduktion	EELV	endexpiratorisches Lungenvolumen
ARVD	arrhythmogene rechtsventrikuläre Kardiomyopathie	EF	Ejektionsfraktion
AS	aerob-anaerobe Schwelle	EIA	belastungsinduziertes Asthma (»exercise induced asthma«)
ASD	Vorhofseptumdefekt	EKG	Elektrokardiogramm
AT	»anaerobic threshold« (anaerobe Schwelle)	EMG	Elektromyographie
ATS	American Thoracic Society	ERO	»effective regurgitant orifice« (Regurgitationsöffnung)
AVK	arterielle Verschlusskrankheit	ES	Extrasystole
AZK	Atemzugskurve	ESVI	endsystolischer Volumenindex
BAL	bronchoalveoläre Lavage		
BE	Basenüberschuss (»base excess«)		
BGA	Blutgasanalyse		
BK	Berufskrankheit		
BMI	Body Mass Index [kg/m ²]		
BNP	»B-type natriuretic peptide«		
BP	»blood pressure«		
BRR oder BR	Atemreserve (»breathing reserve«)		
BTPS	(»body temperature pressure, saturated«)		

EXA	extensives Ausdauertraining	LGE	»late gadolinium enhancement«
f	Symbol für Frequenz	LR	»likelihood ratio«
FEV₁	Atemstoßwert	LSB	Linksschenkelblock
FEV₁/VC	Atemstoßwert in % der Vitalkapazität	LTP	»lactate turn point«
FFR	fraktionierte Flussfraktion	LV	linker Ventrikel
F_iO₂	inspiratorische Sauerstoffkonzentration	LVEDD	linksventrikulärer enddiastolischer Durchmesser
FT-I-Fasern	Fast-twitch-Fasern	LVEDP	linksventrikulärer enddiastolischer Druck (»left ventricle enddiastolic pressure«)
FKV	Fluss-Volumen-Kurve	LVEF	linksventrikuläre Ejektionsfraktion
G	Gewicht	LVESD	linksventrikulärer endsystolischer Durchmesser
GBD	Gelegenheitsblutdruck	LVH	linksventrikuläre Hypertrophie
GLP	gute Laborpraxis	maxLass	maximales Laktat-Steady state
GPS	»global positioning system«	MCT	Monocarboxylat-Transportprotein
HF/ṠO₂	Herzfrequenz-Sauerstoffaufnahme-Relation	MET	metabolisches Äquivalent (Pl. METS)
HF	Herzfrequenz	MIBI	Methoxyisobutyl-Isonitrit
HFR	Herzfrequenzreserve	MÖF	Mitralklappenöffnungsfläche
HK	Herzkatheter	MuGA	»multiple gated acquisition«
HMV	Herzminutenvolumen	MVC	maximal mögliche Kontraktion (»maximal voluntary contraction«)
HNCM	hypertrophe Kardiomyopathie, nichtobstruktive Form	MVD	Mehrgefäßerkrankung
HR	Herzfrequenz (»heart rate«) oder »hazard ratio« (je nach Zusammenhang)	MṠO₂	myokardialer Sauerstoffbedarf
HRV	»heart rate variability« (Herzfrequenzvariabilität)	MVV	maximale voluntäre Ventilation (»maximal voluntary ventilation«)
hsCRP	hochsensitives C-reaktives Protein	NA	Noradrenalin
HTX	Herztransplantation	NNR	»number needed to harm«
HV	Herzvolumen	NNT	»number needed to treat«
HZV	Herzzeitvolumen	NT-pro BNP	N-terminales pro-B-Typ-natriuretisches Peptid
IAS	individuelle Laktatschwelle	NYHA	New York Heart Association
IC	Inspirationskapazität	OBLa	»onset of blood accumulation«
ICD	implantierter Kardioverterdefibrillator, auch AICD (automatischer Kardioverterdefibrillator)	p	Druck [mmHg]
IGV	intrathorakales Gasvolumen	p_(a)CO₂	(arterieller) Kohlendioxidpartialdruck
ILO	Internationale Arbeitsorganisation	p_(a)O₂	(arterieller) Sauerstoffpartialdruck
INA	intensives Ausdauertraining	PA	Pulmonalarterie
ISA	intrinsisch sympathomimetische Aktivität	Pa	Pascal
IVUS	intravaskulärer Ultraschall	p_a(m)	mittlerer pulmonalarterieller Druck
KG	Körpergewicht	PAH	pulmonalarterielle Hypertonie
KHK	koronare Herzkrankheit	p_AO₂	alveolarer Sauerstoffdruck
KM	Kontrastmittel	PAP	Pulmonalarteriendruck
LAD	linke absteigende Koronararterie (»left anterior descending artery«, auch RIVA)	PAR	pulmonaler Arterienwiderstand
LAO	links-schräge Einstellung (»left anterior oblique«)	pAVK	periphere arterielle Verschlusskrankheit
LBBB	Linksschenkelblock (»left bundle branch block«)	PC-Druck oder PCW-Druck	pulmonaler Kapillardruck (»pulmonary capillary wedge pressure«)
		PCI	perkutane koronare Intervention

PCW	pulmonaler Verschlussdruck («pulmonary capillary wedge pressure«)	RVEF	rechtsventrikuläre Ejektionsfraktion
PET	Positionen-Emissions-Tomographie	SD	Standardabweichung
PETCO₂	endtidaler Kohlendioxidpartialdruck	SDNN	Standardabweichung aller NN-Intervalle (NN=Abstand zweier Herzschläge – »normal to normal«)
PETN	Pentaerythryltetranitrat (PETN)	SO₂	Sauerstoffsättigung
pH	negativer Wert der Wasserstoffionenkonzentration	sPAP	systolischer Pulmonalarteriendruck
PNC	Purinnukleotidezyklus	SPECT	Emissionscomputertomographie («single photo emission computer tomographie«)
pos. PW	positiver prädiktiver Wert	SSFP	»steady state free precession«
PTCA	perkutane transluminale Koronarangioplastie	STPD	Sauerstoffaufnahme
PVR	pulmonaler Gefäßwiderstand	SV	Schlagvolumen
P_vCO₂	gemischtvenöser Partialdruck für Kohlendensäure	SVI	Schlagvolumenindex
pw	gepulster Doppler («pulse wave«)	TC	Totalkapazität
PWC	physikalische Belastungsfähigkeit («physical working capacity«)	TET	telefonische EKG-Übertragung
Q̇	Durchblutung	THF	Trainingsherzfrequenz
QL	Lebensqualität («quality of life«)	TLC	totale Lungenkapazität
RA	rechter Vorhof	TPR	totaler peripherer Widerstand («total peripheral resistance«)
RAAS	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System	TVI	Gewebedopplerdarstellung («tissue velocity imaging«)
RAO	rechts-schräge Einstellung («right anterior oblique«)	TWA	T-Wellen-Alternans
R_{AW}	Atemwegswiderstand	U/min	Umdrehungen pro Minute
RBBB	Rechtsschenkelblock («right bundle branch block«)	UIP	»usual interstitial pneumonia« (übliche interstitielle Pneumonie)
RBI	»relative benefit increase«	URAS	Ultrarotabsorptionsspektrum
RCA	rechte Koronararterie	VȦ	alveoläre Ventilation
RCP	respiratorischer Kompensationspunkt	VȦ/Q̇	
RER	respiratorische Gasaustauschrate	VAT	»ventilatory anaerobic threshold« (ventilatorische anaerobe Schwelle)
RIVA	R. interventricularis anterior	VC	Vitalkapazität
RK	respiratorische Kompensation	VĊO₂	CO ₂ -Abgabe
RM	Risikomanagement	VĊO₂/VȮ₂	Atemäquivalent für CO ₂
RMVT	repetitive monomorphe ventrikuläre Tachykardie	V_D	Totraumvolumen
RNV	Radionuklidventrikulographie	V_D/V_T	Quotient aus Totraumvolumen zu Atemzugvolumen
ROI	Untersuchungsbereich («region of interest«)	V̇_E	Atemminutenvolumen
RPE	Leistungsempfinden («ratings of perceived exertion«)	V̇_E/VĊO₂	Atemäquivalent für CO ₂
RQ	respiratorischer Quotient	V̇_E/VȮ₂	Atemäquivalent für O ₂
RR	Blutdruck (nach Riva Rocci)	VES	ventrikuläre Extrasystole (engl. PVB »premature ventricular beat«)
RRi	»relative risk increase« (relativer Risikoanstieg)	V̇_g	V̇ _D als Totraumventilation
RRR	»relative risk reduction« (relative Risikominderung)	VȮ₂	Sauerstoffaufnahme
RSB	Rechtsschenkelblock	VȮ₂/HF	O ₂ -Puls
RV	rechter Ventrikel; Residualvolumen	ΔVȮ₂/ΔWR	Quotient aus Änderung der Sauerstoffaufnahme und Änderung der Leistung [W]

VSD	Ventrikelseptumdefekt
V_T	Tidalvolumen oder Atemzugvolumen
VT	ventrikuläre Tachykardie
W	Leistung (»work«)
W₁₇₀	Leistung in Watt bis zu einer Herzfrequenz von 170 Schlägen/min
WMS	Wandbewegungsskala (»wall motion score«)
WMSI	»wall motion score index« (Index der Wandbewegungsstörungen)
WPW-Syndrom	Wolff-Parkinson-White-Syndrom
WR	»work rate«
WR	Leistung (»work rate«)
\bar{x}	Mittelwert

III Bewertung ergometrischer Größen

7 Allgemeine Aspekte ergometrischer Messgrößen 61

H. Löllgen, U. Fahrenkrog, D. Löllgen

7.1	Grundsätzliches	62
7.1.1	Gütekriterien	62
7.1.2	Referenzwerte	65
7.1.3	Belastungsintensität	66
7.1.4	Zum Problem des Steady state	66
7.1.5	Stufendiagnostik in der Ergometrie	67
7.2	Leistung, Anstrengungsempfinden, metabolisches Äquivalent, Lebensqualität	69
7.2.1	Leistung	69
7.2.2	Referenzwerte	69
7.2.3	Metabolisches Äquivalent (MET)	70
7.2.4	Anstrengungsempfinden	71
7.2.5	Lebensqualität	73
7.3	Herzfrequenz	74
7.3.1	Herzfrequenz in der Erholungsphase	75
7.3.2	Referenzwerte	75
7.3.3	Beurteilung	76
7.3.4	Chronotrope Inkompetenz	77
7.4	Arterieller Blutdruck	80
7.4.1	Indirekte Blutdruckmessung	80
7.4.2	Zirkadiane Rhythmik	82
7.4.3	Herzfrequenzvariabilität (»heart rate variability«; HRV)	82
7.4.4	Druck-Frequenz-Produkt	83

8 Belastungs-EKG: Ischämiediagnostik 85

H. Löllgen, T. Steinberg, U. Fahrenkrog

8.1	Pathophysiologie	86
8.2	Methodik	87
8.3	EKG-Ableitungen	88
8.4	Elektrodenanordnung	88
8.5	Indikationen zum Belastungs-EKG	88
8.6	Beurteilung des Belastungs-EKG	89
8.6.1	ST-Strecke	89
8.6.2	EDV-Analyse des Belastungs-EKG	92
8.6.3	Frequenzbezogene ST-Strecken-analyse	94

8.7	Gütekriterien und Belastungs-EKG	94
8.7.1	»Score-Systeme«	95
8.7.2	Weitere Risikoabschätzung	95
8.7.3	Bayes-Theorem	96
8.8	Spezielle Aspekte des Belastungs-EKG	96
8.8.1	Belastungs-EKG nach Herzinfarkt	96
8.8.2	Leitlinien [11, 13, 14, 27]: Indikationen zum Belastungs-EKG nach akutem Myokardinfarkt	97
8.8.3	Belastungs-EKG nach aortorokoner (Venen-) Bypass-Operation (ACVB)	98
8.8.4	Belastungs-EKG bei koronarer Ballondilatation (PTCA)	99
8.8.5	Leitlinien [11, 13, 14, 27]: Indikationen zum Belastungsuntersuchung vor und nach einer Revaskularisation	99
8.8.6	Belastungs-EKG bei Älteren	99
8.8.7	Belastungs-EKG bei Frauen	99
8.8.8	Belastungs-EKG und normale Koronargefäße	99
8.8.9	Stumme Ischämie	100
8.8.10	Belastungs-EKG bei asymptomatischen Personen (Screening-Untersuchung)	100

9 Kardiale Nukliddiagnostik 103

H. Löllgen, R. Gerke

9.1	Methodische Hinweise	104
9.2	Indikationen	104
9.3	Spezielle Fragestellungen	104
9.4	Empfehlungen	105
9.4.1	Leitlinie der AHA [8]: Nuklear-kardiologie (NK)	105

10 Bildgebende Verfahren in der Ergometrie (MRT) 109

S. Kelle, E. Nagel

10.1	Einleitung	110
10.2	Ablauf einer CMR-Untersuchung	110
10.2.1	Erfassung der linksventrikulären Funktion	110
10.3	Myokardiale Ischämiediagnostik	112
10.3.1	Adenosinperfusion	112
10.3.2	Dobutaminwandbewegungs-analyse	114
10.4	Erfassung myokardialer Vitalität	115
10.5	Sicherheit der CMR	117
10.6	Zusammenfassung	118

11	Stressechokardiographie	121	13	Ergospirometrie	147
	<i>R. Gerke</i>			<i>A.K. Gitt</i>	
11.1	Einleitung	122	13.1	Einleitung	148
11.2	Geschichte	122	13.2	Physiologie des Gasaustauschs und der Ventilation	148
11.3	Pathophysiologische Grundlagen	122	13.3	Methodik	149
11.4	Methoden	124	13.3.1	Technische Ausstattung	149
11.5	Vorbereitung	124	13.3.2	Belastungsform	150
11.6	Bildakquisition	125	13.3.3	Testablauf	150
11.6.1	Wandbewegungsanalyse	125	13.4	Parameter	150
11.7	Methoden	127	13.4.1	O ₂ -Aufnahme ($\dot{V}O_2$)	151
11.7.1	Dynamische Verfahren	127	13.4.2	Maximale O ₂ -Aufnahme (Peak- $\dot{V}O_2$)	152
11.7.2	Pharmakologische Verfahren	129	13.4.3	Anaerobe Schwelle ($\dot{V}O_2$ -AT)	153
11.8	Nebenwirkungen und Komplikationen	130	13.4.4	O ₂ -Puls ($\dot{V}O_2$ /HF)	154
11.9	Abbruchkriterien, Kontraindikationen und Limitationen	131	13.4.5	Aerobe Kapazität ($\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$)	155
11.10	Untersucher	133	13.4.6	CO ₂ -Abgabe ($\dot{V}O_2 \dot{V}CO_2$)	155
11.11	Alternative Verfahren	133	13.4.7	Respiratorischer Quotient (RQ)	155
11.11.1	Vorhofstimulation	133	13.4.8	Atemzugvolumen (V_T »tidal volume«) ..	155
11.11.2	Kontrastmittelechokardiographie	133	13.4.9	Atemfrequenz (AF)	156
11.11.3	Stressdopplerechokardiographie	134	13.4.10	Atemminutenvolumen (\dot{V}_E)	156
11.11.4	Gewebedoppler	135	13.4.11	Totraumventilation (V_D/V_T)	156
11.11.5	Bestimmung der koronaren Flussreserve	135	13.4.12	Atemäquivalent für Sauerstoff ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) ..	156
11.11.6	Stressechokardiographie des rechten Ventrikels	135	13.4.13	Atemäquivalent für Kohlendioxid ($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$)	156
11.12	Indikationsstellung	136	13.4.14	Ventilatorische Effizienz (Steigung $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$)	156
11.12.1	Risikostratifikation	136	13.4.15	Endexpiratorischer O ₂ -Partialdruck ($p_{et}O_2$)	157
11.12.2	Vitales Myokard	137	13.4.16	Endexpiratorischer CO ₂ -Partialdruck ($p_{et}CO_2$)	157
11.13	Zusammenfassung	137	13.4.17	Herzfrequenzreserve (HFR)	157
12	Rechtsherzkatheter	141	13.4.18	Atemreserve (AR)	157
	<i>T. Steinberg</i>		13.5	9-Felder-Grafik nach Wasserman	157
12.1	Einleitung	142	13.6	Indikationen	158
12.2	Methodik	142	13.6.1	Diagnostische Indikationen	158
12.3	Indikationen	142	13.6.2	Differenzialdiagnostik	160
12.4	Komplikationen	144	13.6.3	Therapiekontrolle	161
12.5	Referenzwerte	144	13.6.4	Prognostische Indikationen	161
12.6	Bewertung	144	13.6.5	Risikostratifikation bei chronischer Herzinsuffizienz	161
12.6.1	PC-Druck	144	13.7	Zusammenfassung	164
12.6.2	Herzminutenvolumen und Schlagvolumen	145	14	Standardisierung in der Spiroergometrie	167
12.6.3	Widerstände	145		<i>D. Dumitrescu, S. Rosenkranz</i>	
12.6.4	avDO ₂	145	14.1	Dokumentation der Untersuchung	168
12.7	Prognostische Aspekte der Einschwemmkatheteruntersuchung	145	14.1.1	Darstellung der Befunde	168
12.8	Zusammenfassung	145	14.2	Qualitätskontrolle	169

IV Pulmonale Funktionsgrößen

15	Blutgase	173
	<i>S. Schwarz, A. Gitt</i>	
15.1	Einleitung	174
15.2	Durchführung, Messprinzip, Indikation, Methodik	174
15.3	Verhalten von Sauerstoffpartialdruck und alveoloarterieller Sauerstoffdruckdifferenz unter Belastung	176
15.3.1	Normalbefund	176
15.3.2	Latente Gasaustauschstörung	177
15.3.3	Manifeste Gasaustauschstörung	178
15.3.4	Gemischte Störung	178
15.4	Verhalten von Kohlendioxidpartialdruck und arterioalveolärer Kohlendioxiddruckdifferenz unter Belastung	179
15.5	Sollwerte und Graduierung von Störungen	180
15.5.1	Sauerstoffpartialdruck (p_aO_2)	180
15.5.2	Alveolokapilläre Sauerstoffdruckdifferenz ($AaDO_2$)	181
15.5.3	Kohlendioxidpartialdruck (p_aCO_2)	181
15.5.4	Kapillaralveoläre Kohlendioxiddruckdifferenz ($aADCO_2$, $p[a-ET]CO_2$)	182
15.6	Klinische Anwendung	182
16	Spiroergometrie in der Pneumologie	185
	<i>S. Schwarz, A. Gitt</i>	
16.1	Einleitung	186
16.2	Spiroergometrie zur Beurteilung von Art und Ausmaß pathophysiologischer Veränderungen	186
16.2.1	Atemminutenvolumen, Atemfrequenz, Atemzugvolumen	186
16.2.2	Totraumventilation	187
16.2.3	Inspirationszeit	187
16.2.4	Fluss-Volumen-Kurven (FVK) und Atemstrategien	188
16.3	Spiroergometrie bei Lungeneingriffen ..	190
16.3.1	Sauerstoffaufnahme und Resektionsausmaß	190
16.3.2	Risikoprädiktoren für Komplikationen und Mortalität	191

16.4	Spiroergometrie in der Diagnostik, Begutachtung und Therapiekontrolle von Lungenkrankheiten	192
16.4.1	Interstitielle Lungenerkrankungen	192
16.4.2	Chronisch obstruktive Atemwegserkrankungen	193
16.4.3	Chronisch thromboembolische pulmonale Hypertonie	193
16.4.4	Belastungsasthma (»exercise induced asthma«; EIA)	194
16.5	Trainingssteuerung bei Patienten mit COPD	194
16.6	Pneumologische Begutachtung	194

V Metabolische Größen

17	Grundlagen	199
	<i>N. Bachl, M. Kinzlbauer, H. Tschan</i>	
17.1	Katecholamine	200
17.1.1	Einleitung	200
17.1.2	Einflussfaktoren	200
17.1.3	Diskussion	202
17.1.4	Fazit	203
17.2	ANP und BNP	203
17.2.1	Fühler- und Reglerfunktion spezifischer Vorhofzellen	203
17.2.2	Aufgaben, Auslöser und Höhe der Freisetzung natriuretischer Peptide	203
17.2.3	Einflussfaktoren	204
17.2.4	Ausblick	205
17.3	Ammoniak (NH ₃)	206
17.3.1	Diagnostischer Wert der NH ₃ -Bestimmung	206
17.3.2	Diskussion	207
18	Energieliefernde Systeme und Laktat in der Ergometrie	213
	<i>J.M. Steinacker</i>	
18.1	Energieliefernde Systeme als Grundlage der ergometrischen Leistungsfähigkeit ..	214
18.1.1	Kapazitäten der energieliefernden Systeme	215
18.1.2	Kinetik der energieliefernden Systeme ..	216
18.1.3	Substrate und Energiestoffwechsel	216
18.1.4	Physiologische Funktionen von Laktat ..	217

18.1.5	Laktatspiegel als Marker des Stoffwechsels bei Belastung	218	20.1.2	Häufigkeit	244
18.2	Laktat in der Leistungsdiagnostik	219	20.1.3	Pathophysiologie	244
18.2.1	Laktatmessung	219	20.1.4	Supraventrikuläre Arrhythmien	245
18.2.2	Verhalten von Laktat bei ansteigender Belastungsintensität	220	20.1.5	Ventrikuläre Arrhythmien	245
18.2.3	Maximale Laktatkonzentration	220	20.1.6	Überleitungsstörungen	247
18.2.4	Laktatelimination	222	20.1.7	Leitlinie: Indikationen zum Belastungs-EKG zur Rhythmusdiagnostik	248
18.2.5	Laktat und Ausdauerleistungsfähigkeit – Konzept des maximalen Laktat-Steady-state	222	20.2	Ergometrie bei Schrittmacherpatienten ..	249
18.2.6	Laktat und Ausdauerleistungsfähigkeit – aero-anaerobe Schwelle	224	20.2.1	Kardiopulmonale Belastbarkeit	249
18.2.7	Einflüsse auf die Laktat-Leistungs-Kurve ..	225	20.2.2	Chronotrope Inkompetenz	249
18.2.8	Auswertung der Laktat-Leistungs-Kurve ..	226	20.2.3	Herzfrequenzprofil bei Belastung	250
			20.2.4	Belastungsabhängige Arrhythmien	250
			20.2.5	Ischämiediagnostik bei Schrittmacherpatienten	251
			20.2.6	Ergometrie bei Patienten mit antitachykarden Schrittmachern oder implantierten Kardioverterdefibrillatoren	251
VI Ergometrie bei speziellen Fragestellungen			21	Belastungsuntersuchung bei Frauen	253
19	Ergometrie beim Sportler	231	<i>H. Löllgen, D. Löllgen</i>		
	<i>C. Graf, H.G. Predel</i>		21.1	Leistungsfähigkeit im Belastungstest (Belastungskapazität)	254
19.1	Einleitung	232	21.2	Belastungs-EKG	255
19.2	Methodische Probleme: Wahl des Untersuchungsverfahrens	233	21.3	Mögliche Ursachen der veränderten Aussagekraft des Belastungs-EKG	256
19.2.1	Sportmedizinische Vorsorgeuntersuchung mit Belastungs-EKG	233	22	Ergometrie und Vitien im Erwachsenenalter	259
19.2.2	Fahrradergometrie	233	<i>G. Michels, U.C. Hoppe</i>		
19.2.3	Laufbandtest	234	22.1	Allgemeines zu Belastungsuntersuchungen bei Vitien	260
19.2.4	Spiroergometrie	234	22.2	Erworbene Vitien	260
19.2.5	Laktatmessung	235	22.2.1	Aortenklappenstenose	260
19.3	Bewertung der Leistungsfähigkeit des Sportlers	236	22.2.2	Chronische Aortenklappeninsuffizienz ..	263
19.4	Umsetzung ergometrischer Daten in die Trainingspraxis	237	22.2.3	Mitralklappenstenose	264
19.4.1	EKG	239	22.2.4	Chronische Mitralklappeninsuffizienz ..	266
19.4.2	Belastungsblutdruck	240	22.2.5	Mitralklappenprolaps	269
19.4.3	Herzfrequenzvariabilität	241	22.3	Belastungstests nach erfolgreicher Herzklappenersatzoperation	269
19.5	Schlussfolgerungen	241	22.4	Kongenitale Vitien	270
20	Ergometrie und Rhythmusstörungen	243	22.4.1	Azyanotische Vitien	271
	<i>H. Löllgen, U.C. Hoppe</i>		22.4.2	Zyanotische Vitien	273
20.1	Herzrhythmusstörungen und Belastungs-EKG	244	23	Ergometrie bei Linksherzinsuffizienz ..	279
20.1.1	Methodische Hinweise	244	<i>G. Michels, U.C. Hoppe</i>		
			23.1	Ätiologie	280
			23.2	Pathophysiologie	280

23.3	Belastungsuntersuchungen bei chronischer Herzinsuffizienz	282	25.6.1	Diagnostische Bedeutung	310
23.3.1	Ergometrie	283	25.6.2	Prognostische Bedeutung	310
23.3.2	6-min-Gehtest	283	25.6.3	Therapiekontrolle	311
23.3.3	Ergospirometrie	283	25.7	Zusammenfassung	311
23.4	Zusammenfassung	286	26	Ergometrie in der Pädiatrie	313
24	Allgemeine und spezielle Ischämiediagnostik	291	<i>H. Hebestreit</i>		
<i>H. Löllgen, E. Erdmann</i>			26.1	Ergometrie bei Krankheiten im Kindesalter	314
24.1	Anamnese	292	26.1.1	Lungenerkrankungen	314
24.2	Belastungs-EKG	292	26.1.2	Herzerkrankungen	314
24.3	Belastungsechokardiographie	292	26.1.3	Neuromuskuläre Erkrankungen	315
24.4	Rechtsherzkatheter	292	26.1.4	Andere Krankheitsbilder	315
24.5	Belastungsuntersuchung und Interventionen	292	26.2	Durchführung der Ergometrie	315
24.5.1	PTCA (perkutane transluminale Koronarangioplastie)	292	26.2.1	Kontraindikationen	315
24.5.2	Ergometrie und aortokoronare Venenbypassoperation (ACVB)	296	26.2.2	Überwachung und Abbruch- kriterien	315
24.5.3	Ergometrie und Herztransplantation (HTX)	297	26.2.3	Apparative und personelle Ausrüstung	317
24.6	Risikostratifizierung	298	26.3	Untersuchung der kardiovaskulären bzw. Ausdauerleistungsfähigkeit im Kindes- und Jugendalter	318
24.7	Zusammenfassung	301	26.3.1	Belastungsprogramme	318
25	Ergometrie und Bluthochdruck	303	26.3.2	Messgrößen zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit	319
<i>H. Löllgen, G. Predel, I.-W. Franz</i>			26.3.3	Normalwerte zur Beurteilung einer Ergometrie mit stufenförmig ansteigender Belastung bis zur Ausbelastung	321
25.1	Physiologie	304	26.4	Muskuläre Leistungsfähigkeit (Wingate-Test)	325
25.2	Blutdruck unter Belastung	304	26.5	Anpassungskinetik der O ₂ -Aufnahme an Änderungen der Belastung	326
25.2.1	Mittlerer Blutdruck	304	26.6	Zusammenfassung	327
25.2.2	Fragestellung: Blutdruckmessung unter Belastung	304	27	Ergometrie bei peripherer arterieller Verschlusskrankheit	329
25.3	Methodik der Belastungsblutdruck- messung	305	<i>A. Schmidt-Trucksäss</i>		
25.3.1	Direkte Blutdruckmessung	305	27.1	Epidemiologie	330
25.3.2	Indirekte Blutdruckmessung	305	27.2	Pathophysiologie	330
25.3.3	Vergleich der direkten mit der indirekten Messung	306	27.3	Klinik, Symptomatik, Klassifikation	330
25.4	Gütekriterien der Blutdruckmessung	306	27.4	Diagnose	330
25.4.1	Reproduzierbarkeit	306	27.4.1	Belastungsformen zur Ermittlung der Gefähigkeit	332
25.4.2	Langzeitvariabilität (1 Jahr)	306	27.4.2	Fahrradergometrie	333
25.5	Referenzwerte	306	27.4.3	Handkurbelergometrie	333
25.5.1	Blutdruck während Laufband- ergometrie	306	27.5	Umsetzung ergometrischer Messungen in das Training	334
25.5.2	Blutdruckmessung bei der Fahrrad- ergometrie	307			
25.6	Beurteilung des Blutdrucks während Ergometerarbeit	309			

28 Medikamente und Ergometrie335*E. Erdmann*

- 28.1 Bedeutung der Medikamenten-
einnahme336
- 28.2 Wirkstoffe336
- 28.2.1 β -Rezeptorenblocker336
- 28.2.2 Kalziumantagonisten336
- 28.2.3 Nitrate337
- 28.2.4 Pentaerythryltetranitrat (PETN)337
- 28.2.5 Molsidomin337
- 28.2.6 Trepidil338
- 28.2.7 Ranolazin, Ivabradin338
- 28.2.8 Diuretika338
- 28.2.9 α -Adrenozeptoragonisten339
- 28.2.10 Vasodilatoren und α -Adrenozeptor-
antagonisten339
- 28.2.11 ACE-Hemmer339
- 28.2.12 Herzglykoside340
- 28.2.13 Antiarrhythmika340
- 28.2.14 Lipidsenkende Medikamente341
- 28.2.15 Antidepressiva und Neuroleptika341
- 28.2.16 Alkohol341
- 28.2.17 Durchblutungsfördernde Pharmaka341
- 28.2.18 Antihistaminika341
- 28.2.19 Bronchodilatoren341
- 28.2.20 Kokain342
- 28.3 Falsch positive Befunde im Belastungs-
EKG bei Frauen342
- 28.4 Therapeutische Bedeutung342
- 28.5 Zusammenfassung343

**29 Spiroergometrie bei
Lungenkrankheiten345***D. Dumitrescu, S. Rosenkranz*

- 29.1 Verfahren346
- 29.2 Belastungsinduzierte Broncho-
konstriktion bei Asthma bronchiale346
- 29.3 Chronisch obstruktive Lungen-
erkrankung (COPD)347
- 29.4 Interstitielle Lungenerkrankungen349
- 29.5 Pulmonalvaskuläre Erkrankungen349
- 29.6 Spiroergometrie in der Differenzial-
diagnostik und Verlaufsbeurteilung
pulmonalvaskulärer Erkrankungen350
- 29.7 Präoperative Diagnostik351
- 29.8 Zusammenfassung351

**VII Arbeits- und sozial-
medizinische Aspekte
der Ergometrie****30 Ergometrie in der Prävention
(Reihenuntersuchungen)355***H. Löllgen, T. Steinberg*

- 30.1 Einsatz von Screening-Verfahren356
- 30.1.1 Bluthochdruck356
- 30.1.2 Belastungsinduziertes Asthma356
- 30.1.3 Koronare Herzkrankheit357
- 30.2 Empfehlungen für Reihen-
untersuchungen357
- 30.2.1 Leitlinie: Indikationen zum Belastungs-
EKG bei asymptomatischen Personen
ohne bekannte koronare Herzkrankheit ...358
- 30.2.2 Belastungs-EKG bei Patienten mit
Diabetes mellitus358

**31 Ergometrie in der kardiologischen
Rehabilitation361***U. Stierle, E. Giannitsis*

- 31.1 Ziele der Ergometrie in der
kardiologischen Rehabilitation362
- 31.2 Diagnostische Aufgaben362
- 31.2.1 Diagnostik einer Myokardischämie362
- 31.2.2 Beurteilung der kardiovaskulären
Regulation363
- 31.2.3 Beurteilung der Belastbarkeit und
der Entwicklung der Belastbarkeit364
- 31.2.4 Beurteilung der Belastbarkeit in Beruf
und Freizeit364
- 31.3 Therapeutische Aufgaben366
- 31.4 Profile der Belastungen367
- 31.4.1 Allgemeines367
- 31.4.2 Ausbelastungsprofile368
- 31.4.3 Trainingsprofile368
- 31.4.4 Phasen des Trainings369
- 31.4.5 Sonderformen des Ergometrietrainings370
- 31.4.6 Ausstattung für das Ergometrietaining371

32 Ergometrie in der Arbeitsmedizin375*J.A. Rösler*

- 32.1 Einleitung und Stellenwert376
- 32.2 Indikation377
- 32.2.1 Diagnostische Indikation377

32.2.2 Leistungsphysiologische Indikation377

32.3 Pathophysiologische Grundlagen377

32.4 Methodik378

32.5 Kontraindikationen378

32.6 Durchführung379

32.7 Beurteilung379

32.8 Zusammenfassung und Bewertung381

33 Begutachtung und Ergometrie 383
C.A. Schneider, H. Löllgen, E. Erdmann

33.1 Stellenwert der Ergometrie in der Begutachtung384

33.1.1 Ergometrische Messgrößen und ihre Wertigkeit385

33.1.2 Funktionelle Beurteilungen bei Gutachten385

33.2 Parameter und Messmethoden387

33.2.1 Leistung387

33.2.2 Herzfrequenz und Blutdruck387

33.2.3 Methoden387

33.3 Fazit388

34 Ergometrie beim älteren Menschen .. 391
H. Löllgen, U. Fahrenkrog

34.1 Funktionseinteilungen392

34.2 Physiologische Veränderungen im Alter ..393

34.3 Zur Problematik des Altersgangs395

34.4 Ergometrie bei Älteren396

34.5 Referenzwerte im Alter397

34.6 Zusammenfassung397

VIII Differenzialdiagnose mittels Ergometrie

35 Ergometrische Befunde 401
H. Löllgen, E. Erdmann

35.1 Leistung (W)402

35.2 Herzfrequenz402

35.3 Blutdruck402

35.4 Belastungs-EKG402

35.5 Belastungsechokardiogramm402

35.6 Blutgase402

35.7 Spiroergometrie402

35.8 Laktat404

35.9 Nuklearmedizinische Verfahren404

35.10 Rechtsherzkatheter404

35.11 Weitere Diagnostik404

36 Krankheitsbilder in der Differenzialdiagnostik 405
H. Löllgen, E. Erdmann

36.1 Brustschmerz406

36.2 Dyspnoe407

36.2.1 Pathophysiologische Hinweise408

36.2.2 Dyspnoeabklärung408

36.3 Palpitationen411

36.4 Zusammenfassung411

Anhang

A Ergänzende Referenzwerte 415
H. Löllgen

B Standardisierungen in der Ergometrie .. 441
H. Löllgen

B.1 Anforderungen an Fußkurbelergometer bei der Bauartprüfung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ..442

B.2 Revidierte Standardisierungsvorschläge für Ergometrie444

C Kasuistik zur Belastungsuntersuchung 447
D. Dumitrescu, C. Schneider

D Glossar 451
H. Löllgen

D.1 Klinisch-sportmedizinische und physiologische Definitionen452

D.2 Begriffe aus der Epidemiologie460

D.3 Ergänzende Begriffe zur Leitlinienerstellung und -bewertung460

D.4 Allgemeine methodische Hinweise461

D.5 Weitere Begriffe im Rahmen epidemiologischer oder klinischer Studien462

D.6 Begriffe und Statistik aus der Epidemiologie463

Stichwortverzeichnis 467

I Grundlagen

- 1 **Definition und Methodik** – 3
H. Löllgen
- 2 **Physiologische Grundlagen der Belastung** – 9
H. Löllgen, T. Steinberg
- 3 **Metabolische Funktion bei Belastung** – 13
N. Bachl, M. Kinzlbauer

Definition und Methodik

H. Löllgen

- 1.1 **Einleitung** – 4
- 1.2 **Definition im Rahmen der Ergometrie [10]** – 4
- 1.3 **Einflussgrößen in der Ergometrie** – 6
- 1.4 **Methodik der Ergometrie** – 7
 - 1.4.1 Kletterstufe – 7
 - 1.4.2 Gehtest – 8
 - 1.4.3 Laufbandergometrie – 8
 - 1.4.4 Fahrradergometrie – 8

1.1 Einleitung

Unter Ergometrie versteht man die quantitative Messung und Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Gesunden und Kranken. Die Ergometrie erfolgt mit einer definierten Belastung, sie soll reproduzierbar sein, dosierbar, vergleichbar und objektiv. Die Ergometrie setzt, wie eine vergleichbare Labormethode, ein standardisiertes Vorgehen mit Qualitätskontrolle voraus [12].

Zu den Messgeräten oder Ergometern für die Routineuntersuchung gehören:

- Kletterstufe,
- Fahrradergometer (Fußkurbel, seltener Handkurbel),
- Laufbandergometer.

Für spezielle, meist sportmedizinische Fragestellungen gibt es sportartspezifische Ergometer (Ruderergometer, Schwimmergometer u. a. [1–3, 8, 18] ► Kap. 4.4).

Die **Leistungsfähigkeit** (»physical performance capacity«) ist die maximal erreichbare Leistung für eine gegebene Beanspruchungsform. Die Leistungsfähigkeit beruht auf:

- Energieumsatz
- neuromuskulärer Funktion,
- psychologischen Faktoren.

Der **Energieumsatz** umfasst alle Teilfunktionen, die am Sauerstofftransport von der Außenluft an die Zelle der arbeitenden Muskulatur beteiligt sind, also Atmung, Kreislauf, Herz, Muskulatur. Zu den **neuromuskulären Faktoren** gehören die Muskelkraft, die Muskelfaserzusammensetzung, die Koordination, das Zusammenspiel von Bewegungsablauf und Muskelkraft.

Die **psychologischen Parameter** umfassen das Leistungsempfinden, die Leistungsbereitschaft und die Motivation [1, 12].

Neben der Ergometrie gibt es Belastungsuntersuchungen, die über verschiedene »Stressoren« die Reaktionen des Körpers prüfen. Die Belastungsformen bei der kardiopulmonalen Funktionsdiagnostik sind (► Tab. 1.1).

Von diesen Belastungsformen hat sich die Gabe von Dobutamin in den letzten Jahren als »Stresstest« durchgesetzt, v. a. in Verbindung mit

► Tab. 1.1 Belastungsformen für die kardiopulmonale Funktionsdiagnostik

Belastungsform

Isometrische Belastung

- Handgriffbelastung (»handgrip«)

Ergometrie (isotonische oder dynamische Belastung mittels Ergometer)

- Kletterstufe
- Laufband
- Fußkurbelergometer (Fahrradergometrie)
- Armkurbelergometrie
- 4-Extremitäten-Ergometrie

Sonstige Belastungsformen

- Frequenzstimulation:
 - Vorhofstimulation
- Pharmakologische (oder medikamentöse) Belastung:
 - Dobutamin, Arbutamin
 - Adenosin, Dipyridamol
- Gehtest:
 - Gehen in der Ebene über 6 oder 12 min
- Kältebelastung:
 - Eintauchen der Hand in Eiswasser (1 min)
- Volumenbelastung:
 - Bein-Hochlagerung
 - Kopftieflagerung (»head down tilting«)
- Psychische Belastung (Stress)

bildgebenden Verfahren (z. B. Echokardiographie). Statische Belastungsformen (isometrische Belastung) spielen in der Hochdruckdiagnostik sowie bei Herzkatheteruntersuchungen eine Rolle [12].

1.2 Definition im Rahmen der Ergometrie [10]

Die Ergometrie beruht auf den physikalischen Größen **Kraft**, **Arbeit** und **Leistung** (► Tab. 1.2).

Kraft ist eine Größe, die auf eine ruhende Masse oder eine Masse in Bewegung wirkt. Bei der **Arbeit** unterscheidet man dynamische und statische (isometrische) Arbeit, die dynamische kann kon-

■ Tab. 1.2. Physikalische Grundlagen der Ergometrie

Einheiten	Maßeinheiten	Abkürzung
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Kraft (»force«): Masse · Beschleunigung ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	Newton	N
Arbeit (»work«/»energy«): Kraft · Weg ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	Joule	J
Leistung (»power«/»work load«): Arbeit/Zeit ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	Watt ^a	W
Belastungsform	Ergometrische Leistungsberechnung	
Kletterstufe	$L (\text{mkp} \cdot \text{s}^{-1}) = G \cdot H \cdot F \cdot (\text{mkp} \cdot \text{min}^{-1})$	
Laufband	$L (\text{mkp} \cdot \text{s}^{-1}) = G \cdot v \cdot \sin \alpha$ (α in Grad $v = \text{m/s}$ $G = \text{kp} \cdot 9.81$)	
Fahrradergometer	$L (W) = \frac{M2 \pi n}{60}$	

^a1 W = 6,12 kp · m · min⁻¹.

L Leistung (beachte die Dimensionen, Umrechnung: 1 kpm/s = 9.81 W); G Gewicht (als Körpermasse in kp); H Stufenhöhe in m; F Steigfrequenz (1/min); v Laufbandgeschwindigkeit; α Steigungswinkel; M Bremsmoment (Nm); n Umdrehungszahl (1/min).

zentrisch (positiv) oder exzentrisch (negativ) sein [1, 10, 11, 17]. Die **biologische** Leistung (»performance«) beinhaltet die Reaktion biologischer Größen bei einer gegebenen physikalischen Belastung.

Unter maximaler Leistungsfähigkeit versteht man die maximal erreichbare Leistungsstufe für eine gegebene Beanspruchung. Daneben kann **Leistung** auch aus anthropologischer, sozialwissenschaftlicher, soziologischer, kultur-philosophischer, pädagogischer oder ökonomischer oder betriebswirtschaftlicher Sicht definiert werden.

Von der Leistungsfähigkeit abzugrenzen ist die Belastbarkeit (»physical load«). Hierunter versteht man die höchste Belastungsstufe, die jemand erbringt, ohne dass schwerwiegende pathologische Befunde oder Symptome auftreten. Die Belastbarkeitsgrenze ist somit die Leistung, bis zu der ein Mensch ohne gesundheitliches Risiko belastet werden kann (■ Tab. 1.3).

Schließlich sind **Belastung** (»stress«) und **Beanspruchung** (»strain«) zu unterscheiden. Unter Belastung versteht man die äußeren Einwirkungen, die zu einer Reaktion im menschlichen Organismus führen, unter Beanspruchung die Reaktion des Organismus auf die vorgegebene Belastung.

Schäfer [16] hat sich sehr kritisch mit der Beurteilung der Leistungsfähigkeit auseinandergesetzt. So zeigen Beobachtungen an Körperbehinderten, dass die Minderung der Leistungsfähigkeit durch Krankheit und Behinderung oft überschätzt wird. Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit sind zur »Mühsal« korreliert. Sie enthalten also einen subjektiven Anteil mit unangenehmen Empfindungen. Die Angabe des Leistungsempfindens (► Kap. 7.2) spiegelt diesen subjektiven Anteil wider. Zugleich weisen diese Argumente auf die große Bedeutung der Motivation bei der Durchführung der Ergometrie hin. Die Leistungsfähigkeit wird schließlich auch von sozialen Normen bestimmt [16].

Dynamische Arbeit liegt vor, wenn im physikalischen Sinne Widerstand entlang eines Weges überwunden wird. **Statische Arbeit** beinhaltet eine isotonische Muskelkontraktion, ohne dass Arbeit im eigentlichen Sinne verrichtet wird.

Fitness ist eine psychisch und physisch gute Leistungsfähigkeit für eine spezifische Aufgabe. Fitness umfasst neben Ausdauer die weiteren motorischen Beanspruchungsformen wie Flexibilität, Muskelkraft und Koordination, um die Aufgaben im Alltag und Sport zu bewältigen [10].

■ Tab. 1.3 Definitionen des Begriffes Leistung

Leistung:	Arbeit/Zeiteinheit (Watt). oder: Kraft × Weg/Zeiteinheit. oder: Kraft × Geschwindigkeit
Leistung (biologisch, »performance«):	Größenordnung des biologischen Parameters bei gegebener physikalischer Belastung
Leistungsfähigkeit:	Maximal erreichbare Leistungsstufe für eine gegebene Beanspruchung
Belastbarkeit:	Die höchste Belastungsstufe, die erreicht werden kann, ohne dass pathologische Symptome oder Befunde auftreten oder ohne schwerwiegende Verschlechterung vorhandener pathologischer Befunde
Leistung kann auch definiert werden aus	<ul style="list-style-type: none"> – anthropologischer, – sozialwissenschaftlicher, – soziologischer, – kulturphilosophischer, – pädagogischer, – ökonomischer (betriebswirtschaftlicher) Sicht

Koordination beinhaltet das Zusammenwirken von Zentralnervensystem und Skelettmuskulatur im Rahmen eines gezielten Bewegungsablaufes.

Technik ist die koordinative Beanspruchung im Zusammenhang mit einem Gerät.

Flexibilität bedeutet der willkürlich mögliche Bewegungsbereich in einem oder in mehreren Gelenken.

Statische Kraft ist diejenige Spannung, die ein Muskel oder eine Muskelgruppe in einer bestimmten Position willkürlich gegen einen fixierten Widerstand auszuüben vermag.

Dynamische Kraft ist diejenige Masse, welche innerhalb eines gezielten Bewegungsablaufes bewegt werden kann.

Ausdauer beinhaltet die Fähigkeit, eine vorgegebene Leistung über einen möglichst langen Zeitraum durchhalten zu können. Man unterscheidet die allgemeine Ausdauer von der lokalen (aeroben und anaeroben) sowie von der statischen und dynamischen Ausdauer [10].

1.3 Einflussgrößen in der Ergometrie

Für die Ergometrie spielen die Einflussgrößen eine besondere Rolle (■ Tab.1.4). Rhythmische Schwankungen sind stets zu beachten. Die biologische Schwankungsbreite einiger Messgrößen

■ Tab. 1.4 Einflussgrößen kardiopulmonaler Funktionsparameter

Bedingung	Parameter
Alter und anthropometrische Daten	<ul style="list-style-type: none"> – Alter – Größe – Gewicht – Körperoberfläche – Geschlecht
Umgebungsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> – Luftdruck – Relative Luftfeuchte – Tageszeit – Raumtemperatur
Methodische Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> – Versuchsanordnung – Analytoren: Gase, – Druck, Fluss – Ergometer – Apparative Details der Versuchsanordnung – Belastungsart
Individuelle Einflussgrößen	<ul style="list-style-type: none"> – Trainingszustand – Übung, Übungsmangel – Nahrungsaufnahme – Nikotin- und Alkoholgebrauch – Medikamenteneinnahme – Psychische Faktoren

kann im Laufe eines Jahres bis zu 20% betragen [18]. Das Belastung-EKG weist deutliche zirkadiane Schwankungen auf.

1.4 Methodik der Ergometrie

1.4.1 Kletterstufe

Bei der Belastung mit der Kletterstufe muss der Proband anhand einer vorgegebenen Geschwindigkeit (Metronom) zwei Stufen auf- und absteigen. Die Leistung berechnet sich aus Gewicht, Stufenhöhe und Steigfrequenz (► Kap. 4). Vorteile der Kletterstufe sind die gewohnte Belastungsform und der geringe Preis. Eine Eichung ist nicht erforderlich, der apparative Aufwand ist gering, die Ausbelastung oft höher als bei der Fahrradergometrie.

Als Nachteil erweist sich, dass zusätzliche Größen nicht oder nur unzureichend gemessen werden können; die Überwachung ist problematischer als bei anderen Belastungsformen; eine ansteigende Belastung ist erschwert möglich; orthostatische Einflüsse sind möglich.

Für die Routineergometrie spielen die Fahrradergometer- und die Laufbandbelastung die weitaus größere Rolle. Die Laufbandbelastung wird häufiger in den Vereinigten Staaten eingesetzt, die Fahrradergometrie mehr auf dem Kontinent und auch in Deutschland. Vor- und Nachteile der verschiedenen Belastungsformen sind in ■ Tab. 1.5 aufgeführt.

■ **Tab. 1.5** Vorteile der Belastung mit einem Fahrradergometer sowie die Gegenüberstellung von Vorteilen einer solchen Belastung im Liegen oder im Sitzen

Belastungsform	Vorteile	Nachteile
Fahradergometer	<ul style="list-style-type: none"> – Belastung ist dosierbar – Reproduzierbar – Kontinuierlich ansteigende Belastung möglich – Messung zusätzlicher Größen möglich – Blutdruck- und EKG-Registrierung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – Belastung für manche Probanden ungewohnt, v. a. im Liegen – Regelmäßige Eichungen erforderlich – Sturzgefahr bei orthostatischer Reaktion (Belastung im Sitzen) – Ergometer in verschiedenen Untersuchungsstellen oft nicht zu vergleichen – Mitunter frühzeitige muskuläre Erschöpfung vor kardiopulmonaler Ausbelastung
Ergometerbelastung im Liegen	<ul style="list-style-type: none"> – Gute EKG-Registrierung – Zuverlässige Blutdruckmessung – Zusätzliche Untersuchungen (pulmonal, kardial, Herzkatheter) möglich – Vergleich mit Befunden bei der Katheteruntersuchung möglich Mitunter bei kardialen Fragestellungen – Frühzeitige pathologische Reaktionen durch zusätzliche Volumenbelastung 	
Ergometerbelastung im Sitzen	<ul style="list-style-type: none"> – Position gewohnt – Ausbelastung eher möglich ohne vorzeitige muskuläre Erschöpfung – Weniger Zwischenfälle als bei Belastung im Liegen – Preiswerter, da keine Spezialliege erforderlich 	
Laufbandergometer im Vergleich zum Fahrradergometer	<ul style="list-style-type: none"> – Belastungsform aus dem täglichen Leben gewohnt – Leistung exakt zu messen – Kontinuierlich ansteigende Belastung möglich – Ausbelastung besser möglich als bei Fahrradergometrie 	<ul style="list-style-type: none"> – Gerät kostspielig – Großer Platzbedarf – Lärmbelästigung – Gefährdung durch Sturz (ältere Probanden) – Geschicklichkeit bzw. Übung erforderlich – Regelmäßige Kalibrierungen (Geschwindigkeit und Neigungswinkel) erforderlich – Belastung stets unter Beachtung des Körpergewichtes einzustellen

1.4.2 Gehtest

Bei kardialen und pulmonalen Krankheiten wird ein 6- oder 12-min-Gehtest eingesetzt. Gemessen wird die in dieser Zeit zurückgelegte Strecke. Sie ist ein Maß der Leistungsfähigkeit. Dieser Test kann überall dort eingesetzt werden, wo ein Flur mit einer Länge von über 30 m vorhanden ist (► Kap. 4.3.3).

1.4.3 Laufbandergometrie

Die Leistung bei der Laufbandergometrie errechnet sich nach Gewicht, Geschwindigkeit und Steigungswinkel des Laufbandes (► Kap. 4). Programmvorschläge finden sich in ► Kap. 6 Vor- und Nachteile von Laufband- und Fahrradergometrie sind in ■ Tab. 1.5 aufgelistet.

1.4.4 Fahrradergometrie

Man unterscheidet bei den Fahrradergometern solche mit mechanischer Bremsung von wirbelstrom- oder dynamogebremsten Ergometern. Die mechanisch gebremsten Ergometer sind leicht zu handhaben und preiswert. Sie können leicht nachgeiecht werden. Sie sind aber drehzahlabhängig und verlangen eine gute Mitarbeit des Patienten. Dagegen sind die elektrisch gebremsten Ergometer drehzahlunabhängig und für Patientenuntersuchungen besser geeignet.

Trotz der Drehzahlunabhängigkeit ist zu beachten, dass wechselnde Drehzahlen die biologische Leistung beeinflussen können [12]. Im submaximalen Bereich muß daher die Drehzahl (60–70 U/min) eingehalten werden. Die Leistung bei der Fahrradergometrie errechnet sich aus Bremskraft und Drehzahl (Umlaufgeschwindigkeit).

Die Bauartanforderungen an Ergometer sind heute vorgeschrieben und müssen vom Hersteller beachtet werden (► Anhang B). Beim Neukauf eines Ergometers muss ein Kalibrierzertifikat vorgelegt werden. Vor- und Nachteile der Fahrradergometrie sind in ■ Tab. 1.5 dargestellt. Das methodische Vorgehen wird in ► Sektion II erläutert.

Weitere bedeutsame Aspekte sind die Details der apparativen Methodik, die Umgebungsbedin-

gungen mit der Qualitätskontrolle sowie das methodische Vorgehen mit dem Untersuchungsprogramm (► Kap. 4).

Literatur

1. ACSM's resource manual for guidelines for exercise testing and prescription (2006), 5th edn. Lippincott, Philadelphia
2. Åstrand P-O, Rodahl K Dahl HA, Strömme SB (2003) Textbook of work physiology. 4th edn. Human Kinetics, Champaign, Ill
3. Bachl N, Graham T, Löllgen H (eds.) (1991) Advances in ergometry. Springer, Berlin Heidelberg New York
4. Bernstein ML, Despars JA, Singh NP, Avalps K, Stansbury DW, Light RW (1994) Reanalysis of the 12-minute walk in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Chest 105: 163–167
5. Deutsche Norm 13406; Medizingeräte (1989) Tretkurbelergometer für Kinder, Begriffe, Anforderungen, Prüfungen. Beuth, Berlin
6. Deutsche Norm 13405; Medizingeräte (1989) Tretkurbelergometer, Begriffe, Anforderungen, Prüfungen. Beuth, Berlin
7. Enright PL, McBurnie MA, Bittner V, Tracy RP, McNamara R, Arnold A, Newman AB (2003) The 6-min walk test. Chest 123: 387–398
8. Froehlicher VF, Myers J (2006) Exercise and the heart, 5th edn. Saunders, Philadelphia
9. Guyatt GH, Pugsley SO, Sullivan MJ, Thompson PJ, Berman LB, Jones NL (1984) Effect of encouragement on walking test performance. Thorax 39: 818–822
10. Hollmann W (1993) Definitionen und Grundlagen zur Trainingslehre. Dtsch Z Sportmed 44: 383–389
11. Hollmann W, Strüder HK (2008), Sportmedizin, 5. Aufl. Schattauer, Stuttgart
12. Löllgen H (2005) Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik, 4. Aufl. Novartis, Nürnberg
13. Mager G, Winter UJ (1994) Belastungsuntersuchungen bei Herz-Kreislauf-, Gefäß- und Lungenkrankheiten. Thieme, Stuttgart New York
14. Mellerowicz H (1979) Ergometrie. Urban & Schwarzenberg, München Wien
15. Riley M, McParland T, Stamford CF, Nicholls DP (1992) Oxygen consumption during corridor walking in chronic cardiac failure. Europ Heart J 13: 789–793
16. Schäfer H (1974) Feststellung und Beschreibung von Leistungsvermögen und -einbuße. Öffentl Gesundheitswesen 36: 474–483
17. Shephard RJ, Åstrand, P-O (Hrsg) (1993) Ausdauer im Sport. Deutscher Ärzteverlag, Köln
18. Wollschläger H, Löllgen H, Zeiher A, Wieland B, Just H (1984) Significance of longitudinal variance of ergometric measurements. In: Löllgen H, Mellerowicz H (eds) Quality control and test criteria. Springer, Berlin Heidelberg New York

Physiologische Grundlagen der Belastung

H. Löllgen, T. Steinberg

- 2.1 Herz – Kreislauf – 10
- 2.2 Ventilation und metabolische Größen – 11
- 2.3 Muskulatur – 11

Während körperlicher Belastung kommt es zu vielfältigen Anpassungserscheinungen von Herz-, Kreislauf- und Lungenfunktion.

Parallel hierzu laufen Änderungen des Muskelstoffwechsels, des Säure-Basen-Haushaltes und weiterer neurohumoraler Parameter ab [2, 4–6, 9, 10]. Einzelheiten sind in den jeweiligen Kapiteln dargestellt.

2.1 Herz – Kreislauf

Die kardiopulmonale Funktion unter Belastung hängt von zentralen und peripheren Faktoren und Komponenten ab (■ Tab. 2.1).

Die wichtigste »zentrale« Messgröße während Belastung ist die **Herzfrequenz**. Sie steigt parallel zur Belastungsintensität an, oberhalb einer Intensität von 80% der Maximalbelastung kann eine leichte Abflachung auftreten. Die Steilheit des Frequenzanstieges unterliegt ähnlichen Einflussgrößen wie die Ruhedefrequenz. Zusätzlich bestimmen Mechano- und Chemorezeptoren der arbeitenden Muskulatur die Frequenzreaktion sowie zirkulierende Katecholamine und die Ansprechempfindlichkeit der β -Rezeptoren. Wie alle kardiopulmonalen Größen steigt die Herzfrequenz auf einer Belastungsstufe exponentiell an und erreicht nach 2–3 min einen gleich bleibenden Wert (Schwankungen unter 5% oder Steady state). Dieses Gleichbleiben war früher von Bedeutung, als Messungen wie die des Herzzeitvolumens mehrere Minuten benötigten. Heute können mit verbesserter Technik alle Meßgrößen in 1–2 min, z. T. auch 2-fach, ermittelt werden.

Bei höherer Belastungsintensität, meist oberhalb der anaeroben Schwelle (► Kap. 4), wird ein solches Gleichbleiben nicht mehr erreicht. Die Herzfrequenz steigt stetig an (Ermüdungsanstieg), sodass ein Steady state nicht erreicht wird. Ein solcher Steady state spielt daher für die üblichen Untersuchungen keine Rolle mehr, wichtiger sind Messungen zu gleichen und vergleichbaren Zeitpunkten. Parallel zur Herzfrequenz steigt üblicherweise auch der **Blutdruck** an. Überschießende Werte weisen auf einen Belastungsbloodhochdruck hin. Ein unzureichender Anstieg wird als Hinweis auf eine linksventrikuläre Funktionsstörung aufgefasst. Der periphere **Widerstand** fällt unter Belastung ab, entsprechend steigen **Schlag- und Herzzeitvolumen** unter Belastung an. Das Schlagvolumen steigt unter Belastung um 30–50% an, erreicht dann ein Plateau und bleibt weitgehend konstant.

Der kontinuierliche Anstieg des **Herzzeitvolumens** wird v. a. von der Herzfrequenz bestimmt, ferner von der Kontraktilität des linken Ventrikels, den Lastbedingungen und von zirkulierenden Katecholaminen. Diese Änderungen während Belastung hängen zusätzlich von der **arteriovenösen Differenz** für Sauerstoff ab, diese wird von der arbeitenden Muskulatur und der Atemmuskulatur mitbestimmt. Die O_2 -Abgabe wird durch eine Rechtsverschiebung der O_2 -Bindungskurve begünstigt. Die Messungen der Hämodynamik wird in speziellen Fällen durch die **Druckmessung im kleinen Kreislauf** ergänzt. Mit dieser Messung werden Drucksteigerungen (Cor pulmonale, linksventrikuläre Funktionsstörung) ermöglicht sowie die Bestimmung des Herzzeitvolumens über das sog. Fick'sche Prinzip [2, 9].

■ Tab. 2.1 Parameter der kardiopulmonalen Funktion unter Belastung

Komponenten		Anmerkungen
Zentrale Komponenten	Herzminutenvolumen = Herzfrequenz \times Schlagvolumen	<ul style="list-style-type: none"> – Schlagvolumen = enddiastolisches (EDV) endsystolisches Volumen (ESV) – EDV wird bestimmt vom Füllungsdruck und der Ventrikel-elastizität – ESV wird bestimmt von Kontraktilität und Nachlast
Periphere Komponenten	Arteriovenöse Differenz = $CO_{2art} - CO_{2ven}$ (CO_2 -Gehalt)	<ul style="list-style-type: none"> – CO_{2art} wird u. a. bestimmt von Ventilation, alveolarem pO_2 und Diffusionskapazität – CO_2 von lokaler Durchblutung, Kapillardichte und Sauerstoffextraktion

2.2 Ventilation und metabolische Größen

In gleicher Weise wie die kardialen Messgrößen steigen die **ventilatorischen Parameter** während Belastung an. Zwischen Herzfrequenz und O₂-Aufnahme besteht eine lineare Beziehung, die von verschiedenen Faktoren (Alter, Geschlecht, Trainingszustand) abhängt.

Man beobachtet bei den ventilatorischen Größen in typischer Weise nach einem linearen Anstieg eine überproportionale Zunahme ab einer bestimmten Belastungsintensität, der **aerob-anaeroben Schwelle** (► Kap. 3, 13, 18). Die aerob-anaerobe Schwelle ist die Belastungsintensität, bei der die **CO₂-Abgabe** nichtlinear gegenüber der **O₂-Aufnahme** ansteigt. Sie liegt je nach Leistungsfähigkeit in einem Bereich zwischen 60 und 80% der maximalen Leistungsfähigkeit.

Diese Schwelle wird beobachtet für die CO₂-Abgabe und die Ventilation sowie für das **Atemäquivalent**. Auch die endexpiratorischen Partialdruckkurven für Kohlensäure ändern sich zu diesem Zeitpunkt sowie die **pH- und Laktatwerte**. Bei maximaler, erschöpfender Belastung bleibt trotz Zunahme der Leistung die O₂-Aufnahme konstant

(»levelling off«): Der Wert zu diesem Zeitpunkt wird als maximale O₂-Aufnahme bezeichnet.

Während Belastung steigen ferner zahlreiche metabolische und humorale Faktoren an, v. a. die **Katecholamine**, die **Laktatwerte** sowie das atriale natriuretische Peptid. Regelmäßig nimmt die Körpertemperatur während körperlicher Arbeit zu [5, 6, 10, 11].

Die funktionelle Kapazität oder Belastbarkeit wird ferner nach spiroergometrischen und hämodynamischen Daten sowie der Borg-Skala und dem metabolischen Äquivalent eingeteilt (► Kap. 7). Umrechnungsmöglichkeiten von Watt nach MET zeigt ■ Tab. 4.1.

2.3 Muskulatur

In der arbeitenden Muskulatur kommt es während Belastung zu vielfältigen Substrat- und anderen Enzymverschiebungen. Charakteristisch ist die Abnahme von Muskelglykogen, Kreatinphosphat und energiereichen Phosphaten. Parallel hierzu steigt der Muskellaktatgehalt jedoch bedingt durch die verzögerte Freisetzung langsamer als der Blutlaktat Spiegel [7, 10]. Die muskulären Veränderungen

■ Tab. 2.2 Klassifikation der funktionellen Kapazität und der objektiven Beurteilung von Herzpatienten. (AHA 1994 [1])

Funktionelle Kapazität	Objektive Beurteilung
Klasse 1 – Patienten mit Herzerkrankung, aber ohne Begrenzung der körperlichen Leistungsfähigkeit. Normale körperliche Belastung verursacht keine Müdigkeit, Palpitationen, Luftnot oder Angina pectoris.	A – Kein objektiver Nachweis einer kardiovaskulären Erkrankung
Klasse 2 – Patienten mit Herzerkrankung mit resultierender leichter Begrenzung der körperlichen Leistungsfähigkeit. Die Patienten fühlen sich in Ruhe wohl. Normale körperliche Belastung verursacht Müdigkeit, Palpitationen, Luftnot oder Angina pectoris.	B – Objektiver Nachweis einer minimalen kardiovaskulären Erkrankung
Klasse 3 – Patienten mit Herzerkrankung mit resultierender deutlicher Begrenzung der körperlichen Leistungsfähigkeit. Die Patienten fühlen sich in Ruhe wohl. Geringere als normale körperliche Belastung verursacht Müdigkeit, Palpitationen, Luftnot und Angina pectoris.	C – Objektiver Nachweis einer mäßiggradigen kardiovaskulären Erkrankung
Klasse 4 – Patienten mit Herzerkrankung mit der Unmöglichkeit, alltägliche Belastungen ohne Beschwerden auszuführen. Herzinsuffizienz-Symptome oder Angina pectoris können sogar in Ruhe vorhanden sein. Wenn irgendwelche körperlichen Leistungen unternommen werden, nehmen die Beschwerden zu.	D – Objektiver Nachweis einer schweren kardiovaskulären Erkrankung

während Ergometerarbeit werden von der Muskel- durchblutung mitbestimmt. Die Durchblutung der Muskulatur stellt eine mögliche Leistungsbegrenzung bei hoher Belastungsintensität dar. Schließlich lassen sich auch die **Kraft-Geschwindigkeits-Beziehungen** während Fahrradergometer- oder Laufbandarbeit bestimmen [7, 8]. Die Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung ermöglicht eine Beurteilung der Ökonomie des Bewegungsablaufes und eine Optimierung der Ergometerarbeit. Alle die hier skizzierten Änderungen werden von der **Tretgeschwindigkeit** (Drehzahl) beeinflusst, der optimale metabolische Bereich der Drehzahl liegt bei 50–60 U/min, der optimale Bereich hinsichtlich des Anstrengungsempfindens und der Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung bei 60–80 U/min oder mehr [7–9].

Die **klinische Einteilung** der funktionellen Kapazität bei Herzpatienten erfolgt nach den Kriterien der Amerikanischen Herzgesellschaft (AHA); (■ Tab. 2.2; [1]). Sie korreliert nicht immer mit den objektiven Messgrößen (► Kap 20).

Literatur

1. AHA (ed) (1994) Revision to classification of functional capacity and objective assessment of patients with diseases of the heart. *Circulation* 90: 644–645
2. AHA/ACC (1997) Gibbons RJ, Balady GJ, Beasley JW (eds) Guidelines for exercise testing. *J Am Coll Cardiol* 30: 260–315
3. Åstrand P-O, Rodahl K, Dahl HA, Strömme SB (2003) Textbook of work physiology. 4th edn. Human Kinetics, Champaign, Ill
4. American College of Sports Medicine (2006) Resource manual for guidelines for exercise testing and prescription, 5th edn. Lippincott, Philadelphia
5. Ellestad MH (1996) Stress Testing, 4th edn. Davis, Philadelphia
6. Hollmann W, Strüder H (2008) Sportmedizin, 5. Aufl. Schattauer, Stuttgart
7. Jakolska A, Goossens P, Veenstra B, Jakolski A, Skinner JS (1999) Comparison of treadmill and cycle ergometer measurements of force – velocity relationships and power output. *Int J Sports Med* 20: 192–197
8. Löllgen H, Augustin T (1981) Drehzahlschwankungen und Leistungsempfinden bei Fahrradergometerarbeit. *Dtsch Z Sportmed* 32: 208–213
9. Löllgen H (2005) Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik, 4. Aufl. Novartis, Nürnberg
10. Stilgenbauer F, Reißmnecker S, Steinacker JM (2003) Herzfrequenzvorgaben für Ausdauertraining von Herzpatienten. *Dtsch Z Sportmed* 54: 295–296
11. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ (2005) Principles of exercise testing and interpretation, 4th edn. Lippincott, Philadelphia
12. Winter UJ, Hanrath P, Hilger HH (1994) (Hrsg) Ergospirometrie: Methodik und klinische Anwendung. *Z Kardiol* 83 [Suppl 3]: 1–180