

Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft der Österr. Gesellschaft für Innere Medizin und der assoziierten Fachgesellschaften. Eigentümer und Verleger: Brüder Hollinek. Alle: Landstraßer Hauptstraße 163, A-1030 Wien. Redaktion und für den Inhalt verantwortlich im Sinne des Pressegesetzes: Prof. Dr. K. Fellingner, Alser Straße 4, A-1095 Wien. Druck: Brüder Hollinek, Stadtbüro Landstraßer Hauptstraße 163, A-1030 Wien. Druckerei Industriezentrum NO-Süd, A-2351 Wiener Neudorf.

Aus der Kardiologischen Universitätsklinik Wien (Vorstand: Prof. Dr. F. Kaindl) und der Herzstation (Vorstand: Prof. Dr. K. Polzer) des Hanusch-Krankenhauses in Wien

Leitlinien für die Ergometrie

Von M. Niederberger, F. Kubicek und W. Reiterer

Eingelangt: 18. Dezember 1974

Schlüsselwörter: Ergometrie — Arbeitsversuch — Leistungsfähigkeit — koronare Herzkrankheit.

Key-words: Exercise test — screening — working capacity — coronary heart disease.

Zusammenfassung

Die „Leitlinien“ geben Anhaltspunkte für die praktische Durchführung der Ergometrie. An Voraussetzungen für diese Untersuchung stehen weniger die apparative Einrichtung (geeichtes Ergometer, Defibrillator usw.) als vielmehr Personal und Zeit im Vordergrund, da sie vom Arzt im Durchschnitt einen Zeitaufwand von 30 bis 40 Minuten erfordert. Methodisch sind kontinuierliche Tests mit in Stufen oder linear ansteigender Belastungsintensität meist am zweckmäßigsten. Der Abbruch der Belastung erfolgt beim „symptomlimitierten maximalen“ Test, sobald die vorher instruierte Testperson dazu das Zeichen gibt oder sobald obligate Abbruchskriterien erreicht werden. Andere Testprotokolle werden unter die Begriffe „submaximaler“ und „orientierender“ Test subsumiert. Die Beurteilung des Tests, die funktionelle, diagnostische und prognostische Gesichtspunkte berücksichtigen kann, stützt sich auf die Synopsis der Arbeitsreaktionen. Am wichtigsten und leicht feststellbar sind Herzfrequenz und Blutdruckverhalten sowie subjektive und

objektive Symptome. Sie werden einerseits in Beziehung zur jeweils erbrachten Leistung gesetzt, andererseits ist das Verhalten bei „Ausbelastung“, also bei symptomlimitierter maximaler Leistung, reproduzierbar und ausagekräftig. Dem Arbeits-EKG kommt zwar entscheidende Bedeutung zu, doch darf es nur in Zusammenschau mit den übrigen Beobachtungen interpretiert werden, wenn Fehlbeurteilungen und eine nicht unbedeutliche Zahl falsch negativer, aber auch falsch positiver Befunde vermieden werden sollen.

Summary

The „Leitlinien“ deal with practical aspects of exercise testing and are intended to give some guidelines to the practicing physician. Since the test ought to be supervised and actually conducted by a physician, its applicability is limited by the fact that it is a time consuming and highly specialized procedure, rather than by the costs of equipment and space. Most common are continuous exercise tests on a bicycle-ergometer or treadmill with linear or stepwise increase of power. In the „symptomlimited maximal“ exercise test, in the absence of other absolute indications for stopping, the patient himself terminates exercise for symptomatic reasons. In all other testing procedures, the end of exercise may be

determined arbitrarily by the supervisor. The interpretation of the test may relate to function, diagnosis and prognosis. It should be based on the synopsis of all findings during submaximal and symptomlimited maximal exercise, in relation to the respective work levels and in absolute terms, such as maximal aerobic power or maximal heart rate. The exercise EKG may contribute a great deal but should not be interpreted isolated from other equally important findings.

1. Einleitung

Besonders die kardiologische Diagnostik wird wesentlich bereichert, wenn Untersuchungen nicht nur unter Ruhebedingungen, sondern auch bei körperlicher Arbeit erfolgen. Voraussetzung für eine zweckentsprechende und sinnvolle Anwendung solcher Arbeitsversuche ist eine Methodik, die — mit geringem Risiko für die Testperson verbunden — eine günstige Relation zwischen Aufwand und Aussagekraft gewährleistet. Diesen Anforderungen wird die Ergometrie gerecht. Sie ist seit einigen Jahrzehnten klinisch etabliert und viele Aspekte sind weitgehend abgeklärt. Manche Punkte wurden jedoch erst in den letzten Jahren in ein neues Licht gerückt und gewisse Probleme sind noch immer offen.

Die vorliegenden Leitlinien sollen die heute gültigen Grundlagen für die praktische Anwendung der Ergometrie und ihre Auswertung umreißen, aber auch die Konsequenzen berücksichtigen, die sich aus dem neuerlichen Überdenken mancher Punkte ergaben.

In einem straffen Gerüst sollen die wichtigsten Gesichtspunkte zusammengestellt und jeweils kommentiert sowie durch Tabellen und Abbildungen ergänzt werden. Glossar und Literaturangaben mögen für das einheitliche Verständnis einiger verwendeter Ausdrücke und für die weitere Beschäftigung mit dem Thema nützlich sein.

2. Indikationen für die Ergometrie

Die Ergometrie kann indiziert sein zur:

- 2.1. Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Herzkreislaufsystems beim kardiopulmonal „Gesunden“ (z. B. in Sport- und Arbeitsmedizin, Epidemiologie).
- 2.2. Reproduktion anamnestisch angegebener Symptome und zu ihrer diagnostischen Einordnung, insbesondere bei Brustschmerzen, Belastungsdyspnoe, Zyanose, Störungen der Herzschlagfolge bei Belastung, Leistungsknick usw.
- 2.3. Sicherung oder zum Ausschluß einer Verdachtsdiagnose wie koronarer Herzkrankheit und zur weiteren Abklärung pathologischer Ruhebefunde wie Hypoxämie und Hyperkapnie.
- 2.4. Messung einer Leistungseinschränkung und Beurteilung der limitierenden Mechanismen bei organischen Herz- bzw. Kreislaufkrankheiten.

2.4.1. Bei (degenerativen) Kardiopathien diverser Genese, wie koronarer Herzkrankheit und primären und sekundären Myokardiopathien inklusive Folgestadien nach Myokarditis.

2.4.2. Bei bestimmten Herzklappenfehlern.

2.4.3. Bei pulmonaler Hypertension.

2.4.4. Bei arteriellen Verschlusskrankheiten.

2.5. Messung einer Leistungseinschränkung und Beurteilung der limitierenden Mechanismen bei funktionellen kardiovaskulären Regulationsstörungen:

2.5.1. Bei hypertoner Kreislaufregulationsstörung.

2.5.2. Bei hyperkinetischem Herzsyndrom (bzw. neurozirkulatorischer Asthenie).

2.5.3. Bei anderen vegetativen Fehlsteuerungen (vegetativer Ruhetachykardie, hypotoner Kreislaufregulationsstörung usw.).

2.6. Überwachung und Beurteilung von Interventionen, wie:

2.6.1. Training.

2.6.2. Kardiovaskulären Präventiv- und Rehabilitationsmaßnahmen.

2.6.3. Kardiovaskulären Operationen.

2.6.4. Therapie mit herz- bzw. kreislaufwirksamen Pharmaka.

Kommentar

Die Aufzählung und Gruppierung der Indikationen ist sicher problematisch. Wenn wir trotzdem den Versuch unternommen haben, dann mit dem Ziel, eine Basis für Kommentar und Diskussion zu schaffen. Die Indikation ergibt sich bei den verschiedensten Fragestellungen. Sie sollte aber stets unter Abwägen von Aufwand und Risiko einerseits und Aussagekraft bzw. Nutzen andererseits gestellt werden. Neben der Beurteilung der Leistungsfähigkeit Gesunder und Kranker gehört die Abgrenzung organischer und funktioneller kardiovaskulärer Störungen, insbesondere auch die (frühe) Diagnose der koronaren Herzkrankheit, zu den Domänen der Ergometrie. Manchmal ist eine solche Abgrenzung nicht bei der Erstuntersuchung, sondern erst aus dem Effekt von Interventionen wie Training einerseits und medikamentöser Therapie andererseits zu erwarten.

Als Beispiel für die Möglichkeit, bei der Ergometrie Rückschlüsse auf den Mechanismus einer Leistungseinschränkung zu erhalten, kann etwa das Auftreten der subjektiven Zeichen von Dyspnoe und anginösem Schmerz zusammen mit Ischämiezeichen im EKG bei bis zum Einsetzen dieser Symptome normalen Arbeitsreaktionen angeführt werden. Als Mechanismus, der unter anderem durch Messung des linksventrikulären enddiastolischen Druckes objektivierbar ist, kann in diesem Fall die Limitierung der Pumpleistung des linken Ventrikels durch akute ischämiebedingte Dysfunktion angenommen werden.

3. Kontraindikationen für die Ergometrie

3.1. Absolute Kontraindikationen:

- 3.1.1. Frischer Myokardinfarkt.
- 3.1.2. Zunehmende schwere („instabile“) Angina pectoris bzw. „drohender Infarkt“.
- 3.1.3. Rezente Myokarditis.
- 3.1.4. Schwere, nicht beherrschte Rhythmusstörungen (ventrikuläre Extrasystolie in Salven oder gehäufte multiforme ventrikuläre Extrasystolen, tachykardes Vorhofflimmern oder -flattern, supraventrikuläre oder ventrikuläre Tachykardie).
- 3.1.5. Manifeste Bronchospasmus.
- 3.1.6. Schwere (akute) Krankheiten, wie fieberhafte Infekte, Thrombophlebitiden, frische Embolien im großen und kleinen Kreislauf, metabolische Entgleisungen (Diabetes mellitus, renale Insuffizienz, Thyreotoxikose u. a.), respiratorische Insuffizienz, Aneurysma dissecans.

3.2. Relative Kontraindikationen:

- 3.2.1. Herzinsuffizienz.
- 3.2.2. Gehäufte (multiforme) Extrasystolen.
- 3.2.3. AV-Blockierungen II. und III. Grades, vollständiger Linksschenkelblock.
- 3.2.4. Aortenstenose, Pulmonalstenose.
- 3.2.5. Herzwandaneurysma (nach Herzinfarkt).
- 3.2.6. Arterielle Hypertonie (Ruhewerte über 200/120 mm Hg).
- 3.2.7. Anämie (Hb unter 7 g%).
- 3.2.8. Mangelnder Wille zur Mitarbeit, Erregungszustände oder psychische Ausnahmesituationen des Probanden.
- 3.2.9. Störungen des Bewegungsapparates.

Kommentar

Es sind die wichtigsten bzw. häufigsten Kontraindikationen angeführt, doch gilt auch hier, daß die Zuweisung zur Ergometrie und ihre Durchführung selbstverständlich der ärztlichen Entscheidung im Einzelfall unterliegt. Grundsätzlich kann gesagt werden, daß ein Arbeitsversuch wohl nie kontraindiziert sein kann, wenn er nur eine Belastungsintensität beinhaltet, der der Proband in seinem täglichen Leben unterworfen ist. Nach einem Herzinfarkt führen wir eine orientierende Ergometrie im allgemeinen frühestens nach Ablauf von 3 Wochen durch, eine Ausbelastung frühestens nach Ablauf von 3 Monaten. Diesen 3monatigen Abstand halten wir auch nach abgelaufener Myokarditis, also nach Normalisierung der entsprechenden Befunde, ein.

Günstig ist ein Zuweisungsformular, dessen Ausfüllen eine Stellungnahme des zuweisenden Arztes zu den wichtigsten Kontraindikationen erfordert (Abb. 1).

4. Voraussetzungen für die Durchführung der Ergometrie

4.1. Räumliche und apparative Minimalvoraussetzungen:

- 4.1.1. Raumtemperatur im allgemeinen unter 25° C, relative Luftfeuchtigkeit möglichst unter 60%.
- 4.1.2. Geeichtes Ergometer.
- 4.1.3. EKG-Einrichtung, Blutdruckmeßgerät und Stethoskop.
- 4.1.4. Defibrillator, Atembeutel und Sauerstoff zur Beatmung, Notfallmedikamente (Tab. 1).

4.2. Personelle Voraussetzungen:

- 4.2.1. Anwesenheit oder unmittelbare Erreichbarkeit des mit der Ergometrie befaßten Arztes.
- 4.2.2. Hinsichtlich Methodik, Erkennens von Abbruchkriterien und möglichen Zwischenfällen sowie hinsichtlich Verhaltens im Notfall (Reanimation, insbesondere äußere Herzmassage, Mund-zu-Mund-[Nase-]Beatmung) geschultes Personal.

Tab. 1. Für den Notfall (Reanimation) erforderliche Medikamente.

| |
|---|
| Amp. Orciprenalin à 0,5 mg (à 1 ml) (Alupent®) |
| Amp. Orciprenalin à 5,0 mg (à 10 ml) (Alupent®) |
| Amp. Na-bikarbonat à 20 ml (1 mval Na-bikarbonat/1 ml) |
| Amp. Tris à 100 ml, 0,3 molar |
| Fl. Na-bikarbonat à 100 ml (1 mval/ml) |
| Fl. Kalziumchlorid 1% à 100 ml |
| Amp. Kaliumchlorid à 20 ml (1 mval Kaliumchlorid/1 ml) |
| Amp. Angiotensin I à 2,5 mg (Trockenampullen) (Hypertensin „Ciba“®) |
| Amp. Angiotensin I à 0,5 mg (Trockenampullen) (Hypertensin „Ciba“®) |
| Fl. Humanalbumin 20% 2mal 100 ml |
| Fl. Mannit 20%, 100 ml |
| Amp. Sorbit 40% à 20 ml |
| Amp. Na-Chloridlösung 0,9% à 100 ml |
| Amp. Prednisolon-Natrium-Succinat 25 mg (Trockenampullen) |
| Amp. Digitalisglykosid |
| Amp. Furosemid à 20 mg (à 2 ml) (Lasix®) |
| Ethacrinsäure + Mannit-Trockenampullen (Edecrin®) |
| Lidocain, 2%ige Injektionslösung (Xylocain®) |
| Plasmaexpander |

Kommentar

Annähernd konstante Temperatur und Luftfeuchte sind unter anderem aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Testergebnisse von einer gewissen Bedeutung. Wichtig ist die periodische Eichung des Ergometers, die allerdings beim elektromagnetisch gebremsten Fahrradergometer einen größeren Aufwand erfordern kann, während sie beim Laufbandergometer jederzeit auf einfache Weise durchführbar ist. Nur exakt geeichte Geräte gewährleisten eine entsprechende Anzeigegenauigkeit für die erbrachte Leistung.

Zuweisung zur Ergometrie

(Ausgefüllt am: 197.....)

Zuweisende Stelle:

Zuweisender Arzt:

Name: Vorname:

Alter: Jahre

Diagnose: gesund

Bitte alle Diagnosen anführen:

.....

.....

Anamnese (Zutreffendes bitte ankreuzen):Angina pectoris Atypische Brustschmerzen Herzinfarkt

wann letzter Infarkt:

Claudicatio intermittens Hat Patient **derzeit**:

| | ja | nein |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Myokarditis | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| „Unstable“ Angina pectoris | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Befunde:

Ruhe-EKG (Datum:):

Thoraxröntgen (Datum:):

..... Hb: g%

Medikamente:

| | ja | nein | Name des Medikamentes | Med. abgesetzt seit |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|
| Digitalis | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| Nitro | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| Beta-Blocker | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| Antiarrhythmikum | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| Antihypertensivum | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| Andere | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |

Fragestellung:

.....

..... Unterschrift:

Abb. 1. Zuweisungsformular.

Mechanisch oder elektromagnetisch gebremste Fahrradergometer für Belastungen im Sitzen oder im Liegen und motorbetriebene Laufbandergometer sind die gebräuchlichsten Geräte für Belastungstests. *Kaltenbach* propagiert die Verwendung der Kletterstufe. Beim 2-Stufen-Test nach *Master* wurde versucht, eine Standardisierung nach Stufenhöhe, Schrittgeschwindigkeit und Körperposition der Testperson zu erreichen. Dieser oder ähnliche Tests sollten jedoch nicht mehr oder nur mehr dort, wo ein Ergometer nicht zur Verfügung steht, angewendet werden. Der 2-Stufen-Test nach *Master* erfordert eine Sauerstoffaufnahme von etwa 22 ml/kg/min. Damit werden manche Personen überfordert, andere nicht ausreichend belastet. So ist dieser Test für die Diagnose und vor allem Frühdiagnose der koronaren Herzkrankheit nicht geeignet.

Zur Aufzeichnung des EKGs genügt ein Einkanalsschreiber, doch dürfte ein Drei- oder Vierkanalschreiber am zweckmäßigsten sein. Günstig ist die Verwendung eines Oszilloskops, das die laufende Beobachtung des EKGs ermöglicht.

Die Anwesenheit des Arztes ist einerseits aus Gründen der Sicherheit für die Testpersonen notwendig, andererseits ist auch nur dann ein optimaler Nutzeffekt aus dem Test zu ziehen, wenn die Reaktionen und Symptome des Probanden während des Tests durch den Arzt ständig beobachtet werden können. Bei epidemiologischen und anderen Untersuchungen klinisch kardiopulmonal „Gesunder“ unter 30 Jahren mag es vertretbar sein, die Durchführung des Tests geschultem nichtärztlichem Personal zu überlassen, doch muß auch hier bei Zwischenfällen ein Arzt rasch erreichbar sein.

5. Praktische Durchführung der Ergometrie

5.1. Vorbereitung:

5.1.1. Information des Probanden über Art und Zweck der Untersuchung.

5.1.2. Kurze Anamnese und gezielte physikalische Untersuchung sowie Interpretation eines am Testtag geschriebenen Ruhe-EKGs mit 12 Ableitungen durch den für die Untersuchung verantwortlichen Arzt.

5.1.3. Anlegen eines Testprotokolls (Abb. 2).

5.2. Belastungsmodus:

5.2.1. Kontinuierlicher Test (ohne Ruhepausen):

5.2.1.1. „Rektanguläre“ Belastung in einer Belastungsstufe.

5.2.1.2. Linear ansteigende Belastungsintensität, etwa 10 bis 15 Watt pro Minute („triangulärer“ Test).

5.2.1.3. In Stufen ansteigende Belastungsintensität („rektangulär-progressiver“ Test).

5.2.1.3.1. Fahrradergometrie: z. B. Beginn mit 20 bis 100 Watt, Steigerung der Belastung alle 2, 3 oder 4 Minuten um 20 bis 50 Watt.

5.2.1.3.2. Laufbandergometrie: z. B. nach den Angaben von *Bruce* (6).

5.2.2. Diskontinuierlicher Test (mit Ruhepausen).

5.3. Beobachtung und Dokumentation der Meßwerte bzw. Arbeitsreaktionen:

5.3.1. Obligatorisch: Leistung (kpm/min bzw. Watt), Herzfrequenz (HF), Blutdruck (BD), EKG und Symptomatik während und bis mindestens 5 Minuten nach Belastung.

5.3.2. Fakultativ: Wahrgenommener Ermüdungsgrad (PER) (4), Sauerstoffaufnahme, Sauerstoffpuls, Atemminutenvolumen, Atemäquivalent für Sauerstoff, respiratorischer Quotient, arterieller Sauerstoffdruck, arterieller Kohlendioxiddruck, Basenüberschuß, Herzminutenvolumen (HMV) und Blutdruck im kleinen Kreislauf.

5.4. Abbruch der Belastung:

5.4.1. Bei Erreichen der subjektiven Leistungsgrenze, d. h. sobald der vorher entsprechend instruierte Patient wegen Erschöpfung oder anderer subjektiver Symptome das Zeichen zum Abbruch gibt.

5.4.2. Obligatorisch (auch vor Erreichen der subjektiven Leistungsgrenze) bei:

5.4.2.1. Zunehmendem anginösem Schmerz, auch mäßiger Intensität (der mit oder ohne ischämische EKG-Veränderungen einhergehen kann).

5.4.2.2. Schwerer Dyspnoe.

5.4.2.3. Zeichen einer zerebrovaskulären Insuffizienz, wie Schwindel, Schwarzwerden vor den Augen, ataktischem Gang am Laufband usw.

5.4.2.4. Zeichen der Erschöpfung, kalt-schweißiger Haut oder Zyanose.

5.4.2.5. Mangelndem Anstieg (< 10 mm Hg) des systolischen BD über den Ruhewert oder sogar Abfall unter den Ruhewert.

5.4.2.6. Anstieg des arteriellen BD über 120 mm Hg diastolisch oder 260 mm Hg systolisch.

5.4.2.7. Supraventrikulären und ventrikulären Anfallstachykardien, Salven von 3 oder mehr ventrikulären Extrasystolen, Auftreten zahlreicher oder polymorpher ventrikulärer Extrasystolen, R/T-Phänomen.

5.4.2.8. Auftreten eines AV-Blockes II. oder III. Grades.

5.4.2.9. Auftreten monophasischer ST-Hebungen als Läsionszeichen (nicht über Schwielenarealen).

5.4.3. Fakultativ bei Erreichen einer vor dem Test festgelegten Zielgröße, wie etwa einer bestimmten Leistung, HF oder ST-Senkung.

Kommentar

Vor dem Test ist sein Zweck zu formulieren. Der für die Untersuchung verantwortliche Arzt muß ein Bild über den gegenwärtigen Zustand des Probanden gewin-

nen. Dazu gehören Fragen nach dem Trainingszustand ebenso wie nach ausreichender Nachtruhe und subjektivem Befinden am Testtag. Dem Arbeitsversuch darf keine schwere physische Arbeit vorausgegangen sein und ein gewisser Abstand nach Nahrungsaufnahme und Konsum von Alkohol, Kaffee, Tee oder Nikotin sollte eingehalten werden (Anhaltspunkt: mindestens etwa 2 Stunden), da sonst das Testergebnis unverwertbar sein kann. Ebenso sollte die Einnahme von Medikamenten, die einen Einfluß auf die Arbeitsreaktionen haben können, berücksichtigt bzw. in einem angemessenen Zeitraum vor dem Test vermieden werden (siehe Tab. 2).

Tab. 2. Medikamente, die das Testergebnis beeinflussen können.

1. *Digitalis*: ST-Senkung als Ischämiezeichen (besonders bei Kammerhypertrophie) nicht sicher verwertbar. Außerdem AV-Leitungsstörungen sowie Rhythmusstörungen (besonders bei gleichzeitiger Hypokaliämie) möglich. Daher, wenn möglich, absetzen (Digitoxin 2 Wochen, andere herzwirksame Glykoside 1 Woche vor dem Test).
2. *β-Rezeptoren-Blocker*: Anstieg von Herzschlagfrequenz und arteriellem Druck während des Tests nicht sicher verwertbar. Daher, wenn möglich, 2 Tage vor dem Test absetzen.
3. *Antiarrhythmika* (wie Chinidin, Ajmalin usw.): Können ST-T-U-Veränderungen bewirken, EKG daher nur bedingt verwertbar.
4. *Diuretika*: Durch verstärkte Kaliurese können Kontraktilität bzw. Kraft der Skelettmuskulatur herabgesetzt werden, daher eventuell nicht volle Belastbarkeit. Außerdem erschweren hypokaliämiebedingte ST-T-Veränderungen die EKG-Beurteilung unter Arbeit.
5. *Reserpin*: Entleerung der Noradrenalinspeicher kann eine Leistungsminderung zur Folge haben.

Das Gespräch mit dem Probanden vor dem Test soll außerdem auf sein Verständnis für die Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit des Arbeitsversuches, die Art seiner Durchführung, die mögliche Symptomatik und Komplikationen und besonders auch für die Abbruchkriterien abzielen.

Die EKG-Elektroden können geklebt oder am Oberkörper mittels Gummigürtel angepreßt werden. In beiden Fällen sind die Hautstellen vorher mit Alkohol- oder Äther-getränkten Tupfern zur Verminderung des Hautwiderstandes kräftig abzureiben. Kann nur eine EKG-Ableitung geschrieben werden, so ist V 5 bzw. eine bipolare Ableitung mit einer (Linker-Arm-)Elektrode in der V 5-Position und der zweiten (Rechter-Arm-)Elektrode am Manubrium sterni (Ableitung CM 5) oder über dem Angulus inferior der rechten Skapula (CB 5) verwendbar. Besser ist es, simultan oder eventuell hintereinander 3 oder mehr Ableitungen aufzuzeichnen, zu denen mindestens V 5, V 4 und V 2 oder V 1 gehören sollten. Bei Verwendung von Brustwandableitungen nach

Wilson können die 4 Extremitätenelektroden am Rücken statt an den Extremitäten angeklebt oder angepreßt werden.

Optimal ist die (simultane) Registrierung aller 12 Ableitungen. Dazu können die Extremitätenelektroden rechts und links lateral knapp infraklavikulär und über der rechten und linken Crista iliaca geklebt werden. Eine weitere optimale Lösung mag die Verwendung der Frankeschen orthogonalen Ableitungen (mit der Möglichkeit, die 12 Ableitungen zu „synthetisieren“) darstellen.

Bei der Wahl des *Belastungsmodus* sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Arbeitsreaktionen wäre die einheitliche Durchführung der Ergometrie wünschenswert. Die verschiedenen Methoden haben jedoch gewisse Vor- und Nachteile, die berücksichtigt werden müssen. Unterschiedliche klinische Erfordernisse bei den diversen Fragestellungen werden daher ihren Niederschlag auch in methodischen Varianten finden. Aus den früher angeführten Gründen beziehen wir uns hier nur auf Fahrrad- und Laufbandergometerarbeit.

Prinzipiell kann ein Maximum an Information dann erwartet werden, wenn in ansteigender Intensität bis zur Leistungsgrenze belastet wird (maximale Belastung oder Ausbelastung). Beim *symptomlimitierten* = *maximalen Test*¹⁾ wird dann abgebrochen, wenn die vorher entsprechend instruierte Testperson wegen Erschöpfung oder anderer subjektiver Symptome dazu das Zeichen gibt oder wenn ein obligatorisches Abbruchkriterium (siehe Punkt 5.4.2) erreicht wird. Bei Berücksichtigung der Vorsichtsmaßnahmen (Kontraindikationen, Überwachung des Tests durch den Arzt, sorgfältige Beobachtung der Arbeitsreaktionen und Erkennen von Abbruchkriterien, Notfallausrüstung) ist das Testrisiko niedrig (unter 1 : 10.000 hinsichtlich Mortalität) (17).

Allen anderen Testprotokollen ist gemeinsam, daß die Belastung auch dann abgebrochen wird, wenn eine bestimmte Zielgröße (siehe 5.4.3) erreicht ist. Die am häufigsten verwendete Zielgröße ist eine bestimmte Herzfrequenz, die im allgemeinen um 85% der altersentsprechenden „maximalen Sollfrequenz“ gewählt wird (siehe Abb. 3). Manche Untersucher verwenden diese Zielgröße generell als Abbruchkriterium und verzichten damit in einem Teil der Fälle auf die (symptomlimitierte) Ausbelastung, begnügen sich also mit einer *submaximalen* Belastung, während sie andere Testpersonen, besonders auch koronar Herzkrankte, deren erreichbare Herzfrequenz oft unter der Norm liegt, tatsächlich maximal (symptomlimitiert) belasten.

Eine weitere Möglichkeit, das Testprotokoll zu gestalten

¹⁾ Streng definiert ist nur die maximale Sauerstoffaufnahme als Kenngröße der maximalen aeroben Leistung. Im folgenden werden jedoch die Begriffe maximale Leistung und maximaler Test den unten definierten Begriffen der symptomlimitierten Leistung und des symptomlimitierten Tests gleichgesetzt.

ten, findet besonders beim „orientierenden“ Test Anwendung, also z. B. dann, wenn bei einem Infarktpatienten innerhalb der ersten 3 Monate nach dem Herzinfarkt festzustellen ist, ob ihm eine bestimmte Tätigkeit, etwa Stiegensteigen, zugemutet werden kann. Zu diesem Zweck, aber auch zum Screening oder bei epidemiologischen Untersuchungen, können vor dem Test eine oder

sollten. Wenn ja, sind Stufen von mindestens 4, besser 6 Minuten Dauer zu wählen. Diese Forderung erschwert jedoch ein zweckmäßiges Herantasten an die Leistungsgrenze bei vertretbarem Zeitaufwand, so daß oft, insbesondere in Sportmedizin und Kardiologie, darauf verzichtet und eine Dauer der Belastungsstufen von 1, 2 oder 3 Minuten gewählt wird. Je nach der aus der Ana-

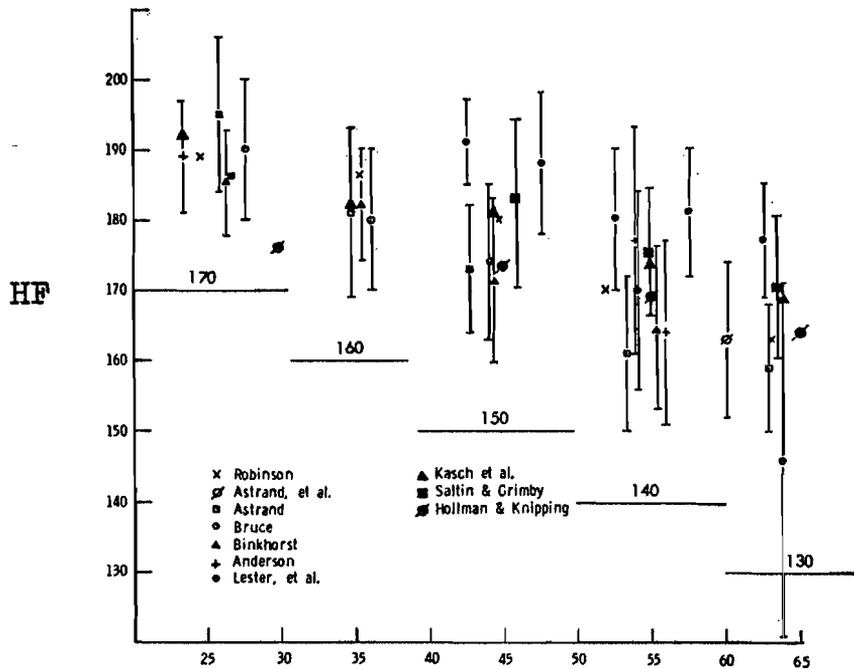


Abb. 3. Verhalten der maximalen Herzfrequenz in Beziehung zum Alter (nach K. L. Andersen u. Ma.). Die Angaben stammen von Arbeiten aus nordamerikanischen und europäischen Zentren. Die HF wurden bei gesunden männlichen Personen unter verschiedenen Untersuchungsbedingungen, die die Kriterien für eine „maximale“ Belastung ausreichend erfüllen, gemessen. Die vertikalen Linien geben die Standardabweichung ($\pm 1 SD$) wieder. Die horizontalen Linien deuten die mittleren Sollherzfrequenzen für Arbeitsversuche je nach Alter nach den Angaben des „Scandinavian Committee on ECG Classification“ an.

mehrere Leistungsstufen festgesetzt werden. Die Belastung wird nach deren Absolvierung (oder schon vorher bei Auftreten absoluter Abbruchkriterien) beendet.

Immer aber — dies gilt für jedes Testprotokoll — ist anzustreben, die Belastung auf einem Leistungsniveau zu beginnen, das sicher unter der Leistungsgrenze des Probanden liegt. Sie sollte jedoch in einer realistischen Beziehung zu seinen Alltagsbelastungen stehen. Eine eventuelle Steigerung der Belastung kann dann beim diskontinuierlichen Test mit Pausen von Minuten bis Tagen zwischen den einzelnen Belastungsstufen erfolgen. Aus praktischen (Zeit-)Gründen wird im allgemeinen aber ein *kontinuierlicher Test* (ohne Ruhepausen während des Tests) gewählt. Die Zunahme der Belastung, meist durchschnittlich etwa 10 bis 15 Watt pro Minute, erfolgt hier linear oder in Stufen. Dabei ist zu bedenken, daß der Test möglichst nicht kürzer als 5 Minuten und aus Gründen des Zeitaufwandes, der Erschöpfung der Energievorräte der Testperson und der Zunahme seiner Körpertemperatur nicht länger als 18 Minuten dauern sollte.

Weiters ist die Frage zu stellen, ob auf den einzelnen Leistungsstufen die Messungen bei Ergostase erfolgen

mnese zu erwartenden Leistungsfähigkeit des Probanden wird z. B. bei einer Leistungsstufe von 20 bis 100 Watt begonnen und dann nach jeweils 2 oder 3 Minuten um 20 bis 50 Watt gesteigert. Hier besteht immer noch die Möglichkeit, die letzte oder nahezu letzte Belastungsstufe auf eine Dauer von 4 bis 6 Minuten auszudehnen, um die Messungen während Ergostase zu erhalten.

Die Wahl der Körperposition des Probanden am Fahrradergometer richtet sich nach rein praktischen Gesichtspunkten. Es ist an sich gleichgültig, ob im Liegen oder im Sitzen belastet wird, wenn die Besonderheiten der Hämodynamik in der Beurteilung berücksichtigt werden. Hämodynamische Untersuchungen mit Herzkatheterismus sind am liegenden Probanden leichter durchzuführen. Für Routineuntersuchungen ist aber die Belastung im Sitzen für die Testperson bequemer.

Blutdruck und Herzfrequenz werden im allgemeinen am Ende jeder Belastungsstufe gemessen, während die Beobachtung der Testperson während des ganzen Tests erforderlich ist. Das EKG sollte am besten am Sichtschirm jederzeit zumindest in einer Ableitung beurteilbar sein und aufgezeichnet werden können. Üblicherweise

wird in jeder Minute ein Streifen geschrieben. Die Messungen erfolgen noch mindestens bis 5 Minuten nach Belastungsende, da nicht selten in diesem Zeitraum wichtige Arbeitsreaktionen (z. B. ischämische Spätreaktionen im EKG bei koronarer Herzkrankheit) zu beobachten sind. Bei Weiterbestehen pathologischer Veränderungen, etwa im EKG, ist gegebenenfalls der Beobachtungszeitraum bis zum Wiedererreichen der Ausgangswerte auszuweiten. In jedem Fall ist es günstig, die Testperson erst nach etwa 15 bis 30 Minuten endgültig aus der Aufsicht zu entlassen.

6. Leitgrößen und Ausbelastungskriterien

6.1. Leitgrößen:

6.1.1. Leistung (kpm/min bzw. Watt) bzw. Sauerstoffaufnahme.

6.1.2. Herzfrequenz.

6.1.3. Respiratorischer Quotient.

6.1.4. Atemäquivalent für Sauerstoff.

6.2. Ausbelastungskriterien:

6.2.1. Abflachen oder Plateau der Sauerstoffaufnahme.

6.2.2. Altersentsprechende Sollherzfrequenz (Abb. 3).

6.2.3. Basenüberschußdifferenzwert (Δ BE) über 5 mÄ/l.

Kommentar

Als Leitgrößen bezeichnen wir jene objektiven Meßdaten, die einen gewissen Aufschluß über das Ausmaß der Belastung der Testperson in Relation zu ihrer Leistungsfähigkeit zu geben vermögen. Da maximale (aerobe) Leistung und maximale Herzfrequenz über begrenzte Zeiträume, in denen keine wesentlichen Eingriffe, wie Training, Krankheit oder medikamentöse Therapie, erfolgen, praktisch konstant bleiben, sind die jeweilige Herzfrequenz und insbesondere die jeweilige (aerobe) Leistung bzw. (geschätzte) Sauerstoffaufnahme dann die verlässlichsten Leitgrößen, wenn das Ergebnis eines (zu lange zurückliegenden) maximalen bzw. symptomlimitierten Tests vorliegt.

Sind die Maximalwerte des Probanden nicht bekannt, mag mit gewissen Einschränkungen trotzdem die Herzfrequenz als Leitgröße herangezogen werden. Dabei sind jedoch große individuelle Unterschiede im Frequenzverhalten auch gleichaltriger Normalpersonen zu bedenken. Ob z. B. eine bestimmte HF 60% oder 80% der erreichbaren HF der Testperson bedeutet, ist nur zu entscheiden, wenn diese einmal maximal bzw. symptomlimitiert belastet wurde. Die Kenntnis dieser Tatsache ist wichtig, wenn eine bestimmte HF als Zielgröße verwendet wird, besonders wenn es sich nicht um die Untersuchung Kreislaufgesunder, sondern Herzkranker handelt, deren erreichbare (= maximale) Herzfrequenz oft krankheitsbedingt eingeschränkt ist.

Wird der respiratorische Quotient als Leitgröße herangezogen, so ist zu bedenken, daß er von der Art der Ernährung beeinflusst werden kann. In der Kurve für das Atemäquivalent findet sich der Knick zwischen ab- und ansteigendem Schenkel (bei Normalpersonen) bei etwa 60% der maximalen aeroben Leistung.

Wird ein Test vom Patienten aus uncharakteristischen subjektiven Gründen, wie etwa Schwäche der Beinmuskulatur am Fahrradergometer, abgebrochen, so ist aus den angeführten Meßdaten mit den genannten Einschränkungen doch ein gewisser Rückschluß auf den Grad der erzielten relativen Kreislaufbelastung möglich. Im oben angeführten Fall kann eine Wiederholung des Tests am Laufbandergometer, auf dem Schwäche oder Schmerzen der Beinmuskulatur sowie Koordinationsschwierigkeiten seltener als am Fahrradergometer vorkommen, zweckmäßig sein.

Werden die „Ausbelastungskriterien“ erreicht, so kann angenommen werden, daß der Proband an die Grenze seiner aeroben Leistungsfähigkeit herankam. Eindeutig objektivierbar ist das Erreichen dieser Grenze durch Messung der Sauerstoffaufnahme. Wenn sie abflacht und ein Plateau bildet, geht eine weitere Leistungssteigerung, die dann nur mehr kurzfristig möglich ist, auf Kosten des anaeroben Metabolismus.

7. Befundung

Zur synoptischen Beurteilung stehen zur Verfügung:

7.1. Leistung.

7.1.1. Maximale Leistung (Normalwerte: Tab. 3 und Abb. 4).

7.1.1.1. Maximale Leistung in Watt oder kpm/min (gemessen).

7.1.1.2. Maximale aerobe Leistung, repräsentiert durch die maximale Sauerstoffaufnahme (gemessen oder geschätzt) (siehe Tab. 4 und 5 sowie Abb. 5).

7.1.2. Leistung in Relation zur Herzfrequenz: PWC 170 gemessen oder extrapoliert (Normalwerte für Männer 2,5 bis 3,5 Watt/kg, für Frauen 2,0 bis 3,0 Watt/kg) (19).

7.2. Herzfrequenz.

7.2.1. Maximale Herzfrequenz (Abb. 3).

7.2.2. Differenz zwischen Ruheherzfrequenz und maximaler Herzfrequenz (Δ HF) (6).

7.2.3. Herzfrequenzverhalten in Relation zur Leistungskurve.

7.3. Arterieller Blutdruck.

7.3.1. Blutdruck bei maximaler Leistung (1).

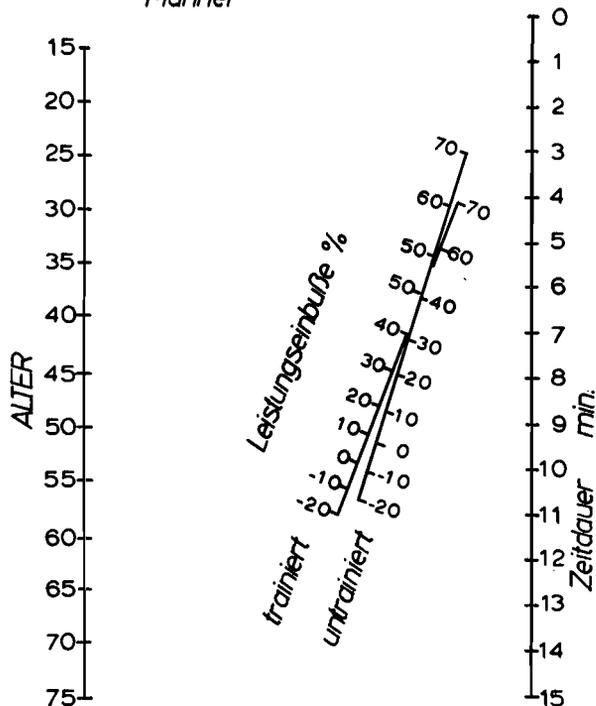
7.3.2. Differenz zwischen Ruheblutdruck und Blutdruck bei maximaler Leistung (Δ BD) (6).

7.3.3. Blutdruckanstieg in Relation zur Zunahme der Leistung.

Tab. 3. Normalwerte der Leistungsfähigkeit (in Watt) am Fahrradergometer, modifiziert nach M. Arstila (1). Die Daten wurden bei herzfrequenzgesteuerten triangulären Tests bei dem PER-Wert (siehe Glossar) 19 erhoben. Sie sind daher für andere Testprotokolle nur bedingt bzw. annäherungsweise heranzuziehen.

| Gewicht | Alter | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 20—24 | 25—29 | 30—34 | 35—39 | 40—44 | 45—49 | 50—54 | 55—59 | 60—64 | |
| <i>Männer</i> | | | | | | | | | | |
| 60—61 | 215 | 205 | 195 | 184 | 174 | 164 | 152 | 143 | 133 | |
| 62—63 | 218 | 207 | 197 | 187 | 177 | 166 | 156 | 146 | 134 | |
| 64—65 | 220 | 210 | 200 | 184 | 179 | 169 | 159 | 148 | 138 | |
| 66—67 | 223 | 213 | 202 | 192 | 182 | 172 | 161 | 151 | 141 | |
| 68—69 | 226 | 215 | 205 | 195 | 184 | 174 | 164 | 154 | 143 | |
| 70—71 | 228 | 218 | 208 | 197 | 187 | 177 | 166 | 156 | 146 | |
| 72—73 | 231 | 221 | 210 | 200 | 190 | 179 | 169 | 159 | 148 | |
| 74—75 | 234 | 223 | 213 | 203 | 192 | 182 | 172 | 161 | 151 | |
| 76—77 | 236 | 226 | 216 | 205 | 195 | 185 | 174 | 164 | 154 | |
| 78—79 | 239 | 228 | 218 | 208 | 198 | 187 | 177 | 167 | 156 | |
| 80—81 | 241 | 230 | 221 | 210 | 200 | 190 | 180 | 169 | 159 | |
| 82—83 | 244 | 234 | 223 | 213 | 203 | 193 | 182 | 172 | 162 | |
| 84—85 | 248 | 236 | 226 | 216 | 205 | 195 | 185 | 175 | 164 | |
| 86—87 | 249 | 239 | 230 | 218 | 208 | 198 | 187 | 177 | 167 | |
| 88—89 | 252 | 243 | 231 | 221 | 211 | 200 | 190 | 180 | 170 | |
| 90—91 | 256 | 244 | 234 | 225 | 213 | 203 | 193 | 182 | 172 | |
| 92—93 | 257 | 248 | 238 | 226 | 216 | 207 | 195 | 185 | 175 | |
| 94—95 | 261 | 249 | 239 | 230 | 220 | 208 | 198 | 189 | 177 | |
| 96—97 | 262 | 252 | 243 | 233 | 221 | 211 | 202 | 190 | 180 | |
| 98—99 | 266 | 256 | 244 | 234 | 225 | 215 | 203 | 193 | 184 | |
| 100—101 | 269 | 257 | 248 | 238 | 226 | 216 | 207 | 197 | 185 | |
| 102—103 | 270 | 261 | 251 | 239 | 230 | 220 | 208 | 198 | 189 | |
| 104—105 | 274 | 264 | 252 | 243 | 233 | 221 | 211 | 202 | 192 | |
| 106—107 | 277 | 266 | 256 | 246 | 234 | 225 | 215 | 197 | 193 | |
| 108—109 | 279 | 269 | 259 | 248 | 238 | 228 | 216 | 207 | 197 | |
| <i>Frauen</i> | | | | | | | | | | |
| 40—41 | 107 | 102 | 98 | 95 | 90 | 87 | 82 | 79 | 74 | |
| 42—43 | 108 | 105 | 102 | 97 | 93 | 89 | 85 | 82 | 77 | |
| 44—45 | 111 | 108 | 103 | 100 | 95 | 92 | 89 | 84 | 80 | |
| 46—47 | 115 | 110 | 107 | 102 | 98 | 95 | 90 | 87 | 82 | |
| 48—49 | 116 | 113 | 110 | 105 | 102 | 97 | 93 | 90 | 85 | |
| 50—51 | 120 | 116 | 111 | 108 | 103 | 100 | 97 | 92 | 89 | |
| 52—53 | 123 | 118 | 115 | 110 | 107 | 103 | 98 | 95 | 90 | |
| 54—55 | 125 | 121 | 118 | 113 | 110 | 105 | 102 | 98 | 93 | |
| 56—57 | 128 | 125 | 120 | 116 | 111 | 108 | 105 | 100 | 97 | |
| 58—59 | 131 | 126 | 123 | 118 | 115 | 111 | 107 | 103 | 98 | |
| 60—61 | 133 | 130 | 126 | 121 | 118 | 113 | 110 | 107 | 102 | |
| 62—63 | 136 | 133 | 128 | 125 | 120 | 116 | 113 | 108 | 105 | |
| 64—65 | 139 | 134 | 131 | 126 | 123 | 120 | 115 | 111 | 107 | |
| 66—67 | 141 | 138 | 134 | 130 | 126 | 121 | 118 | 115 | 110 | |
| 68—69 | 144 | 141 | 136 | 133 | 128 | 125 | 121 | 116 | 113 | |
| 70—71 | 148 | 143 | 139 | 134 | 131 | 128 | 123 | 120 | 115 | |
| 72—73 | 149 | 146 | 143 | 138 | 134 | 130 | 126 | 123 | 118 | |
| 74—75 | 152 | 149 | 144 | 141 | 136 | 133 | 130 | 125 | 121 | |
| 76—77 | 156 | 151 | 148 | 143 | 139 | 136 | 131 | 128 | 123 | |
| 78—79 | 157 | 154 | 151 | 146 | 143 | 138 | 134 | 131 | 126 | |
| 80—81 | 161 | 157 | 152 | 149 | 144 | 141 | 138 | 133 | 130 | |
| 82—83 | 164 | 159 | 156 | 151 | 148 | 144 | 139 | 136 | 131 | |
| 84—85 | 166 | 162 | 159 | 154 | 151 | 146 | 143 | 139 | 134 | |
| 86—87 | 169 | 166 | 161 | 157 | 152 | 149 | 146 | 141 | 138 | |
| 88—89 | 172 | 167 | 164 | 159 | 156 | 152 | 148 | 144 | 139 | |

Männer



Frauen

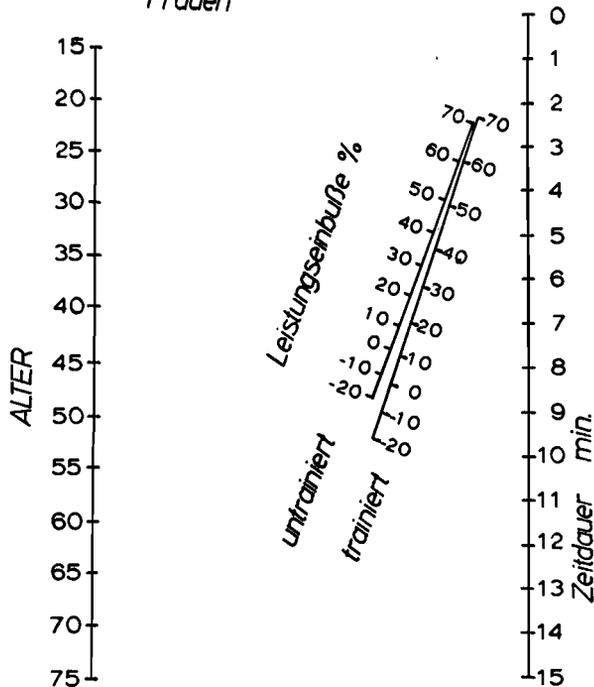


Abb. 4. Nomogramm für die Ermittlung einer LeistungseinbuÙe gegenüber der Norm in % (6). Berücksichtigung finden Geschlecht, Alter, Trainingszustand und Dauer des standardisierten Laufbandergometertests (Bruce-Test).

7.4. EKG.

7.4.1. Rhythmus.

7.4.2. Leitung.

7.4.3. ST-T.

7.5. Symptome.

7.5.1. Normale Symptomatik:

7.5.1.1. Schwitzen nach einigen Minuten Arbeit.

7.5.1.2. Allgemeine Erschöpfung.

7.5.1.3. Lauterwerden der Herztöne bei Belastung.

7.5.2. Möglicherweise pathologische Symptomatik:

7.5.2.1. Dyspnoe zusammen mit allgemeiner Erschöpfung.

7.5.2.2. „Müdigkeit“.

7.5.2.3. Beinschmerzen bei Ausbelastung.

7.5.2.4. Kollaps nach Belastung.

7.5.2.5. Leberschwellung, Zeichen pulmonaler Stauung wie Auftreten feuchter RGs über den Basen.

7.5.2.6. Zeichen zerebraler Mangel durchblutung (Schwindel, Schwarzwerden vor den Augen, ataktischer Bewegungsablauf).

7.5.3. Pathologische Symptomatik.

7.5.3.1. Angina pectoris.

7.5.3.2. Dyspnoe vor Auftreten allgemeiner Erschöpfung.

7.5.3.3. Schmerzen (zuerst) in einem Bein bei geringer Anstrengung.

7.5.3.4. Auftreten eines 3. oder 4. Herztones.

7.5.3.5. Auftreten eines Mitralinsuffizienzgeräusches.

7.5.3.6. Leiserwerden der Herztöne bei Belastung.

7.5.3.7. Zyanose.

7.6. Wenn die Analyse von Ausatemungsluft und arteriellen Blutgasen apparativ möglich ist, können zusätzlich herangezogen werden:

7.6.1. Atemminutenvolumen, AMV (l/min).

7.6.2. Sauerstoffaufnahme pro Minute, $\dot{V}O_2$ (l/min).

7.6.3. Atemäquivalent für Sauerstoff, ER_{O_2}

7.6.4. Atemäquivalent für Kohlensäure, ER_{CO_2}

7.6.5. Respiratorischer Quotient, RQ.

7.6.6. Arterieller Sauerstoffdruck, Pa_{O_2} (Torr).

7.6.7. Arterieller Kohlensäuredruck, Pa_{CO_2} (Torr).

7.6.8. Meßwerte des Säurebasenhaushaltes, wie Standardbikarbonat und Base excess.

7.7. Darüber hinaus erlaubt der Einsatz des Mikroherzkatheterismus die Messung des Blutdruckes im kleinen Kreislauf sowie die Bestimmung des Herzminutenvolumens, z. B. nach der Fick'schen Methode.

Kommentar

Zu 7.1. (Leistung): Sowohl am Fahrrad- wie auch am Laufbandergometer besteht im submaximalen Bereich eine lineare Beziehung zwischen Leistung und Sauerstoffaufnahme pro Minute (Tab. 5 und Abb. 5). Daher kann

man auf die Messung der Sauerstoffaufnahme oft verzichten, wenn ein geeichtes Ergometer und ein standardisiertes Testprotokoll verwendet werden. Im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit, in dem die anaerobe Leistung einen größeren Anteil an der Gesamtleistung hat, ist diese Beziehung nicht so verlässlich. Immerhin kann aus der maximalen Leistung in Watt oder kpm/min mit Einschränkungen und unter bestimmten Testbedingungen auf die maximale aerobe Leistung (bzw. aerobe Kapazität) geschlossen werden. Normwerte der Leistungsfähigkeit (Tab. 3 und Abb. 4) berücksichtigen Geschlecht,

auch für koronar Herzkrankte. Trotz großer individueller Unterschiede bei Normalpersonen hat sie für sich allein betrachtet diagnostische und wahrscheinlich auch prognostische Bedeutung.

Patienten mit koronarer Herzkrankheit, die bei einem symptomatisch limitierten Ergometertest eine $\dot{V}O_2$ von weniger als 17 ml Sauerstoff/kg Körpergewicht/min erreichen, leiden oft schon bei den täglichen Verrichtungen unter (anginösen) Beschwerden. Patienten, deren erzielbare $\dot{V}O_2$ über 20 ml/kg Körpergewicht/min beträgt,

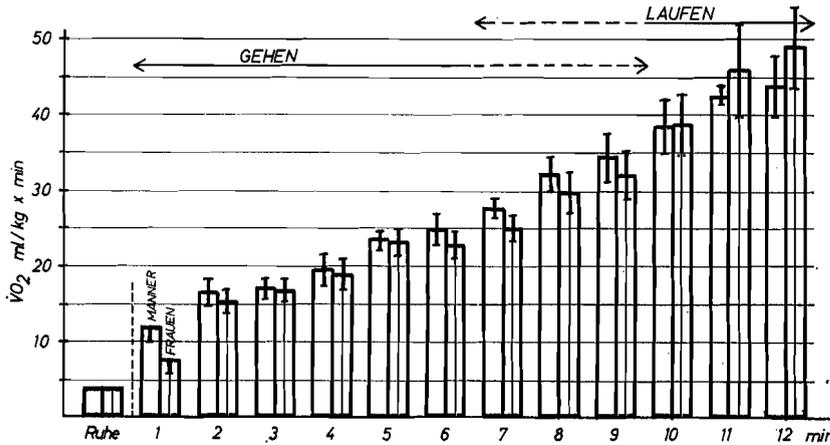


Abb. 5. Sauerstoffaufnahme Gesunder während der ersten 4 Stufen (jeweils von 3 Minuten Dauer) des Laufbandergometertests nach Bruce (6) ($M \pm 1 SD$).

Alter, Gewicht und eventuell den Trainingszustand der Testperson. Mit zunehmendem Alter sinkt die maximale Sauerstoffaufnahme (die nur bei Einsatz großer Muskelgruppen bei dynamischer Arbeit, z. B. beim Gehen und Laufen am Laufbandergometer, erreicht wird — am Fahrradergometer liegt die erreichbare Sauerstoffaufnahme im Durchschnitt um etwa 8% niedriger) als verlässlichstes Bruttokriterium der Leistungsfähigkeit annähernd linear ab, wenn nicht durch besondere Einflüsse, wie Krankheit oder Training, die Kurve verändert wird.

Da in einem weiten Leistungsbereich (entsprechend einem Herzfrequenzbereich von etwa 120 bis 160) auch eine lineare Beziehung zwischen Leistung oder Sauerstoffaufnahme auf der einen Seite und Herzfrequenz auf der anderen Seite besteht, kann aus den Herzfrequenzen bei mindestens zwei höheren Leistungsstufen auf jene Leistung geschlossen werden, bei der eine Herzfrequenz von 170 erreicht werden würde. Diese Zusammenhänge liegen der Berechnung der PWC_{170} zugrunde, eines Wertes, der besonders für die annähernde Beurteilung der (kardiozirkulatorischen) Leistungsfähigkeit Gesunder, etwa in der Sportmedizin, brauchbar ist.

Eine sichere Aussage über die tatsächliche Leistungsfähigkeit (und ein Rückschluss auf sie begrenzende Mechanismen) ist dagegen nur möglich, wenn ihre Grenzen beim Test tatsächlich erreicht werden. Dies gilt besonders

sind dagegen im allgemeinen bei leichter Tätigkeit und im täglichen Leben asymptomatisch.

Bei der Beurteilung der Arbeitsfähigkeit scheinen sich gewisse Richtlinien abzuzeichnen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Die notwendigen Spitzenleistungen sollten jenen Wert nicht übersteigen, der im Arbeitsversuch ohne pathologische Symptomatik erbracht werden kann. Anhaltspunkte für die bei verschiedenen Tätigkeiten notwendige Sauerstoffaufnahme sind aus einschlägigen Publikationen zu entnehmen (8).

Zu 7.2. (Herzfrequenz): Die Zunahme der Herzfrequenz mit linear steigender Leistung ist (zumindest im höheren Leistungsbereich) linear. Dieser Anstieg („Slope“) der Herzfrequenz beträgt im allgemeinen 5 bis 8 Schläge pro 10 Watt. Eine steile Zunahme der Herzfrequenz kann eine geringe, ein flacher Anstieg eine gute Leistungsfähigkeit anzeigen. Die maximale Herzfrequenz ist individuell verschieden (siehe Abb. 3). Mit ΔHF bezeichnen wir die Differenz zwischen Ruhfrequenz und maximal erreichter Frequenz. Sie gibt insofern einen Aufschluss über die Funktionstüchtigkeit des Herzens, als sich einerseits seine Pumpleistung aus dem Produkt von Schlagvolumen und Herzfrequenz errechnet, andererseits die Herzfrequenz eine der Determinanten des myokardialen Sauerstoffverbrauches ist. Ein Herzkranker mit kleinem Schlagvolumen tendiert daher schon in Ruhe zu einer

höheren Herzfrequenz als der Gesunde. Seine maximale Herzfrequenz kann jedoch etwa wegen Koronarinsuffizienz eingeschränkt sein. Beide Faktoren tragen zur Einschränkung von Δ HF bei.

Eine gewisse Aussage, insbesondere hinsichtlich des Trainingszustandes, ergibt sich aus dem Verhalten der Herzfrequenz nach Belastungsende. Beim gut Trainierten sinkt sie auch nach einem maximalen Test in der Erholungsphase rasch wieder ab und erreicht im allgemeinen Werte unter 120 nach 3 Minuten, wogegen beim Untrainierten oder schlecht Konditionierten ein langsamerer Rückgang zu beobachten ist.

Zu 7.3 (Blutdruck): Die genaue Messung des Blutdruckes stößt insbesondere unter körperlicher Arbeit nach wie vor auf Schwierigkeiten. Am besten bewährt sich noch immer die Druckmessung mittels aufblasbarer Oberarmmanschette und direkter auskultatorischer Feststellung der Korotkoff-Geräusche durch das Stethoskop. Bei Belastung kann so der systolische Druck einigermaßen genau gemessen werden, während die diastolischen

Tab. 4. Einstufung der körperlichen Leistungsfähigkeit für „gesunde“ männliche und weibliche Versuchspersonen auf Grund der maximalen Sauerstoffaufnahme in ml/min/kg Körpergewicht (zusammengestellt nach Amer. Heart Ass., Handbuch für Arbeitsver-suche).

| Altersgruppe | Leistungsfähigkeit | | | | |
|---------------|--------------------|-----------------------|------------------|----------------------|---------------|
| | schlecht | unterdurchschnittlich | durchschnittlich | überdurchschnittlich | ausgezeichnet |
| Männer | | | | | |
| 20—29 | < 25 | 25—33 | 34—42 | 43—52 | > 52 |
| 30—39 | < 23 | 23—30 | 31—38 | 39—48 | > 48 |
| 40—49 | < 20 | 20—26 | 27—35 | 36—44 | > 44 |
| 50—59 | < 18 | 18—24 | 25—33 | 34—42 | > 42 |
| 60—69 | < 16 | 16—22 | 23—30 | 31—40 | > 40 |
| Frauen | | | | | |
| 20—29 | < 24 | 24—30 | 31—37 | 38—48 | > 48 |
| 30—39 | < 20 | 20—27 | 28—33 | 34—44 | > 44 |
| 40—49 | < 17 | 17—23 | 24—30 | 31—41 | > 41 |
| 50—59 | < 15 | 15—20 | 21—27 | 28—37 | > 37 |
| 60—69 | < 13 | 13—17 | 18—23 | 24—34 | > 34 |

Tab. 5. Sauerstoffverbrauch (ml/min/kg Körpergewicht) bei Fahrradergometerarbeit (nach Körpergewicht) (nach Fox u. Ma.).

| Gewicht kg | Ergometerbelastung in kpm/min (oben) und Watt (unten) | | | | | | | | | |
|---------------|---|-----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 150 25 | 300 50 | 450 75 | 600 100 | 750 125 | 900 150 | 1050 175 | 1200 200 | 1500 250 | 1800 300 |
| 40 | 15 | 22,5 | 30 | 37,5 | 45 | 52,5 | 60 | 67,5 | 82,5 | 97,5 |
| 45 | 13,5 | 20,3 | 27 | 33,8 | 40,5 | 47,3 | 54 | 60,8 | 74,3 | 87,8 |
| 50 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 | 66 | 78 |
| 55 | 11 | 16,5 | 22 | 27,5 | 33 | 38,5 | 44 | 49,5 | 60,5 | 71,5 |
| 60 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 55 | 65 |
| 65 | 9,3 | 14 | 18,5 | 23,3 | 27,8 | 32,5 | 37,3 | 41,8 | 51 | 60,3 |
| 70 | 8,5 | 13 | 17 | 21,5 | 25,5 | 30 | 34,5 | 38,5 | 47 | 55,5 |
| 75 | 8 | 12 | 16 | 20,3 | 24 | 28 | 32,3 | 36,3 | 44 | 52,3 |
| 80 | 7,5 | 11 | 15 | 19 | 22,5 | 26 | 30 | 34 | 41 | 49 |
| 85 | 7,1 | 10,5 | 14,2 | 17,9 | 21,3 | 24,7 | 28,4 | 32 | 38,9 | 46,2 |
| 90 | 6,7 | 10 | 13,3 | 16,7 | 20 | 23,3 | 26,7 | 30 | 36,7 | 43,3 |
| 95 | 6,4 | 9,5 | 12,7 | 15,9 | 19 | 22,2 | 25,4 | 28,5 | 34,9 | 41,2 |
| 100 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 33 | 39 |
| 105 | 5,8 | 8,5 | 11,5 | 14,3 | 17,3 | 20 | 23 | 25,8 | 31,5 | 37,3 |
| 110 | 5,5 | 8 | 11 | 13,5 | 16,5 | 19 | 22 | 24,5 | 30 | 35,5 |
| 115 | 5,3 | 7,8 | 10,5 | 13 | 15,8 | 18,3 | 21 | 23,5 | 28,8 | 34 |
| 120 | 5 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 | 17,5 | 20 | 22,5 | 27,5 | 32,5 |

Druckwerte gegenüber blutig gemessenen Drucken höher liegen. Von Interesse sind daher manchmal nicht so sehr die Absolutwerte, als vielmehr die Veränderungen der Drucke während der Belastung.

Der diastolische Druck ändert sich beim Gesunden bei Arbeit meist nur geringfügig.

Der systolische Druck steigt normalerweise bei Arbeit und fällt nach Belastungsende rasch ab. Der Anstieg, der beim Hypotoniker, Normotoniker und Hypertoniker gleich ausgeprägt sein kann, ist bei Männern im Durchschnitt stärker als bei Frauen. Ein auf Grund nervöser

240 mm Hg und/oder ein diastolischer Anstieg von mehr als 20 mm Hg über den Ruhewert zu beurteilen.

Zu 7.4. (EKG): Die Registrierung und Interpretation des Arbeits-EKGs ist Gegenstand zahlreicher Publikationen, auf die wir hier verweisen möchten. Man muß sich jedoch vergegenwärtigen, daß es nur einen Bruchteil der Arbeitsreaktionen anzeigen kann. Daher ist es stets synoptisch mit den übrigen Befunden zu betrachten, sonst sind 20 bis 30% falsch negative Befunde und ein nicht unbedeutender Anteil falsch positiver Befunde zu erwarten.

Tab. 6 a. Verhalten des (unblutig gemessenen) arteriellen Blutdruckes bei Ergometerarbeit im Liegen in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht (nach Reindell, König, Roskamm, 1967).

| Alter | Geschlecht | Blutdruck | | |
|-------|------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | Ruhe syst./diastol. | 50 Watt syst./diastol. | 100 Watt syst./diastol. |
| 20—39 | männl. | 126/78 | 144/82 | 167/83 |
| | | (±11) (±6) | (±12) (±7) | (±15) (±9) |
| 20—39 | weibl. | 112/75 | 129/79 | 154/81 |
| | | (±8) (±6) | (±16) (±6) | (±14) (±7) |
| 40—59 | männl. | 132/85 | 152/92 | 176/95 |
| | | (±13) (±15) | (±16) (±9) | (±19) (±8) |
| 60—75 | männl. | 141/88 | 163/95 | 188/100 |
| | | (±19) (±10) | (±23) (±13) | (±27) (±13) |

Tab. 6 b. Verhalten des (unblutig gemessenen) arteriellen Blutdruckes bei Ergometerarbeit im Sitzen in Abhängigkeit vom Geschlecht und in einem Altersbereich von 48 bis 63 Jahren (nach I. Astrand: Acta med. scand. 178 [1965], 41).

| Geschlecht | Ruhe | Blutdruck bei einer Leistung entsprechend einer Herzschlagfrequenz von | | | 3 Minuten nach Belastung |
|------------|------------|---|-------------|-------------|-----------------------------|
| | | 109 ± 9 | 130 ± 5 | 148 ± 5 | |
| männl. | 134/85 | 170/89 | 188/93 | 196/96 | 142/83 |
| | (±15) (±8) | (±19) (±8) | (±20) (±11) | (±22) (±13) | (±14) (±2) |
| weibl. | 137/84 | 180/92 | 199/96 | 212/96 | 147/85 |
| | (±15) (±9) | (±24) (±11) | (±20) (±12) | (±23) (±13) | (±11) (±9) |

Anspannung (labile Hypertoniker?) zunächst erhöhter oder überschießend angestiegener systolischer Druck kann allerdings bei Arbeit anfangs gleichbleiben oder sogar abfallen, um sich dann bei weiterer Arbeit normal einzuregulieren. Im übrigen zeigt aber ein mangelnder Anstieg oder sogar Abfall des systolischen Druckes, der dann kritisch zu beurteilen ist, eine Unfähigkeit an, das Herzminutenvolumen angesichts eines Abfalles des Groß-Kreislaufwiderstandes bei Einsatz der arbeitenden Muskulatur adäquat zu steigern.

Pathologisch im Sinne einer hypertonen Regulation ist wahrscheinlich ein systolischer Druckanstieg bei Belastung von mehr als 100 mm Hg über den Ruhewert oder über

Im folgenden möchten wir drei Gesichtspunkte kurz streifen:

Rhythmus: Versuche werden unternommen, Rhythmusstörungen in ihrer diagnostischen und prognostischen Wertigkeit zu klassifizieren. Eine Abnahme der Zahl von in Ruhe vorhandenen Extrasystolen bei Belastung deutet empirisch auf eine eher harmlose Rhythmusstörung hin. Schwerwiegend hingegen ist das Auftreten gehäufter oder multiformer ventrikulärer Extrasystolen während und nach Arbeit.

Leitung: Das Auftreten eines AV-Blockes I., II. oder III. Grades oder eines (Links-)Schenkelblockes ist meist Folge einer Myokardhypoxie.

ST-T: Zu den ST-T-Veränderungen sei lediglich auf die horizontale oder deszendierende ST-Senkung von mehr als 0,1 mV als Zeichen der Myokardhypoxie eingegangen. Es gibt jedoch zahlreiche Kriterien, zu denen etwa der „Slope“ der ST-Strecke gehört. Man muß sich bewußt sein, daß bei Ausbleiben einer ST-Senkung der Schluß nicht gerechtfertigt ist, daß eine Myokardhypoxie nicht vorliege.

Zu 7.5. (Symptomatik): Zur normalen Symptomatik gehören Schwitzen nach einigen Minuten Arbeit und das Gefühl allgemeiner Erschöpfung bei Ausbelastung. Besonders am Fahrradergometer kann es zur Ermüdung der Beinmuskulatur, eventuell auch zu Schmerzen besonders im M. quadriceps kommen. In solchen Fällen kann die Belastung am Laufbandergometer zweckmäßiger sein (14). Auskultatorisch ist eine Zunahme der Lautstärke der Herztöne bei Arbeit zu hören. Kurz nach Belastung wird manchmal eine gewisse Kopfleere angegeben, besonders, wenn nicht durch Leertreten am Fahrrad oder Bewegen der Beine am Laufbandergometer der Rückstrom venösen Blutes gefördert wird.

Einige Symptome können nicht in jedem Fall als normal oder pathologisch klassifiziert werden und sind oft nur zusammen mit den übrigen Arbeitsreaktionen zu deuten. Dazu zählen Unlust bzw. mangelnde Motiviertheit zur Anstrengung, allgemeine Müdigkeit und Mattigkeit bei mittelschwerer bis schwerer Arbeit, Dyspnoe (die wir immer als subjektives Symptom verstehen) leichten und mittleren Schweregrades, Kopfleere bzw. Schwindelgefühl bei starker Anstrengung, kühl-schweißige blasse Haut bei Ausbelastung und Zunahme der Intensität systolischer Geräusche.

Die wichtigsten pathologischen Symptome sind Angina pectoris bzw. Stenokardie als Zeichen myokardialer Sauerstoffnot und schwere Dyspnoe, aber eine große Zahl von Symptomen kann diagnostisch verwertbar sein. Dazu gehören krampfartige Schmerzen der Wadenmuskulatur (Claudicatio), Schwitzen schon nach wenigen (1 bis 3) Minuten Arbeit und kalt-schweißige Haut als Ausdruck einer sympathikotonen Regulation bei inadäquater Zunahme des HMV, Schwindelgefühl und Schwarzwerden vor den Augen als Folge zerebraler Minderdurchblutung, Zyanose als Zeichen respiratorischer Insuffizienz oder schlechter peripherer Perfusion (oder einer Beimischung venösen Blutes), Abnahme der Intensität der Herztöne und Hörbarwerden eines 3. oder 4. Herztones bei degenerativen Myokardiopathien sowie Auftreten eines Mitralinsuffizienzgeräusches.

Beginn und Schweregrad der Symptome, von denen viele nur bei gezielter Beobachtung erfaßt werden können, werden am besten (im Testprotokoll) sofort festgehalten. In der Gesamtbeurteilung einer ergometrischen Untersuchung, zu der Anamnese, physikalischer Status und alle Arbeitsreaktionen herangezogen werden, nimmt ihre Deutung einen wesentlichen Platz ein.

Glossar

Aerobe Leistung: Leistung, deren Energiebedarf durch aeroben Metabolismus gedeckt wird. Die aerobe Leistung kann durch die Messung der Sauerstoffaufnahme in der Zeiteinheit quantifiziert werden.

Atemäquivalent für Kohlensäure: ER_{CO_2} , Atemminutenvolumen/Kohlensäureabgabe pro Minute.

Atemäquivalent für Sauerstoff: ER_{O_2} , Atemminutenvolumen/Sauerstoffaufnahme pro Minute.

Atemminutenvolumen: AMV, \dot{V}_E (Liter/Min.), Volumen der pro Minute ausgeatmeten Luft, umgerechnet auf Standardbedingungen.

Basenüberschuß: BE, Base excess (mÄ/l), Konzentration der titrierbaren Base des voll sauerstoffgesättigten Blutes beim Titrieren mit starker Säure (bzw. bei Basendefizit mit starker Base) bei einem pH von 7,40, einem P_{aCO_2} von 40 Torr und 37° C.

Basenüberschuß-Differenzwert: ΔBE (mÄ/l), Differenz zwischen BE bei Ruhe und sofort nach Arbeit.

Ergostase: Zeitlich begrenztes Steady state der Arbeitsreaktionen. Es ändern sich bei gleichbleibender Belastungshöhe \dot{V}_{O_2} , \dot{V}_E und HF innerhalb eines Zeitraumes von 3 Minuten nicht mehr als $\pm 5\%$.

Kohlensäureabgabe: \dot{V}_{CO_2} (Liter/Min.). Auf Standardbedingungen umgerechnete Menge der pro Minute ausgeatmeten Kohlensäure.

Leistung: Arbeit/Zeit. Einheit: 1 Watt = 6,1 mkp/min.

Rektangulärer Test: Test, bei dem eine Belastungsstufe rasch erreicht und dann über eine bestimmte Zeit konstant gehalten wird.

Rektangulär-progressiver Test: Test, bei dem mehrere Belastungsstufen von jeweils gleicher Dauer aufeinanderfolgen.

PWC: Physical working capacity.

PWC₁₇₀: Gemessener oder extrapolierter Wert jener Wattleistung, welche bei einer Herzfrequenz von 170 erreicht wurde oder würde.

Respiratorischer Quotient: Quotient aus Kohlensäureabgabe pro Minute und Sauerstoffaufnahme pro Minute.

Sauerstoffaufnahme: \dot{V}_{O_2} (Liter/Min.), auf Standardbedingungen umgerechnete Menge des pro Minute aufgenommenen Sauerstoffes.

Sauerstoffpuls: Sauerstoffaufnahme in der Minute/Herzfrequenz.

Symptomlimitierter maximaler Test: Test, bei dem die Belastung gesteigert wird, bis die vorher entsprechend instruierte Testperson wegen Erreichens der Leistungsgrenze oder wegen anderer subjektiver Symptome das Zeichen zum Abbruch gibt. Der Abbruch der Belastung erfolgt selbstverständlich auch bei Auftreten obligater Abbruchskriterien.

Triangulärer Test: Test mit stetig zunehmender Belastungsintensität. Die Leistungssteigerung kann linear oder z. B. herzfrequenzgesteuert sein.

Wahrgenommener Ermüdungsgrad: Perceived exertion rate, *Per* (4). Von der Testperson empfundener und in der Selbstbewertungsskala (nach *Borg* [4]) einer Zahl in der Reihe zwischen 6, entsprechend sehr leicht und 20, entsprechend sehr schwer, zugeordneter Grad der momentanen Anstrengung. Die Selbstbewertungsskala berücksichtigt die nichtlineare Beziehung zwischen Leistung und subjektiver Anstrengung.

Verschiedene Gesichtspunkte der vorliegenden Übersichtsarbeit wurden im Rahmen des Arbeitskreises für Ergometrie zur Diskussion gestellt. Besonders den Herren *H. Böhm, P. Haber, S. Gasić, F. Kummer* und *W. Schlick* wird an dieser Stelle für Anregungen gedankt.

Referenzen und ausgewählte Literatur

- (1) *Arstila, M.*: Pulse-conducted triangular exercise ECG-test. *Acta med. scand.*, Suppl. 529 (1972).
- (2) *Astrand, P.-O.*, und *K. Rodahl*: Textbook of work physiology. McGraw-Hill, New York 1970.
- (3) *Blackburn, H.*: The exercise electrocardiogram. In: Measurement in Exercise Electrocardiography. Herausgeg. von *H. Blackburn*. Thomas, Springfield 1969.
- (4) *Borg, G.*: Physical performance and perceived exertion. Thesis, Lund 1962.
- (5) *Bruce, R. A.*: Exercise electrocardiography. In: The heart. Herausgeg. von *J. W. Hurst*. 3rd Edition. McGraw-Hill Book Company, 1974.
- (6) *Bruce, R. A., F. Kusumi* und *D. Hosmer*: Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *Amer. Heart J.* 85 (1973), 546.
- (7) *Denolin, H., K. König, R. Messin* und *S. Degré*: Die Ergometrie in der Cardiologie. Boehringer, Mannheim 1968.
- (8) Exercise Equivalents. Colorado Heart Association. 1375 Delaware Street, Denver, Colorado 80204.
- (9) *Fox, S. M., J. P. Naughton* und *N. L. Haskell*: Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Ann. Clin. Res.* 3 (1971), 404.
- (10) *Hollmann, W., W. Barg, G. Weyer* und *H. Heck*: Der Alterseinfluß auf spiroergometrische Meßgrößen im submaximalen Arbeitsbereich. *Med. Welt* 21 (1970), 1280.
- (11) *Kubicek, F.*: Der Einsatz der Ergometrie in der Beurteilung der kardiovaskulären Arbeitskapazität. *Wien. klin. Wschr.* 85, Suppl. 19 (1973), 1.
- (12) *Lange-Andersen, K., R. J. Shephard, H. Denolin, E. Varnauskas* und *R. Masironi*: Fundamentals of exercise testing. World Hlth. Org., Geneva 1971.
- (13) *Naughton, J. P.*, und *H. K. Hellerstein* (Herausgeb.): Exercise testing and exercise training in coronary heart disease. Academic Press, New York-London 1973.
- (14) *Niederberger, M., R. A. Bruce, F. Kusumi* und *S. Whitkannack*: Disparities in ventilatory and circulatory responses to bicycle and treadmill exercise. *Brit. Heart J.* 36 (1974), 377.
- (15) *Reindell, H., K. König* und *H. Roskamm*: Funktionsdiagnostik des gesunden und kranken Herzens. G. Thieme, Stuttgart 1967.
- (16) *Reiterer, W.*: Statische Belastung — eine Bereicherung für die erweiterte kardiologische Diagnostik? *Acta Med. Austriaca* 1 (1974), 106.
- (17) *Rochmis, P.*, und *H. Blackburn*: Exercise tests. *J. Amer. Med. Ass.* 217 (1971), 1061.
- (18) *Roskamm, H.*: Das Belastungs-EKG. Boehringer, Mannheim 1968.
- (19) *Wahlund, H.*: Determination of the physical working capacity. *Acta med. scand.*, Suppl. 215 (1948), 1.

Anschrift der Verfasser: Dr. M. Niederberger und Dr. W. Reiterer, Kardiologische Universitätsklinik, Garnisongasse 13, A-1090 Wien, Österreich, Doz. Dr. F. Kubicek, Hanusch-Krankenhaus, Heinrich-Collin-Straße 30, A-1140 Wien, Österreich.