

Kardiologie
<https://doi.org/10.1007/s12181-025-00739-7>
Angenommen: 18. Februar 2025

© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie - Herz- und Kreislaufforschung e.V. Published by Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature - all rights reserved 2025



DGK-Manual zum Stellenwert der Ergometrie

Aus der Kommission für Klinische Kardiovaskuläre Medizin

T. Klingenheben¹ · J. Bauersachs² · R. Bosch³ · S. von Haehling⁴ · K. Hellhammer⁵ · C. Tiefenbacher^{6,7}

¹ Praxis für Kardiologie Bonn, Bonn, Deutschland

² Klinik für Kardiologie und Angiologie, Medizinische Hochschule Hannover, Hannover, Deutschland

³ Cardio Centrum Ludwigsburg-Bietigheim, Ludwigsburg, Deutschland

⁴ Klinik für Kardiologie und Pneumologie, Herzzentrum, Göttingen und Deutsches Zentrum für Herz- und Kreislaufforschung (DZHK), Standort Göttingen, Universitätsmedizin Göttingen, Göttingen, Deutschland

⁵ Westdeutsches Herz- und Gefäßzentrum Klinik für Kardiologie und Angiologie, Universitätsklinikum Essen, Essen, Deutschland

⁶ Innere Medizin I, Marienhospital, Wesel, Deutschland

⁷ Kommission für Klinische Kardiovaskuläre Medizin, Deutsche Gesellschaft für Kardiologie, Düsseldorf, Deutschland



Zusammenfassung

Die Ergometrie bleibt unverändert Teil der Basisdiagnostik in der klinischen Kardiologie, auch wenn sich ihr Stellenwert im Lichte der zunehmenden Bedeutung der kardialen Bildgebung bei der Ischämiediagnostik verändert hat. Bei Patienten mit Angina pectoris ohne stenosierende Koronargefäße spielt sie eine Rolle hinsichtlich der Differenzialdiagnose einer Angina pectoris bzw. Ischämie ohne Obstruktion der Koronararterien (ANOCA/INOCA). Zudem hat in jüngerer Zeit die Bedeutung der Ergometrie in der Sportkardiologie sowie bei der Risikostratifizierung beispielsweise in der Rhythmologie oder bei Patienten mit hypertropher Kardiomyopathie zugenommen.

Schlüsselwörter

Risikostratifizierung · KHK · Rhythmusstörungen · Sportkardiologie · Strukturelle Herzerkrankungen

Präambel

Belastungsuntersuchungen spielen in der klinischen Kardiologie unverändert eine wichtige Rolle für Diagnostik und Risikostratifizierung. Von der DGK wurde 2018 erstmals ein Manual publiziert [1], welches die bis dato gültige Leitlinie abgelöst hat [2]. 2019 erfolgte durch die damalige ESC-Leitlinie zum chronischen Koronarsyndrom eine Herabstufung der Evidenz der Ergometrie hinsichtlich der Diagnostik einer Myokardischämie zugunsten der neueren Bildgebungsverfahren mit höherer Sensitivität und Spezifität [3], sodass hinsichtlich dieser Hauptindikation eine Neubewertung und damit auch eine Neufassung des Manuals notwendig geworden ist. Eine erneut aktualisierte epi-

miologische Datenlage hat zudem zu einer präzisierten Empfehlung zur klinischen Risikostratifizierung der stabilen KHK geführt und ist entsprechend in die aktuellen Leitlinien der ESC wie auch die Nationale Versorgungsleitlinie Chronische KHK eingegangen [4–7]. Eine Neubewertung der Ergometrie als *dem* elektrokardiographischen Basisverfahren der KHK-Diagnostik muss dieser Entwicklung daher Rechnung tragen. In dieses Manual gehen eine Literaturrecherche der letzten 10 Jahre ein sowie entsprechende Empfehlungen bzw. Leitlinien der maßgeblichen internationalen Fachgesellschaften, insbesondere von ESC und AHA.

Hinsichtlich der Voraussetzungen, technischen Durchführung, Ablauf/Überwachung, personellen Ausstattung,

Der Verlag veröffentlicht die Beiträge in der von den Autorinnen und Autoren gewählten Genderform. Bei der Verwendung des generischen Maskulinums als geschlechtsneutrale Form sind alle Geschlechter impliziert.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Infobox 1

Curriculum

„Manual zum Stellenwert der Ergometrie“

Das Curriculum wurde 2018 in der Zeitschrift *Der Kardiologe* [1] publiziert.

Qualitätskontrolle und Interpretation der Ergometrie hat sich zu den Leitlinien 2000 und dem Manual 2018 keine bedeutsame Änderung ergeben. Das vorliegende Manual nimmt bevorzugt Stellung zu neueren Daten hinsichtlich der Wertigkeit der Ergometrie im Vergleich zu anderen nichtinvasiven (bildgebenden) Ischämietests und kommentiert in diesem Kontext auch die Stellung der Ergometrie im Rahmen der jüngsten ESC-Empfehlungen. Ebenso werden neue Aspekte bezüglich weiterer klinischer Fragestellungen z.B. bei Herzinsuffizienz oder in der Rhythmologie behandelt.

Einleitung und Definition

Belastungsuntersuchungen bleiben ein wichtiges diagnostisches Verfahren in der klinischen Kardiologie [8]. Sie haben große Bedeutung für Diagnose, Therapiekontrolle und Prognose/Risikostratifikation bei kardialen Erkrankungen. Darüber hinaus sind sie sinnvoll hinsichtlich der Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit in der Arbeitsmedizin und Sportmedizin wie auch zur Trainingsberatung bei verschiedenen Erkrankungen. Neben der Ischämiediagnostik und Risikoabschätzung der koronaren Herzkrankung dient die Bestimmung der maximalen Belastbarkeit („physical capacity“) der Prognoseabschätzung, der Beurteilung des Blutdruckverhaltens unter Belastung und des Auftretens von Herzrhythmusstörungen, wie ventrikuläre Extrasystolen (VES), Kammertachykardien (VT), Überleitungsstörungen, sinuatrialer (SA-) und atrioventrikulärer (AV-)Block. Physiologische, metabolische und pathophysiologische Grundlagen der Belastung sind nicht Inhalt dieses Manuals; diesbezüglich wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [9].

Voraussetzungen

Indikationsstellung

Wie bei allen Untersuchungsverfahren, muss der Durchführung einer ergometrischen Untersuchung eine rechtfertigende Indikationsstellung zugrunde liegen. Diese ergibt sich aus den Empfehlungen der **Tab. 5, 6, 7, 8, 9 und 10**. Wenn z.B. bereits klinisch-anamnestisch absehbar ist, dass eine Ergometrie hinsichtlich eines Ischämienachweises diagnostisch nicht verwertbar sein wird (z.B. Patienten mit schweren Begleiterkrankungen bzw. solchen, bei denen ein erhöhtes Risiko einer Kreislaufinstabilität zu erwarten ist), sollte sie nicht durchgeführt werden. Es sollten dann primär alternative (bildgebende) Verfahren zur Ischämiediagnostik angewandt werden [4, 6].

Klinische Voraussetzungen

Die **Anamnese** sollte neben der Symptomatik auch die Frage nach der bisherigen regelmäßigen körperlichen Aktivität und Grad der Belastbarkeit beinhalten. Extrakardiale Erkrankungen, die eine Ergometrie beeinträchtigen, sind zu erfassen. Ebenso ist ein **vollständig dokumentierter Medikamentenstatus obligat** – insbesondere hinsichtlich der Einnahme von Digitalis, β -Rezeptorenblockern und Antiarrhythmika. Nach den aktuellen ESC-Leitlinien wird eine Ergometrie zur Ischämiediagnostik bei Patienten, die Digitalis einnehmen, nicht empfohlen [4]. Vor Durchführung der Ergometrie ist eine klinische Untersuchung, insbesondere **kardiale Auskultation** und **Messung des Blutdrucks** sowie Aufzeichnung eines 12-Kanal-Standard-EKGs unter Ruhebedingungen notwendig. Bereits im Ruhe-EKG erkennbare pathologische Veränderungen sollten immer vor einer Belastung abgeklärt werden. Hierbei ist vor allem auf Endstreckenveränderungen sowie ventrikuläre Rhythmusstörungen zu achten. Bei auffälligen klinischen oder elektrokardiographischen Befunden sollte einem Belastungstest eine echokardiographische Untersuchung vorausgehen, um strukturelle Veränderungen zu erfassen, die möglicherweise für den Belastungstest berücksichtigt werden müssen [10]. Hierzu gehören alle Formen von

Kardiomyopathien oder hämodynamisch relevante Klappenvitien.

Technisch-apparative Voraussetzungen

Räumliche Voraussetzung. Angenehme Raumtemperaturen zwischen 18 und 22 Grad und eine Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 60%. *Speziell im Hochsommer sind stickig-warme Umgebungsverhältnisse zu vermeiden, da diese das Risiko für einen vasodepressorischen vermittelten Kreislaufkollaps in der Erholungsphase erhöhen.* Eine Liege, auf der ein Patient im Notfall und/oder nach Belastungsende gelagert werden kann, sowie ein Telefon müssen ebenfalls im Raum vorhanden sein.

Ergometriegeräte. Ergometer müssen den Anforderungen des Medizinprodukte-recht-Durchführungsgesetzes (MPDG) und der EU-Medizinprodukteverordnung (MDR) genügen und unterliegen einer regelmäßigen Wartung und Kalibrierung gemäß Konformitätsbedingungen [9]. Belastungsuntersuchungen werden am häufigsten mittels Fahrradergometrie in sitzender oder (halb-)liegender Position durchgeführt; die verwendeten Fahrradergometer werden mechanisch oder weitgehend drehzahlunabhängig elektrisch gebremst. Die drehzahlunabhängigen Geräte haben den Vorteil, dass bei höheren Belastungen, die Leistung über die Tretfrequenz gesteigert werden kann bei entsprechend geringerem Widerstand und damit niedrigerem Krafteinsatz. Dieses ist bei den Personen vorteilhaft, bei denen die Muskelkraft zum limitierenden Faktor wird und damit eine echte Ausbelastung verhindert wird (speziell bei älteren Menschen und Kindern). Alternativ zum Fahrradergometer wird meistens das Laufbandergometer eingesetzt; neben diesen beiden am häufigsten verwendeten Methoden finden Belastungsuntersuchungen mittels Kletterstufe *nach Klepzig und Kaltenbach* oder Handkurbelergometer kaum noch Anwendung.

EKG-Registrierung und -Monitoring. Obligat ist während Belastung die kontinuierliche Aufzeichnung eines 12-Kanal-EKGs mit Standard-Extremitäten- und

Tab. 1 Patientengruppen, bei denen während der Ergometrie ein Arzt persönlich im Raum anwesend sein sollte. (Modifiziert gemäß AHA-Empfehlungen [11])	
<i>Koronare Herzkrankheit</i>	Koronare Herzkrankheit bei hochsymptomatischen Patienten, wenn der Patient zuvor noch keine Ergometrie absolviert hatte
	Innerhalb der ersten 7 Tage nach Myokardinfarkt bzw. akutem Koronarsyndrom (ACS)
<i>Hämodynamisch relevante Vitien wie</i>	Mäßig- bis hochgradige Aortenklappenstenose bei einem asymptomatischen oder fraglich symptomatischen Patienten
	Mäßig- bis hochgradige Mitralklappenstenose bei einem asymptomatischen oder fraglich symptomatischen Patienten
	Hämodynamisch relevante intrakardiale Shunts
<i>Kardiomyopathien</i>	Hypertrophe Kardiomyopathie: Risikostratifikation bzw. Bestimmung des Belastungsgradienten
	Hochgradige linksventrikuläre Dysfunktion; insbesondere wenn der Patient zuvor noch keine Ergometrie absolviert hatte
	Herzinsuffizienz Stadium NYHA III (New York Heart Association)
<i>Herzrhythmusstörungen</i>	Anamnese von belastungsabhängigen oder malignen ventrikulären Arrhythmien oder Zustand nach Reanimation
	Verdacht auf belastungsabhängige anhaltende Rhythmusstörungen
	Anamnestisch belastungsinduzierte Synkope
<i>Schwere pulmonalerterielle Hypertonie</i>	

Brustwand-Ableitungen. Die Registrierung läuft über EKG-Klebe- oder besser Saugelektroden. Eine sorgfältige Präparation der Haut (Reinigung/Entfettung) gewährleistet eine möglichst Artefakt-freie Aufzeichnung. Zur kontinuierlichen EKG-Überwachung ist ein Monitor erforderlich, der fortlaufend den EKG-Ablauf zeigt. So können während der Belastung ST-Strecken-Alterationen, Leitungsstörungen, Schenkelblockbilder oder Arrhythmien sofort erfasst werden.

Notfallausstattung. Bei jedem Belastungs-EKG müssen Möglichkeiten zur Behandlung von Zwischenfällen bis hin zur Reanimation gegeben sein. Ein Defibrillator gehört unabdingbar zur Notfallausrüstung und muss regelmäßig überprüft werden. *Dabei ist ein Defibrillator pro Funktionstrakt/Praxis dann ausreichend, wenn alle Räume, in denen Ergometrien durchgeführt werden, unmittelbar benachbart sind und somit die Zugriffszeit auf einen Defibrillator gleich kurz ist.*

Zusammenfassend gehören zur **Notfallausrüstung:**

- Defibrillator,
- Ausrüstung zur extraglottischen Atemwegssicherung und Intubation,
- Ausrüstung zur Infusionstherapie,
- Notfallmedikamente,
- Vorkehrungen zur sofortigen O₂-Gabe,
- Telefon im Ergometrierraum.

Personelle Voraussetzungen und Arztanwesenheit. Die Durchführung der Ergometrie erfordert gut ausgebildetes und geschultes medizinisches Fachpersonal und einen betreuenden Arzt, der für die Durchführung und Auswertung des Belastungstests verantwortlich ist [10, 11].

In einem wissenschaftlichen Statement hat die AHA zu den personellen Voraussetzungen bei der Durchführung der Ergometrie Stellung genommen [11]. Die dort aufgeführten Kriterien können auch für die DGK übernommen werden. So trägt der überwachende Arzt die Verantwortung für eine methodisch korrekte und sichere Durchführung des Belastungstests. Prinzipiell kann die Ergometrie von einer trainierten Fachkraft durchgeführt werden; diese muss Kenntnisse in der Belastungsphysiologie aufweisen und in der Lage sein, Änderungen des Herzrhythmus sowie der Repolarisation zu erkennen. In diesem Fall muss der Arzt unmittelbar verfügbar sein. Basierend auf klinischen Kriterien, werden Empfehlungen für die Patienten ausgesprochen, bei denen der Arzt unmittelbar bei der Ergometrie anwesend sein muss, beispielsweise Patienten mit hochgradiger Aortenklappenstenose, anamnestischen belastungsinduzierten Arrhythmien, ventrikuläre Arrhythmien innerhalb der ersten 8 Tage nach ACS/ akutem Myokardinfarkt (■ Tab. 1; [11]). Regelmäßiges Training der EKG-Fachkraft

(mindestens 2-jährlich) in Reanimationsmaßnahmen gemäß den jeweils aktuellen Leitlinien des ERC (European Resuscitation Council) sind zwingend notwendig und sollten dokumentiert werden. **Es bleibt in der ärztlichen Verantwortung, Patienten-individuell zu entscheiden, inwieweit eine Ergometrie eine strikte Arztanwesenheit im Raum erfordert.**

Durchführung der Ergometrie

Nach Messung von Ruhe-Blutdruck, Herzfrequenz sowie einer Analyse des 12-Kanal-Oberflächen-EKGs und Anlage der Elektroden wird die Belastung nach einer initialen Ruhephase von etwa 3 min nach einem definierten Protokoll begonnen, wobei die Gesamtbelastungsdauer 9–12 min nicht überschreiten sollte (Lit. in [2]; [12, 13]).

Während der kompletten Belastungs- sowie in der Erholungsphase wird der Patient kontinuierlich klinisch beobachtet – dies beinhaltet eine ständige Inspektion (Hautkolorit; Schweißneigung), Abfrage klinischer Symptome (Brustschmerzen, Luftnot, Tachypnoe, körperliche Erschöpfung) sowie die regelmäßige Blutdruck- und die kontinuierliche Herzfrequenzmessung.

Für die Durchführung eines Arbeitsversuches ist ein standardisiertes Protokoll, das nach Alter, Größe und Geschlecht ermittelt wird, erforderlich, um objektive und vergleichbare Befunde über normale und pathologische Reaktionen zu erhalten. Die Belastungsuntersuchung sollte dynamisch durchgeführt werden, reproduzierbar und dosierbar sein. Die EKGs sollten minütlich aufgezeichnet werden (Schreibgeschwindigkeit 25 oder 50 mm/s), wobei Extremitäten- und Brustwandableitungen immer sofort analysiert werden müssen. Nach Belastungsende werden EKG-Registrierungen, je nach Protokoll, für einige Minuten weitergeführt und analysiert. Der Patient sollte das Belastungs-EKG-Labor erst verlassen, wenn das EKG wieder seine Ausgangssituation erreicht hat (Befund vor Belastungsbeginn) und der klinische Zustand des Patienten stabil ist (Erreichen der Situation wie vor der Belastungsuntersuchung).

Das Belastungsprotokoll sollte an die individuelle Belastungsfähigkeit des Patienten

Tab. 2 Abbruchkriterien der Ergometrie	
Absolute Indikationen	
<i>EKG-Befunde</i>	ST-Strecken-Senkung > 0,3 mV
	ST-Strecken-Hebung > 0,1 mV
<i>Hämodynamische Befunde</i>	Blutdruckabfall > 10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangsblutdruck) mit Zeichen einer myokardialen Ischämie (Angina pectoris, ST-Senkung)
	Mäßig–schwere Angina-pectoris-Symptomatik
	Schwere Dyspnoe
	Klinische Zeichen einer Minderperfusion (Zyanose)
<i>Arrhythmien</i>	Anhaltende (≥ 30 s) ventrikuläre Tachykardie
<i>Sonstiges/Symptomatik</i>	Erschöpfung des Patienten/Patientenwunsch
	Zerebrale Symptome
	Technische Probleme (defekte EKG-Registrierung, Monitorausfall)
Relative Indikationen	
<i>EKG-Befunde</i>	Deszendierende ST-Strecken-Senkung ≥ 0,2 mV
<i>Hämodynamische Befunde</i>	Hypertensive Fehlregulation (RR _{syst} 230–260 mm Hg, RR _{diast} ≥ 115 mm Hg)
	Blutdruckabfall > 10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangsblutdruck) ohne Zeichen einer myokardialen Ischämie (keine Angina pectoris, keine ST-Senkung)
<i>Arrhythmien</i>	Polymorphe Extrasystolie, Paare (2 konsekutive VES), Salven (> 3 konsekutive VES)
	Supraventrikuläre Tachykardien
	Bradyarrhythmien
	Auftreten von Leitungsstörungen (höhergradiger AV-Block, Schenkelblock)
<i>Sonstiges/Symptomatik</i>	Verstärkte Angina-pectoris-Symptomatik
	Progrediente Dyspnoe, Giemen/Erschöpfung/Krämpfe der unteren Extremitäten

Tab. 3 Kontraindikationen der Ergometrie. (Mod. nach [15])	
Akutes Koronarsyndrom	
Symptomatische hochgradige Aortenklappenstenose	
Hämodynamisch relevante Arrhythmien oder anderweitig eingeschränkte Hämodynamik	
Dekompensierte Herzinsuffizienz	
Akute Lungenembolie	
Akute entzündliche Herzerkrankungen	
Akute Aortendissektion	
Hypertensive Entgleisung in Ruhe (> 180/100 mm Hg)	
Akute Beinvenenthrombose	
Akute schwere Allgemeinerkrankung (z. B. fieberhafte Infekte/dtl. Anämie)	
Extrakardiale Erkrankungen mit dtl. limitierter Lebenserwartung (≤ 6 Monate)	

Tab. 4 Ereignisse, die während der Ergometrie auftreten können	
<i>Häufig</i>	Angina pectoris
	Dyspnoe
	Extrasystolen/Vorhofflimmern/supraventrikuläre Tachykardien (SVT)
<i>Selten</i>	Reflektorisch-vasodilatatorisch bedingter Blutdruckabfall (selten mit Synkope) in der Erholungsphase
<i>Sehr selten</i>	Schwerste, auch nach Belastung anhaltende, myokardiale Durchblutungsstörung/Herzinfarkt
	Lebensbedrohliche Herzrhythmusstörungen (VT/Kammerflimmern)/Kreislaufstillstand
	Lungenödem

ten angepasst werden [8, 12]. Insofern sind zu hohe Belastungsstufen bei leistungsgeminderten Patienten (zu früher Abbruch) sowie eine zu niedrige Anfangsbelastung bei leistungsstarken Patienten (zu lange Belastungsdauer) zu vermeiden [12, 14].

Für die Fahrradergometrie wird unverändert das von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vorgeschlagene Protokoll empfohlen, bei dem alle 2 min eine Steigerung der Belastung um 25 W erfolgt – beginnend in der Regel mit 50 W, bei leistungsgeminderten Patienten mit 25 W, bei leistungsstarken Patienten mit 75 W oder höher (sog. *BAL-Schema*) [2]. Laufbandergometrien werden nach dem Bruce-Protokoll durchgeführt.

Abbruchkriterien der Ergometrie

Hinsichtlich der absoluten und relativen Abbruchkriterien hat sich zu den bisherigen deutschsprachigen Leitlinien keine Änderung ergeben [2, 15]. Da die Ergometrie i. d. R. zur Abklärung einer vorbestehenden Belastungssymptomatik durchgeführt wird, sollte diese auch Symptomlimitiert durchgeführt werden, es sei denn,

1

Symptom Score: 0–3 Punkte

Charakteristika des Brustschmerzes		Symptom Score
Typ u. Lokalisation	retrosternale Beklemmung oder Druck in Nacken/Schulter/Arm (1 Punkt)	Hauptsymptom:
Verstärkt durch	körperlichen oder emotionalen Stress (1 Punkt)	Brustschmerz (0–3 Punkte)
Besserung durch	Ruhe oder 5 min nach Nitratgabe (1 Punkt)	oder
Charakteristika der Dyspnoe		Dyspnoe (2 Punkte)
Luftnot und Probleme, Luft zu halten, aggraviert durch Belastung (2 Punkte)		

2

Anzahl an KHK-Risikofaktoren (0–5):

Familienanamnese, Nikotin, Dyslipidämie, Bluthochdruck, Diabetes

3

Abschätzung d. Risikofaktor-gewichteten klinischen Wahrscheinlichkeit (RF-CL) einer stenosierenden KHK

Anzahl Risikofaktoren	Symptom Score					
	0–1 Punkt		2 Punkte		3 Punkte	
	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer
	0–1 2–3 4–5	0–1 2–3 4–5	0–1 2–3 4–5	0–1 2–3 4–5	0–1 2–3 4–5	0–1 2–3 4–5
Alter 30–39	0 1 2	1 2 5	0 1 3	2 4 8	2 5 10	9 14 22
Alter 40–49	1 1 3	2 4 8	1 2 5	3 6 12	4 7 12	14 20 27
Alter 50–59	1 2 5	4 7 12	2 3 7	6 11 17	6 10 15	21 27 33
Alter 60–69	2 4 7	8 12 17	3 6 11	12 17 25	10 14 19	32 35 39
Alter 70–80	4 7 11	15 19 24	6 10 16	22 27 34	16 19 23	44 44 45

Klinische Wahrscheinlichkeit: ● sehr niedrig ● niedrig ● moderat

 ESC

Abb. 1 ◀ Klinische Prätest-Wahrscheinlichkeit (PTP) und PROMISE Minimal Risk Score (PMRS) bei Patienten mit stabiler thorakaler Schmerzsymptomatik gem. ESC-Leitlinie 2024. (Adaptiert nach [4] mit freundl. Genehmigung von © ESC 2024. All Rights Reserved; nach [17–19])

es treten vor dem Auftreten von Symptomen Abbruchkriterien auf (■ Tab. 2).

Kontraindikationen zur Ergometrie

Vor der Belastungsuntersuchung sind absolute und relative Kontraindikationen (KI) auszuschließen (■ Tab. 3). Bei relativen KI sollte eine Ergometrie nur dann erwogen werden, wenn zu erwarten ist, dass der Nutzen und die diagnostische Ausbeute das potenzielle Risiko deutlich überwiegen.

Anmerkung. In spezialisierten kardiologischen Institutionen und Praxen kann die Ergometrie *im individuellen Fall* auch bei manifesten schweren kardiovaskulären Be-

funden wie z.B. höhergradigen Vitien, bekannte schwere koronare Herzkrankheit, Hypertroph-obstruktive Kardiomyopathie (HOCM) als notwendig erachtet werden, um über das weitere therapeutische Vorgehen entscheiden zu können. Kontraindikationen und Abbruchkriterien richten sich hierbei in erster Linie nach der Erfahrung des untersuchenden Arztes – der auch im Raum anwesend sein muss – sowie den Möglichkeiten, bei Komplikationen die adäquaten Sofortmaßnahmen einleiten zu können.

Komplikationen der Ergometrie

Insgesamt ist die Komplikationsrate einer Ergometrie niedrig. Das Morbiditätsrisiko

wie auch das Risiko tödlicher Komplikationen lagen in historischen Erhebungen aus den 1980er-Jahren bei <0,03–0,05 % und werden in jüngeren Publikationen im Bereich der Belastungsechokardiographie mit 0,015–0,03 % berichtet ([16]; ■ Tab. 4).

Indikationen zur Ergometrie

Vorbemerkung. Eine eindeutige Indikationsstellung ist Voraussetzung für die Durchführung einer Ergometrie. Diese wird am häufigsten zur Abklärung einer mutmaßlich kardial bedingten Symptomatik bei Patienten mit entsprechendem Risikoprofil für eine KHK durchgeführt. Hierbei hat sich als obligates Kriterium zur Indikationsstellung die Vorhersage-

Tab. 5 Evidenzbasierte Kriterien: Indikationen zum Belastungs-EKG zur diagnostischen Abklärung einer koronaren Herzkrankheit (KHK) [4], nach akutem Myokardinfarkt sowie vor und nach einer Koronarrevaskularisation (fett hervorgehoben : neueste Empfehlungen der ESC [4])	
Empfehlungsgrad I	Selektierte Patienten mit CCS zur Einschätzung der Belastungstoleranz, Symptomatik, Arrhythmien, Blutdruckverhalten oder zur Risikostratifikation (Evidenz C) Nach Myokardinfarkt spät nach Entlassung zur Beurteilung der Prognose, Belastungsfähigkeit und Beurteilung der medikamentösen Therapie und der kardialen Rehabilitation, sofern ein früher Test submaximal war (Symptom-limitiert, 3 bis 6 Wochen nach Belastung) (Evidenz C) Nachweis einer myokardialen Ischämie vor Revaskularisation zur Beurteilung von Patienten mit rezidivierenden Symptomen (z. B. Angina pectoris) (Evidenz C) Arbeitsmedizinische Untersuchungen gemäß Empfehlungen der BG (Evidenz C)
Empfehlungsgrad IIa	Patienten mit vasospastischer Angina pectoris (Evidenz C) Patienten mit ANOCA/Verdacht auf INOCA (Evidenz C) Nach Entlassung zur Beratung über das Ausmaß der körperlichen Aktivität und/oder das Trainingsprogramm sowie Beurteilung von Blutdruckverhalten oder der Belastbarkeit im Rahmen der Rehabilitation nach einer Revaskularisation (Evidenz C) Untersuchung von Patienten mit mehreren Risikofaktoren (Evidenz C) Untersuchung von asymptomatischen Männern > 40 J. und Frauen > 50 J. bei ausgeprägtem genetischem Risikoprofil (Evidenz C) Vor Aufnahme eines körperlichen Trainings (Evidenz C) Bei Berufen, bei denen eine Erkrankung die öffentliche Sicherheit gefährden kann (s. a. Arbeitsmedizinische Indikationen) (Evidenz C) Bei hoher Wahrscheinlichkeit einer KHK (periphere arterielle Verschlusskrankheit, chronische Niereninsuffizienz etc.) (Evidenz B)
Empfehlungsgrad IIb	Zum Ausschluss einer KHK alternativ dann, wenn nichtinvasive Bildgebungsverfahren nicht zur Verfügung stehen (Evidenz B) Hinsichtlich Optimierung der Therapie oder zur Risikostratifizierung (Evidenz B) Bei Individuen mit niedriger PTP (> 5 bis 15 %) für eine stenosierende KHK zur Identifizierung von Patienten, bei denen auf weitere Diagnostik verzichtet werden kann (Evidenz C) Nach Myokardinfarkt vor Entlassung aus prognostischer Sicht zur Empfehlungen der körperlichen Aktivität und Belastbarkeit und zur Beurteilung der medikamentösen Therapie (Belastung submaximal, 4 bis 6 Tage nach Infarkt) (Evidenz C) Nach Myokardinfarkt früh nach Entlassung zur Beurteilung der Prognose, Belastungsfähigkeit und Beurteilung der medikamentösen Therapie, sofern ein früher Test vor Entlassung nicht erfolgte (Symptom-limitiert, 14 bis 21 Tage nach Belastung) (Evidenz C) Regelmäßige Überwachung bei Patienten, die an einem Rehabilitations- oder Trainingsprogramm teilnehmen (Evidenz C)
Empfehlungsgrad III („soll nicht durchgeführt werden“, Kontraindikation)	Patienten, bei denen Repolarisationsveränderungen unter Belastung nicht beurteilbar sind: – Patienten unter Digitalistherapie (Evidenz C) – Patienten mit Präexzitationssyndrom – Permanente ventrikuläre Schrittmacherstimulation – ST-Senkung > 0,1 mV im Ruhe-EKG – Kompletter LSB (> 120 ms) Akuter Myokardinfarkt Schwere allgemeine Begleiterkrankungen (begrenzte Lebenserwartung) Geplante Revaskularisation bei Patienten mit bekannter KHK Routineuntersuchung bei Patienten nach PCI oder Bypass-Operation <i>ohne spezifische Indikation oder Risikokonstellation</i> Routineuntersuchung von asymptomatischen Personen (Evidenz B)
ANOCA Angina pectoris ohne obstruktive Koronararterien, INOCA Ischämie ohne obstruktive Koronararterien, CCS Chronisches Koronarsyndrom, PCI perkutane Koronarintervention, LSB Linksschenkelblock	

Tab. 6 Pathologische Kriterien hinsichtlich der KHK-Risikoabschätzung
ST-Senkung (> 0,2 mV) auf niedriger Belastungsstufe
Horizontale oder deszendierende ST-Senkung
Anhaltende ST-Senkung in der Erholungsphase
ST-Senkung in mehreren Ableitungen
ST-Hebung bei Fehlen von Q-Zacken
Niedrige Belastbarkeit (< 75 W)
Unzureichender systolischer Blutdruckanstieg (< 130 mm Hg)
Fehlender Blutdruckanstieg bzw. Blutdruckabfall bei ansteigender Leistung
Komplexe, in der Regel polymorphe ventrikuläre Arrhythmien während Belastung (VT)
Verzögerte Herzfrequenzerholung (HRR) nach Belastungsende

wahrscheinlichkeit („pretest probability“ [PTP]) durchgesetzt. Dabei sollte nach den im Jahr 2024 aktualisierten ESC-Leitlinien zum Management der stabilen KHK eine mäßiggradige (15–65%) PTP für das Vorliegen einer KHK gegeben sein (s. **Abb. 1**; [4]). Weitere Indikationen sind die Abklärung einer Belastungsdyspnoe, rhythmologische Indikationen (s. unten), die Beurteilung einer arteriellen Hypertonie und Synkopen während oder nach Belastung. Zudem wird die Ergometrie zur Beurteilung der Belastungsfähigkeit hinsichtlich der Trainingssteuerung sowie

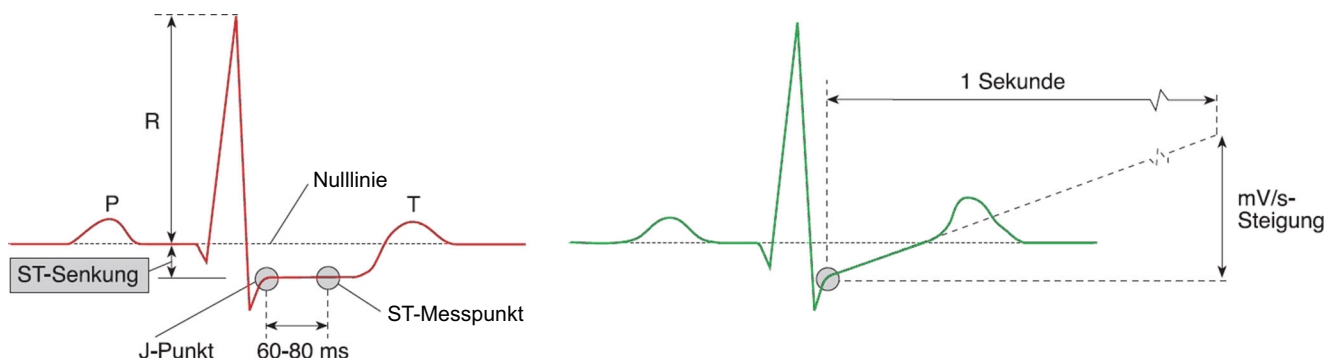


Abb. 2 ▲ Schematische Darstellung belastungsinduzierbarer ST-Strecken-Senkungen. (Nach [1])

bei arbeitsmedizinischen Fragestellungen eingesetzt. Gemäß früheren Empfehlungen hat sich die Einteilung in 3 Klassen bewährt [8]:

- Empfehlungsgrad I: Indikation gesichert,
- Empfehlungsgrad IIa: mögliche Indikation – eher etabliert („sollte erwogen werden“),
- Empfehlungsgrad IIb: mögliche Indikation – eher nicht etabliert („kann erwogen werden“),
- Empfehlungsgrad III: Kontraindikation (soll nicht gemacht werden).

Es gelten, sofern angegeben, folgende Evidenzgrade:

- Evidenzgrad A: Daten aus mehreren ausreichend großen, randomisierten Studien oder Metaanalysen,
- Evidenzgrad B: Daten aus einer randomisierten Studie oder mehreren großen nicht randomisierten Studien,
- Evidenzgrad C: Konsensusmeinung von Experten, basierend auf Studien und klinischer Erfahrung.

Ergometrie zur diagnostischen Abklärung bei Verdacht auf eine koronare Herzkrankheit (KHK)

Die kontinuierliche Optimierung der kardialen Bildgebung hinsichtlich anatomischer und funktioneller Koronardiagnostik hat zu einer Rückstufung der Ergometrie hinsichtlich der KHK-Diagnostik bei Patienten mit Brustschmerz geführt. Seit dem letzten Update dieses Manuals sowie der 2019 Leitlinie zum chronischen Koronarsyndrom ist die Bestimmung der klinischen Vortestwahrscheinlichkeit einer stenosierenden KHK modifiziert und sind die ent-

sprechenden Empfehlungen in der aktuellen ESC-Leitlinie angepasst worden. Insbesondere gehen neben klinischen Charakteristika des Brustschmerzes nun auch die Risikofaktoren in die Erfassung der Wahrscheinlichkeit einer stenosierenden KHK ein. Hierzu ist der Begriff der Abschätzung der Risikofaktor-gewichteten klinischen Wahrscheinlichkeit (RF-CL) eingeführt worden (■ Abb. 1).

Neuere Scores. Aktuell befinden sich weitere Scores in klinischer Evaluation. Beispielsweise zeigt eine aktuelle Auswertung der PROMISE-Studie, dass es möglich ist, durch Anwendung einfacher klinischer Prätest-Variablen Niedrigrisikogruppen zu identifizieren, bei denen eine weitere nichtinvasive Testung unterbleiben kann [13]. Andere neuere Modelle versuchen, an der anderen Seite des Spektrums Hochrisikopatienten zu identifizieren [20, 21]. Allen gemein ist derzeit eine fehlende prospektive Validierung, sodass bis heute kein standardisierter Score als obligater Bestandteil Eingang in die Ergometrie gefunden hat. Insofern können aktuell keine Empfehlungen zur Verwendung von Scores bei der Ergometrie ausgesprochen werden.

In der ■ Tab. 5 sind die aktuellen evidenzbasierten Empfehlungen zur Ergometrie in der Ischämiediagnostik aufgeführt, insbesondere auch wie sie in den ESC-Leitlinien zum chronischen Koronarsyndrom (CCS) publiziert worden sind [4].

Asymptomatische Patienten. In der genannten Empfehlung der ESC ist die Ergometrie zur Risikostratifikation der KHK lediglich bei einer hohen Prätest-Wahrscheinlichkeit empfohlen. Bei intermedi-

ärem Risiko und fehlenden Symptomen ist hingegen eher eine bildgebende anatomische oder funktionelle Bildgebung indiziert [6].

Beurteilung. Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit setzt eine maximale Ausbelastung während einer Ergometrie voraus. Da die Ergometrie bei KHK-Verdacht zur Abklärung von Symptomen erfolgt, sollte diese allerdings auch Symptom-limitiert durchgeführt werden, es sei denn, es treten vor dem Auftreten von Symptomen Abbruchkriterien auf. Hierzu zählt bei der KHK bzw. dem Verdacht auf eine KHK eine signifikant pathologische Endstreckenveränderung, die den Verdacht auf eine Myokardischämie nahelegt. Das Gleiche gilt für das Auftreten belastungsinduzierter höhergradiger ventrikulärer Rhythmusstörungen.

EKG-Befunde (■ Tab. 6)

ST-Strecken-Senkungen. Die ■ Abb. 2 zeigt links eine Ischämie-typische Endstreckenveränderung, während die im rechten Abbildungsteil dargestellte ascendierende ST-Senkung eine unspezifische und nichtdiagnostische EKG-Veränderung darstellt. Geringgradige Senkungen der ST-Strecke ($<0,15$ mV) und des J-Punkts (Referenz ist die isoelektrische Linie der Distanz P–Q) werden auch bei Gesunden beobachtet und sollten bei ascendierendem ST-Strecken-Verlauf (>1 mV/s) als normal angesehen werden. Als Hinweis für eine subendokardiale myokardiale Ischämie werden horizontale oder deszendierend verlaufende ST-Strecken-Senkungen (flacher ST-Strecken-Verlauf [<1 mV/s]) von $>0,1$ mV angesehen, die 60–80 ms nach dem J-Punkt nachzuweisen sind (■ Abb. 1).

Tab. 7 Indikationen zur Belastungsuntersuchung bei arterieller Hypertonie [32, 33, 36]	
<i>Empfehlungsgrad IIa</i>	Patienten mit linksventrikulärer Hypertrophie unklarer Ursache (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad IIb</i>	Erkennung einer Belastungshypertension bei normalem bzw. hoch-normalem Ruhe-/Ausgangsbloodruck (Evidenz C)
	Einschätzung der Effektivität einer antihypertensiven Therapie auf den Belastungsbloodruck (Evidenz C)
	Bei klinischem Verdacht auf Myokardischämie (Evidenz C)
	Abklärung belastungsinduzierbarer Rhythmusstörungen bei Hypertonie (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad III</i>	Ruheblooddruck > 180/100 mm Hg bei arterieller Hypertonie (Evidenz C)

Diagnostisch hinsichtlich einer Ischämie-reaktion sind die ST-Veränderungen zudem, wenn sie in mindestens 2 korrespondierenden EKG-Ableitungen nachgewiesen werden.

Hebungen der ST-Strecke müssen bei Patienten **ohne** Q-Zacken als Zeichen transmuraler Ischämie als pathologisch angesehen werden, wenn sie als Hebung im Bereich des J-Punktes vorliegen ($\geq 0,1$ mV) oder als ST-Strecken-Hebung $\geq 0,1$ mV 60–80 ms nach dem J-Punkt auftreten (in jeweils 3 aufeinanderfolgenden EKG-Komplexen).

Belastungs-EKG zur Abschätzung einer Ischämie bei Patienten mit Angina pectoris und nichtobstruktiven Koronararterien (ANOCA)/koronare mikrovaskuläre Dysfunktion

In jüngerer Zeit wurde die Annahme „falsch positiver“ Ischämiezeichen in der Ergometrie infrage gestellt. Eine pathologische ST-Alteration im Sinne einer Ischämie kann auch ohne Zugrundeliegen einer makroangiographisch-stenosierenden KHK pathologisch sein im Sinne einer Angina pectoris bzw. Ischämie ohne obstruktive KHK (ANOCA/INOCA) [22]. Dies wird durch aktuelle Studien z. B. von Sinha et al. untermauert. Hierbei fand sich, dass das Vorliegen einer pathologischen Ergometrie bei Ausschluss signifikanter Koronarstenosen spezifisch für das Vorliegen einer mikrovaskulären Dysfunktion ist. Eine Ischämie-reaktion ohne relevante Koronarstenosen ist somit nicht zwangsläufig als „falsch positiv“ zu bezeichnen. Die Autorengruppe empfiehlt daher, bei Patienten mit Angina pectoris eine pathologische Ergometrie auch ohne Vorliegen einer KHK als primär pathologisch im Sinne einer Ischämie (INOCA) einzustufen bzw. an eine ANOCA zu denken [22].

Risikostratifikation nach Myokardinfarkt

In der Rekonvaleszenz nach akutem Myokardinfarkt dient die Ergometrie neben der Diagnostik einer möglichen Residualischämie vor allem der Bestimmung der kardiopulmonalen Belastbarkeit sowie der Risikostratifikation. Insbesondere Störungen der Erregungsausbreitung oder belastungsinduzierbare ventrikuläre Arrhythmien spielen eine Rolle für die weitere klinische Nachbeobachtung der Patienten.

Beurteilung. Hinsichtlich der Beurteilung gelten die gleichen Kriterien wie bei der diagnostischen Abklärung der KHK (s. oben). Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass ein neu aufgetretener deutlicher Leistungsabfall als klinisches Äquivalent einer möglichen KHK-Progression angesehen werden kann.

Patienten nach Koronarrevaskularisation

In Gefolge einer interventionellen oder chirurgischen Revaskularisationsmaßnahme können regelmäßige Belastungstests sinnvoll sein, um eventuell auftretende „stumme“ Myokardischämien detektieren zu können. Dies erscheint insbesondere dann sinnvoll, wenn vor der Revaskularisation die Ergometrie deutlich pathologische Befunde gezeigt hatte bzw. eine erhöhte Risikokonstellation für eine In-Stent-Stenose, Bypassverschluss, oder KHK-Progression besteht. Der Belastungstest sollte bei Wiederauftreten von Symptomen erwogen werden. Obwohl bei stabilen Patienten in der Vergangenheit Belastungstests in 12-monatigen Abständen empfohlen wurden, gibt es zu diesem Vorgehen unverändert keine prospektiven Daten. Bei sportlich aktiven Patienten mit bekannter KHK und Zustand nach Myokardrevaskularisation wird vor Beginn des ärztlich

empfohlenen Trainingsprogrammes eine Ergometrie mit maximaler Ausbelastung empfohlen [23]. Darüber hinaus werden routinemäßige Ergometrien bei revaskularisierten Patienten ohne die vorgenannte Risikokonstellationen nicht empfohlen.

Evidenzbasierte Kriterien jenseits des ST-Segmentes: Beurteilung des Belastungs-EKGs zur Risikoabschätzung und Prognosebeurteilung [12, 23–28]

Obwohl die Ergometrie bei der Diagnosestellung der KHK nur bei Patienten mit einer mittleren Vortestwahrscheinlichkeit indiziert ist (s. oben) spielt das Belastungs-EKG unabhängig hiervon zur Prognoseabschätzung eine wichtige Rolle [14, 24]. Dabei hat sich die Bestimmung der Belastungskapazität bzw. der „kardiorespiratorischen Fitness“ (CRF) als stärkster Prädiktor erwiesen [25, 26]; in einer Metaanalyse von Kodama et al. erwies sich ein Cut-off von 7,9 METs als bester Diskriminator sowohl hinsichtlich der Gesamt mortalität als auch des Auftretens kardiovaskulärer Ereignisse [25]. Diese Beurteilung kann in gleicher Weise auf die Fahrradergometrie übertragen werden. Die Aussagekraft – insbesondere des Bruce-Protokolls – ist allerdings bei älteren, adipösen oder untrainierten Probanden limitiert [12]. Eine chronotrope Inkompetenz unter Belastung stellt einen weiteren Prädiktor unabhängig vom Vorliegen einer KHK dar. Diese muss jedoch altersadjustiert werden, da mit zunehmendem Alter die Spitzenfrequenz unter Belastung abnimmt; hier hat sich die Kalkulation der relativen Herzfrequenzreserve (auch: „chronotropic index“) als Marker der chronotropen Antwort herausgestellt [27]. Ein weiterer Frequenz-basierter Marker ist die Herzfrequenz in der unmittelbaren Erholungsphase („heart rate recovery“ [HRR]). Allerdings ist die Magnitude der HRR abhängig vom Erholungsprotokoll und die

Tab. 8 Indikationen zum Belastungs-EKG bei Patienten mit Diabetes mellitus [43]	
<i>Empfehlungsgrad IIa</i>	Beurteilung von asymptomatischen Patienten mit Diabetes mellitus, die eine intensive körperliche Aktivität planen (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad IIb</i>	Beurteilung von Personen mit mehreren Risikofaktoren zur Beratung einer Risikominderung (Lebensstil-Management; Kardiovaskuläre Medikation; Evidenz C)
	Beurteilung von asymptomatischen Männern über 45 J. und Frauen über 55 J., die beabsichtigen, sich regelmäßig körperlich zu betätigen oder die in Berufen mit potenzieller Gefährdung anderer Menschen tätig sind oder die weitere Risikofaktoren für eine KHK haben (periphere arterielle Verschlusskrankheit, chronische Niereninsuffizienz etc.) (Evidenz B/C)
<i>Empfehlungsgrad III</i>	Routinemäßiges Screening von asymptomatischen Diabetikern ist nicht empfohlen (Evidenz B)

Tab. 9 Indikationen zum Belastungs-EKG in der Rhythmusdiagnostik. (Mod. nach: [45–54])	
<i>Empfehlungsgrad I</i>	Patienten mit ventrikulären Rhythmusstörungen und mittlerem bis hohem Risiko für eine KHK zur Provokation von Ischämie oder ventrikulären Arrhythmien (Evidenz B)
	Patienten mit bekannter oder vermuteter belastungsinduzierbarer ventrikulärer Arrhythmie (einschließlich katecholaminerger polymorpher VT/CPVT) zur Diagnose und Prognoseabschätzung (Evidenz B)
	Beurteilung der Einstellung eines frequenzadaptiven Schrittmachersystems (Evidenz B)
<i>Empfehlungsgrad IIa</i>	Beurteilung von Patienten mit bekannten oder vermuteten Arrhythmien (z. B. Belastungskapazität unter frequenzkontrollierender Medikation bei Vorhofflimmern) (Evidenz C)
	Beurteilung der chronotropen Kompetenz (Evidenz C)
	Beurteilung nach medikamentöser, interventioneller (Katheterablation) oder operativer Therapie bei Patienten mit belastungsinduzierten Arrhythmien (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad IIb</i>	Untersuchung bei isolierten ventrikulären Extrasystolen bei Patienten mittleren Alters ohne Hinweise auf eine KHK (Evidenz B/C)
	Untersuchung bei AV-Block I. Grades oder AV-Block II. Grades (Typ Wenckebach) (Evidenz B/C)
	Linksschenkelblock, Rechtsschenkelblock oder vereinzelte ventrikuläre Extrasystolen vor Teilnahme an Wettkampfsport (Evidenz B)
	Nichtinvasive Risikostratifizierung bei Präexzitationssyndromen (Evidenz B)
<i>Empfehlungsgrad III</i>	Routineuntersuchung bei vereinzelten ventrikulären Extrasystolen jüngerer Patienten wird nicht empfohlen (Evidenz C)

Literatur in diesem Punkt etwas uneinheitlich. Es hat sich aber als pathologischer Grenzwert eine HRR von < 12 Schlägen eine Minute nach Beendigung der Belastung etabliert [12, 28].

Weiterhin spielen Belastungsuntersuchungen in der Sportmedizin eine Rolle, einerseits zur Risikoabschätzung bei hochtrainierten Athleten, andererseits in der Beratung von Patienten mit kardiovaskulären Erkrankungen, vor Beginn freizeit- oder ausdauersportlicher Aktivitäten [23, 29]. So wird beispielsweise eine Ergometrie als Teil der Routineabklärung von Patienten mit HCM vor sportlicher Aktivität empfohlen [30].

Beim kardiovaskulären Management von Patienten vor geplanten nichtkardialen operativen Eingriffen spielt die Ergometrie bei Verdacht auf eine stenosierende KHK nur eine Rolle, wenn keine bildgebenden Verfahren verfügbar sind. Zur Bestimmung der funktionellen Kapazität nur im Fall einer nicht wegweisenden Anamnese/klinischen Abschätzung [31].

Ergometrie bei arterieller Hypertonie (■ Tab. 7)

Bei der Beurteilung des Blutdruckanstiegs unter submaximaler Ergometrie sind verschiedene Faktoren wie Alter, arterielle Gefäßsteifigkeit, Blutdruck in Ruhe vor Belastung, Geschlecht, körperliche Fitness und Körpergewicht in Betracht zu ziehen. Unverändert besteht kein Konsens hinsichtlich der „normalen“ Blutdruckantwort unter ergometrischer Belastung; daher findet die Ergometrie in den aktuellen Hypertonie-Leitlinien aufgrund fehlender standardisierter Definitionen und Methoden zur Vorhersage der zukünftigen Entwicklung eines Bluthochdrucks oder zur Therapiekontrolle einer Hypertonie keine Erwähnung [32], obwohl Beobachtungen nahelegen, dass erhöhte Blutdruckwerte auf niedrigen Belastungsstufen in der Ergometrie eine manifeste/behandlungswürdige arterielle Hypertonie demaskieren können [33]. Eine kürzlich publizierte Metaanalyse zeigt, dass durch einen überschießenden Blutdruckanstieg während der Ergometrie eine maskierte Hypertonie diagnostiziert

werden kann [34]. Zudem scheinen erhöhte systolische Blutdruckwerte bei moderater Belastung linear mit dem Risiko einer KHK-Entwicklung assoziiert zu sein [35]. Bedeutsam ist zudem das Verhalten des Blutdrucks in der Erholungsphase der Ergometrie bei Patienten mit Hypertonie. Patienten ohne Diagnose einer Hypertonie zeigten deutlich niedrigere maximale Blutdruckwerte während der Belastung und eine signifikant schnellere Normalisierung der Blutdruckregulation in der Erholungsphase [36].

Beurteilung. Neben den oben erwähnten pathologischen Befunden, die eine relevante Myokardischämie nahelegen, ist eine ausgeprägte Blutdruckentgleisung vor allem dann als Hinweis für eine behandlungsbedürftige Hypertonie anzusehen, wenn diese Entgleisung noch in der Erholungsphase persistiert. Die diagnostischen Grenzwerte zur Diagnosestellung einer arteriellen Hypertonie sind zwar nicht in großen Studien festgelegt, als konsensual gelten Werte von ≥ 240 mm Hg systolisch und ≥ 110 mm Hg

Tab. 10 Belastungsuntersuchung bei Patienten mit Herzklappenvitien [55–59]	
<i>Empfehlungsgrad I</i>	Asymptomatische hochgradige Aortenklappenstenose zur Demaskierung klinischer Symptome bzw. zur Risikostratifikation (Evidenz C)
	Präoperative Risikoabschätzung vor nichtkardialer Chirurgie bei Patienten mit asymptomatischer hochgradiger Aortenklappenstenose (Evidenz C)
	Risikoabschätzung vor Schwangerschaft bei asymptomatischen höhergradigen Klappenitien (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad IIa</i>	Objektivierung der klinischen Symptomatik und Bestimmung der körperlichen Leistungsfähigkeit bei anderen Klappenitien (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad IIb</i>	Management von asymptomatischen Patienten mit postreumatischer Mitralklappenstenose (MÖF $\leq 1,5 \text{ cm}^2$) und niedriger Risikokonstellation (Evidenz C)
<i>Empfehlungsgrad III</i>	Symptomatische hochgradige Vitien, insbesondere symptomatische hochgradige Aortenklappenstenose

diastolisch. In den aktuellen ESC-Leitlinien zum Management der Hypertonie spielt die Ergometrie in den Empfehlungen praktisch keine relevante Rolle mehr, lediglich **kann** eine Blutdruckmessung unter Ergometerbedingungen erwogen werden, falls zusätzliche klinische Informationen zum kardiovaskulären Risiko erwartet werden (Klasse IIb, Evidenzgrad C).

Ergometrie bei Herzinsuffizienz

Bei der Diagnose der Herzinsuffizienz mit erhaltener LV-Funktion (HFpEF) spielt die Ergometrie im Rahmen einer Stressechokardiographie eine Rolle bei gleichzeitiger Erfassung von Änderungen des linksventrikulären (E/e') sowie des pulmonalarteriellen Drucks [37]. Eine kürzlich publizierte Analyse zur HFpEF zeigte die Wertigkeit einer Ergometrie mit Stressechokardiographie bei der Abklärung der Verdachtsdiagnose einer HFpEF im Setting einer Dyspnoe-Ambulanz [38]. Zudem gibt es Empfehlungen zur Durchführung der Spiroergometrie im Rahmen der Evaluation hinsichtlich einer Herztransplantation bzw. Indikation zum Linksherzunterstützungssystem [39].

Beurteilung. Neben den oben erwähnten pathologischen Befunden, die eine relevante Myokardischämie nahelegen, sind eine ausgeprägte Dyspnoe sowie das Auftreten ventrikulärer Rhythmusstörungen mit einer Herzinsuffizienz assoziiert. Zudem kann die zusätzliche pulsoxymetrische Bestimmung der O_2 -Sättigung ergänzend hilfreich sein (nicht obligat bei der Ergometrie). Auch das Auftreten einer Zyanose stellt ein diagnostisches Abbruchkriterium dar.

Ergometrie bei HOCM/Erwachsenen mit kongenitalen Vitien (EMAH)

Bei der Diagnose der HOCM kann die Ergometrie zur Risikostratifizierung beitragen [40, 41]. Speziell die Spiroergometrie spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Definition des optimalen Zeitpunktes von Interventionen bzw. Re-Interventionen bei EMAH-Patienten. Ebenso kann hier die Ergometrie bei der Abklärung belastungsinduzierter Arrhythmien hilfreich sein [42]. Insbesondere besteht ein Empfehlungsgrad IIa für die Durchführung einer Ergometrie zur Risikostratifizierung von Patienten mit HOCM [40]. Dabei scheint bei Anwendung eines sog „Burst“-Exercise-Protokolls die Wahrscheinlichkeit höher zu sein, ventrikuläre Rhythmusstörungen unter Belastung zu induzieren und somit die Risikostratifikation bei HOCM zu verbessern [41].

Beurteilung. Als pathologische Befunde gelten neben den typischen Kriterien für eine Ischämiereaktion das Auftreten einer klinischen Herzinsuffizienzsymptomatik sowie – im Rahmen der Risikostratifikation – der Nachweis belastungsinduzierter ventrikulärer Rhythmusstörungen.

Diabetes mellitus (■ Tab. 8)

Bei Patienten mit manifestem Diabetes mellitus werden die regelhafte Durchführung eines Belastungstests zur Abklärung einer möglicherweise vorliegenden strukturellen Herzerkrankung und insbesondere die Zuverlässigkeit von Ischämietests bei Diabetikern aufgrund verschiedener Störfaktoren kontrovers diskutiert [43]. Da die Durchführung eines aeroben Belastungs-

trainings bei Diabetikern eine Klasse-IA-Indikation der „Lifestyle-Modifikation“ darstellt, erscheint es sinnvoll, eine Ergometrie zur Beurteilung voranzustellen (Klasse IIa C: s. unten). Hingegen ist das routinemäßige nichtinvasive Screening auf eine KHK bei asymptomatischen Diabetikern nicht empfohlen [44, 45].

Patienten mit Rhythmusstörungen (■ Tab. 9)

Sinnvoll ist eine Ergometrie bei Patienten, die anamnestisch eindeutige Kriterien für eine belastungsinduzierte Rhythmusstörung aufweisen. Zudem besteht eine Klasse-I-Empfehlung zur Beurteilung der chronotropen Kompetenz. Die Sinnhaftigkeit der Ergometrie zur Risikoabschätzung von asymptomatischen Patienten mit ventrikulärer Präexzitation ist hingegen durch jüngere Fallberichte infrage gestellt worden, in welchen bei Patienten mit intermittierender Präexzitation unter Katecholamineinfluss das Vorhandensein einer Bahn mit kurzer Refraktärzeit beschrieben wurde [46]. In den aktuellen ESC-Leitlinien zum Management supraventrikulärer Tachyarrhythmien erhält die nichtinvasive Risikostratifizierung daher lediglich eine IIb-B-Empfehlung [47], und eine Abklärung durch eine EPU wird präferiert. Zudem ist die Ergometrie sinnvoll, um bei symptomatischen Palpitationen eine ursächliche (oft ventrikuläre) Extrasystolie besser zu charakterisieren. Gehäufte und komplexe, in der Regel polymorphe ventrikuläre Rhythmusstörungen in der Erholungsphase nach der Ergometrie sind prognostisch eher als ungünstig zu bezeichnen und sollten weiter abgeklärt werden. Bei Patienten mit Long-QT-Syndrom kann die Bestimmung der QT_c-Dauer in der 4. Minute nach Belastungsende der Risikostratifikation dienen [48]. Bei Verdacht auf eine polymorphe katecholaminerge ventrikuläre Tachykardie (CPVT) ist zur Diagnostik oder zum Ausschluss eine Ergometrie erforderlich [48]. Jüngst publizierte Daten legen nahe, dass die diagnostische Ausbeute mit einem sog „burst exercise testing“ steigt. Hierbei wird die Belastung abrupt hochintensiv auf der Belastungsstufe begonnen, welche in einer Standardergometrie als die höchste erreichte Stufe ermittelt wurde [49].

Beurteilung. Als diagnoseweisender Befund gilt die Reproduzierbarkeit der klinischen Symptomatik im Kontext der Induktion – zumeist tachykarder – Rhythmusstörungen.

Herzklappenvitien (■ Tab. 10)

Die primäre Intention einer Belastungsuntersuchung bei Klappenvitien ist die Abklärung bzw. Demaskierung einer unklaren Symptomatik [55]. Ein weiterer klinischer Nutzen besteht in der Risikostratifikation von Patienten mit Aortenklappenstenose. So stellt beispielsweise bei asymptomatischen Patienten mit schwerer Aortenklappenstenose ein belastungsinduzierter Anstieg des mittleren Gradienten > 20 mm Hg nach den aktuellen ESC-Leitlinien [55, 56] eine Indikation zum Aortenklappenersatz dar. Bei symptomatischen hochgradigen Klappenvitien sollte eine Ergometrie unterbleiben (Klasse III).

Spezielle Indikationsstellung zur Ergometrie

Leistungsuntersuchung Sportmedizin. Während das Ruhe-EKG bei Sporttreibenden aller Altersstufen zum Standard einer sportärztlichen Vorsorgeuntersuchung gehört, gibt es für routinemäßige Ergometrien bei Freizeitsportlern keine evidenzbasierte Empfehlung [60]. Hingegen spielt bei Athleten zur Bestimmung der körperlichen Fitness die maximal erzielte Leistung in Watt, MET oder als $VO_2\max$ in der Spiroergometrie neben der Laktatmessung eine wichtige Rolle [60]. Bei spezifischen klinischen Fragestellungen kommt die Ergometrie zum Tragen, um beispielsweise bei Sportlern den Verdacht auf eine relevante strukturelle Herzerkrankung auszuschließen [60–64] oder bei Verdacht auf CPVT eine Risikostratifikation durchzuführen.

Leistungsuntersuchung Arbeitsmedizin. Die Ergometrie ist für bestimmte Berufsgruppen obligater Bestandteil der arbeitsmedizinischen Vorsorge/Beurteilung. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen präventiv-arbeitsmedizinischen und leistungsphysiologischen Indikationen. Diesbezüglich sei auf die weiterführende einschlägige Literatur verwiesen [64].

Mindestanforderungen zur Dokumentation der Ergometrie

Zur vollständigen Dokumentation der Belastungsuntersuchung sollte ein vordefiniertes Protokoll verwendet werden, das neben der Indikationsstellung und der aktuellen Medikation vor allem eine Aufzeichnung wichtiger hämodynamischer Parameter enthält sowie Auftreten von Symptomen und EKG-Veränderungen dokumentiert. Das Belastungs-EKG muss aufgezeichnet und archiviert werden (in Papierform oder digital).

Technologischer Ausblick

Ob neue hochauflösende elektrokardiographische Marker wie die hochfrequente QRS-Analyse die Ergometrie in der Ischämiediagnostik optimieren werden, bleibt Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen [65]. Durch Anwendung von künstlicher Intelligenz (KI) in der Elektrokardiographie sind vielversprechende Weiterentwicklungen hinsichtlich der Genauigkeit der ergometrischen EKG-Diagnostik zu erwarten [66, 67].

Fazit für die Praxis

Die Ergometrie bleibt weiterhin ein zentrales Untersuchungsverfahren in der klinischen Kardiologie. Ihre Wertigkeit hinsichtlich der Hauptfragestellung – der Ischämiediagnostik – wurde in der Ära der bildgebenden Ischämiediagnostik zurecht einer Neubeurteilung unterzogen; die Indikation soll sich an der Prätest-Wahrscheinlichkeit und Abschätzung der Risikofaktor-gewichteten klinischen Wahrscheinlichkeit einer stenosierenden KHK orientieren. Allerdings sind aktuell in Deutschland die nach Leitlinien geforderten Bildgebungsverfahren aus Kosten- und Kapazitätsgründen nicht in der gewünschten Breite verfügbar. Darüber hinaus ermöglicht die Ergometrie ergänzenden Informationsgewinn hinsichtlich des Blutdrucks sowie der Diagnostik und prognostischen Krankheitsabschätzung bei verschiedenen kardiovaskulären Krankheitsbildern.

Korrespondenzadresse



Prof. Dr. T. Klinghenben
Praxis für Kardiologie Bonn
Im Mühlenbach 2 B, Bonn, Deutschland
klinghenben@bonn-kardiologie.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Den Interessenkonflikt der Autoren finden Sie online auf der DGK-Homepage unter <http://leitlinien.dgk.org/> bei der entsprechenden Publikation.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

1. Klinghenben T, Trappe JH, Bosch R, Löllgen H (2018) Manual zum Stellenwert der Ergometrie. Kardiologie 12:342–355
2. Trappe JH, Löllgen H (2000) Leitlinien zur Ergometrie. Z Kardiol 89:821–837
3. Knuuti J, Wijns W, Saraste A, for ESC Task Force on management of stable coronary artery disease et al (2019) ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease. Eur Heart J 219(41):407–477
4. Vrints C, Andreotti F, Koskinas KC et al (2024) 2024 ESC guidelines on the management of chronic coronary syndromes. Eur Heart J 45:3415–3537
5. Genders TS, Steyerberg EW, Alkadhi H et al (2011) A clinical prediction rule for the diagnosis of coronary artery disease: validation, updating, and extension. Eur Heart J 32:1316–1330
6. Biavati F, Saba L, Boussousou M et al (2024) DICHARGE trial group. Coronary artery calcium score predicts major adverse cardiovascular events in stable chest pain. Radiology. <https://doi.org/10.1148/radiol.231557>
7. Bundesärztekammer (BÄK), Kassenärztliche Bundesvereinigung (KBV) (2019) Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). Nationale VersorgungsLeitlinie (NVL) Chronische KHK, Version 6. www.khk-versorgungsleitlinien.de. Zugriffen: 18. Aug. 2024
8. Gibbons RJ, Balady GJ, Bricker T et al (2002) ACC/AHA 2002 Guideline Update for Exercise Testing. A report of the ACC/AHA Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing). Circulation 106:1883–1892

9. Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (Hrsg) (2010) Ergometrie – Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis, 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg
10. Colquhoun D, Freedman B, Cross D et al (2015) Clinical Exercise Stress Testing in Adults (2014). *Heart Lung Circ* 24:831–837
11. Myers J, Forman DE, Balady GJ et al (2014) Supervision of exercise testing by nonphysicians. A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 130:1014–1027
12. Fletcher GF, Ades PA, Kligfield P et al (2013) Exercise Standards for Testing and Training. A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 128:873–934
13. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE et al (1983) Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol* 55:1558–1564
14. American College of Sports Medicine, Riebe D, Ehrman JK, Liguori G et al (2018) ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription, 10. Aufl. Wolters Kluwer Health, Philadelphia, PA
15. Primus C, Wonisch M, Berent Auer RJ (2022) Praxisleitlinien Ergometrie (Österreichische Kardiologische Gesellschaft). *J Kardiologie* 29:17–26
16. Lee C, Dow S, Shah K et al (2023) Complications of exercise and pharmacologic stress echocardiography. *Front Cardiovasc Med*. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1228613>
17. Winther S, Schmidt SE, Mayrhofer T et al (2020) Incorporating coronary calcification into pre-test assessment of the likelihood of coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 76:2421–2432
18. Rasmussen LD, Fordyce CB, Nissen L et al (2022) The PROMISE Minimal Risk Score improves risk classification of symptomatic patients with suspected CAD. *JACC Cardiovasc Imaging* 15:1442–1454
19. Fordyce CB, Douglas PS, Roberts RS et al (2017) Identification of patients with stable chest pain deriving minimal value from noninvasive testing. The PROMISE minimal-risk tool, a secondary analysis of a randomized clinical trial. *JAMA Cardiol* 2:400–408
20. Cremer PC, Wu Y, Ahmed HM et al (2017) Use of sex-specific clinical and exercise risk scores to identify patients at increased risk for all-cause mortality. *JAMA Cardiol* 2:15–22
21. Israel A, Kivity S, Sidi Y et al (2016) Use of exercise capacity to improve SCORE risk prediction model in asymptomatic adults. *Eur Heart J* 37:2300–2306
22. Sinha A, Dutta U, Demir OM et al (2024) Rethinking false positive exercise electrocardiographic stress tests by assessing coronary microvascular function. *J Am Coll Cardiol* 83:291–299
23. Pelliccia A, Sharma S, Gati S et al (2020) ESC Guidelines on Sports Cardiology and Exercise in Patients with Cardiovascular disease. *Eur Heart J* 41:17–96
24. Kligfield P, Lauer MS (2006) Exercise electrocardiogram testing: beyond the ST segment. *Circulation* 114:2070–2082
25. Myers J, Prakash M, Froelicher V et al (2002) Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing. *N Engl J Med* 346:793–801
26. Kodama S, Saito K, Tanaka S et al (2009) Cardio-respiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: a meta-analysis. *JAMA* 301:2024–2035
27. Lauer MS, Francis GS, Okin PM et al (1999) Impaired chronotropic response to exercise stress testing as a predictor of mortality. *JAMA* 281:524–529
28. Cole CR, Blackstone EH, Pashkow FJ et al (1999) Heart-rate recovery immediately after exercise

German Cardiac Society manual on the clinical value of ergometry. From the Committee for Clinical Cardiovascular Medicine

Ergometry remains unchanged a basic diagnostic tool in clinical cardiology, even though its relevance in ischemia diagnostics has changed in light of the increased use of cardiac imaging. It plays an important role in patients with angina pectoris and ischemia without obstructive coronary disease with respect to the differential diagnosis of angina/ischemia and no obstructive coronary arteries (ANOCA/INOCA). Additionally, the importance of ergometry has recently increased in sports cardiology as well as in the risk stratification, for example in patients with arrhythmia or hypertrophic cardiomyopathy.

Keywords

Risk stratification · Coronary artery disease · Arrhythmias · Sports cardiology · Structural heart diseases

- as a predictor of mortality. *N Engl J Med* 341:1351–1357
29. Mont L, Pelliccia A, Sharma S et al (2017) Pre-participation cardiovascular evaluation for athletic participants to prevent sudden cardiac death: position paper from EHRA and EACPR. *Eur J Prev Cardiol* 24:41–69
30. Olivetto I, Maron BJ, Monterecci A et al (1999) Prognostic value of systemic blood pressure response during exercise in a community-based patient population with hypertrophic cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 33:2044–2051
31. Halvorsen S, Mehilli J, Cassese S et al (2022) 2022 ESC Guidelines on cardiovascular assessment and management of patients undergoing non-cardiac surgery. *Eur Heart J* 43:3826–3924
32. McEvoy JW, McCarthy CP, Bruno RM et al (2024) 2024 ESC/ESH Guidelines for the management of elevated blood pressure and hypertension. *Eur Heart J* 45:3912–4018
33. Schultz MG, Picone DS, Nikolic SB et al (2016) Exaggerated blood pressure response to early stage of exercise stress testing and presence of hypertension. *J Sci Med Sport* 19:1039–1042
34. Cuspidi C, Gherbesi E, Faggiano A et al (2023) Masked hypertension and exaggerated blood pressure response to exercise: a review and meta-analysis. *Diagnostics* 13:1005. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13061005>
35. Mariampillai JE, Liestol K, Kjeldsen SE et al (2020) Exercise systolic blood pressure at moderate workload is linearly associated with coronary disease risk in healthy men. *Hypertension* 75:44–50
36. Ghidoni C, van der Stouwe JG, Würzburger L et al (2024) Blood pressure response during exercise testing in individuals with and without hypertension: The value of the recovery phase. *Eur J Clin Invest*. <https://doi.org/10.1111/eci.14285>
37. Guazzi M, Wilhelm M, Halle M et al (2022) Exercise testing in heart failure with preserved ejection fraction: an appraisal through diagnosis, pathophysiology and therapy—A clinical consensus statement of the Heart Failure Association and EAPC of the ESC. *Eur J Heart Fail* 24:1327–1345
38. Verwerf J, Soens L, Wynants J et al (2023) Heart failure with preserved ejection fraction: relevance of a dedicated dyspnoea clinic. *Eur Heart J* 44:1544–1556
39. Corrà U, Agostoni PG, Anker SD et al (2018) Role of cardiopulmonary exercise testing in clinical stratification in heart failure. A position paper from the Committee on Exercise Physiology and Training of the Heart Failure Association of the ESC. *Eur J Heart Fail* 20:3–15
40. Ommen SR, Ho CY, Asif IM et al (2024) 2024 AHA/ACC/HRS Guideline for the management of hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 149:e1239–e1311
41. Alvarez C, Shaik A, Ahmed F et al (2024) A pilot study of “burst” exercise testing in hypertrophic cardiomyopathy. *Heart Rhythm* 21:113–114
42. Baumgartner H, de Backer J, Babu-Narayan SV et al (2021) 2020 ESC Guidelines for the management of adult congenital heart disease. *Eur Heart J* 42:563–645
43. Marx N, Federici M, Schütt K et al (2023) 2023 ESC Guidelines for the management of cardiovascular disease in patients with diabetes. *Eur Heart J* 39:4043–4140
44. Lindholt JS, Sogaard R, Rasmussen LM et al (2022) Five-year outcomes of the Danish Cardiovascular Screening (DANCAVAS) trial. *N Engl J Med* 387:1385–1394
45. Clerc OF, Fuchs TA, Stehli J et al (2018) Noninvasive screening for coronary artery disease in asymptomatic diabetic patients: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 19:838–846
46. Gemma LW, Steinberg L, Prystowsky E et al (2013) Development of rapid preexcited ventricular response to atrial fibrillation in a patient with intermittent preexcitation. *J Cardiovasc Electrophysiol* 24:347–350
47. Brugada J, Katritsis DG, Arbelo E et al (2020) 2019 ESC guidelines for the management of patients with supraventricular tachycardia. *Eur Heart J* 41:655–720
48. Priori SG, Wilde AA, Horie M et al (2013) HRS/EHRA/APHRS expert consensus statement on the diagnosis and management of patients with inherited primary arrhythmia syndromes. *Europace* 15:1389–1406
49. Roston TM, Kallas D, Davies B et al (2021) Burst exercise testing can unmask arrhythmias in patients with incompletely penetrant catecholaminergic polymorphic ventricular tachycardia. *JACC Clin Electrophysiol* 7:437–441
50. Bogossian H, Alhanafi D, Kloppe A et al (2023) Die Ergometrie: eine relevante Untersuchungsmethode in der Rhythmologie. *Herzschrit Elektrophys* 34:333–338
51. Van Gelder IC, Kotecha D et al (2024) 2024 ESC Guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with EACTS. *Eur Heart J* 45:3314–3414

52. Zeppenfeld K, Tfelt-Hansen J, de Riva M et al (2022) 2022 ESC Guidelines for the management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death. *Eur Heart J* 43:3997–4126
53. Pedersen CT, Kay GN, Kalman J et al (2014) EHRA/HRA/APHR expert consensus on ventricular arrhythmias. *Europace* 16:1257–1283
54. Dionne A, E'Leary ET, Baskar S et al (2019) Exercise testing in the management of arrhythmias. In: Rhodes J, Alexander ME, Opatowsky AR (Hrsg) *Exercise Physiology for the pediatric and congenital cardiologist*. Springer, 5235–255
55. Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F et al (2021) 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J* 43:561–632
56. Redfors B, Piabrot P, Gillam LD et al (2017) Stress testing in asymptomatic aortic stenosis. *Circulation* 135:1956–1976
57. Henri C, Pierard LA, Lancellotti P et al (2014) Exercise testing and stress imaging in valvular heart disease. *Can J Cardiol* 30:1012–1026
58. Singh A, Greenwood JP, Berry C et al (2017) Comparison of exercise testing and CMR measured myocardial perfusion reserve for predicting outcome in asymptomatic aortic stenosis: the Prognostic Importance of Microvascula Dysfunction in Aortic Stenosis (PRIMIDAS) Study. *Eur Heart J* 38:1222–1229
59. Magne J, Lancellotti P, Pierard LA (2010) Exercise pulmonary hypertension in asymptomatic degenerative mitral regurgitation. *Circulation* 122:33–41
60. Maron BJ, AHA/ACC Scientific Statement et al (2015) Eligibility and disqualification recommendations for competitive athletes with cardiovascular abnormalities: Task Force 2: Preparticipation Screening for Cardiovascular Disease in Competitive Athletes. *J Am Coll Cardiol* 66:2356–2361
61. Salvati A, Ora J, Donatucci B, Rogliani P (2016) Cardiopulmonary exercise test in athletes. *Med Sport* 69:289–296
62. (2024) S2k-Leitlinie Sportmedizinische Vorsorgeuntersuchung der DGSP. https://register.awmf.org/assets/guidelines/066-002l_S2k_Sportmedizinische-Vorsorgeuntersuchung_2024-04.pdf. Zugriffen: 3. Febr. 2025
63. Löllgen H, Leyk D (2018) Exercise testing in sports medicine. *Dtsch Arztebl Int* 115:409–416
64. Chatterjee M, Schmeißer G (2017) Updated guideline for ergometry within the framework of occupational physical examinations. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed (asu)* 52:913–921 (Aktualisierter Leitfaden für die Ergometrie im Rahmen arbeitsmedizinischer Untersuchungen)
65. Balfour PC, Gonzalez JA, Shaw PW et al (2020) High-frequency QRS-analysis to supplement ST evaluation in exercise stress electrocardiography: Incremental diagnostic accuracy and net reclassification. *J Nucl Cardiol* 27:2063–2075
66. Siontis KC, Noseworthy PA, Attia ZI et al (2021) Artificial intelligence-enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. *Nat Rev Cardiol* 18:465–478
67. Barzilai DH, Cohen-Shelly M, Sorin V et al (2024) Machine learning in cardiac stress test interpretation: a systematic review. *Eur Heart J Digit Health* 5:401–408

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.