Belastungsuntersuchungen bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler

Sarah Simmen[1], Emanuela Valsangiacomo Buechel[1], Martin Christmann[1], Zürich

Einleitung

Belastungsuntersuchungen stellen ein wichtiges Instrument zur Abschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit nicht nur von Sportlern, sondern auch von Patienten, insbesondere mit Lungen- und Herzerkrankungen, sowohl im Kindes- als auch im Erwachsenenalter dar. In der pädiatrischen Kardiologie dienen Belastungsuntersuchungen zum einen zur Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit im Verlauf nach der Behandlung eines angeborenen Herzfehlers, zum anderen auch zur Abklärung möglicher myokardialer Ischämien oder Rhythmusstörungen in der Nachsorge[1)].

Ziel der Belastungsuntersuchung ist eine maximale Leistungserbringung. Hierbei werden kontinuierlich und gleichzeitig verschiedene Parameter gemessen und berechnet. Belastungsuntersuchungen können als Ergometrie oder als Spiroergometrie durchgeführt werden. Bei der Ergometrie werden während zunehmender Last (meist gemessen in Watt) die Vitalparameter (Blutdruck, Herzfrequenz, periphere Sauerstoffsättigung) zusammen mit einer EKG-Ableitung (in der Regel 12-Kanal-EKG) dokumentiert. Bei der Spiroergometrie werden zusätzlich durch ein Mundstück oder eine Maske die Sauerstoffaufnahme (VO_2) und CO_2-Abgabe (VCO_2) gemessen; somit wird das pulmonale System unter Belastung mitbeurteilt[2)].

Bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler beeinflussen einerseits die Physiologie des Herzfehlers, andererseits die resultierende Hämodynamik nach der operativen Korrektur die Leistungsfähigkeit. Für die rechtzeitige Erkennung einer Verschlechterung der Leistungsfähigkeit sollten bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler spiroergometrische Belastungsuntersuchungen in der kardiologischen Nachsorge seriell durchgeführt werden.

Grundlagen der Spiroergometrie

Hauptfunktion des kardiovaskulären Systems ist die ausreichende Sauerstoffbereitstellung für den Körper. Hierfür bedarf es eines engen Zusammenspiels von verschiedenen, am Sauerstofftransport und -metabolismus beteiligten Organsystemen (Abb.1). Der Gasaustausch von Sauerstoff (O_2) und Kohlendioxid (CO_2) wird über eine adäquate Lungenfunktion aufrechterhalten. Der Transport des mit Sauerstoff beladenen Blutes (gebunden an Hämoglobin in den Erythrozyten) benötigt ein funktionierendes zirkulatorisches System, bestehend aus der Blutpumpe Herz sowie dem Gefässsystem. In den sauerstoffabhängigen Endorganen wird Sauerstoff während des aeroben Stoffwechsels zu ATP, dem Energieträger unserer Körperzellen, metabolisiert. Letztendlich wird die gewonnene Energie in Leistung/Bewegung durch Muskelarbeit umgesetzt. Um unter Anstrengung vermehrte Arbeit leisten zu können, ist ein in allen Teilbereichen dieser Kaskade funktionierendes System notwendig. Einschränkungen auf einer oder mehrerer Ebenen können zu einer eingeschränkten körperlichen Leistungsfähigkeit führen. Die Spiroergometrie misst neben den sich verändernden Vitalparametern (z. B. Herzfrequenz, Blutdruck, Atemfrequenz, Sauerstoffsättigung) auch die Veränderung von Sauerstoff- und CO_2-Gehalt in Inspiration und Exspiration und korreliert diese zu der erbrachten Leistung. Weitere, unten beschriebene Parameter werden durch moderne Spiroergometrie-Geräte zusätzlich berechnet.

Indikationen, absolute Kontraindikationen und Abbruchkriterien

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Indikationen und Kontraindikationen und zeigt Abbruchkriterien einer Belastungsuntersuchung. Detaillierte Listen von Kontraindikationen sowie Abbruchkriterien bei Belastungstests wurden unter anderem von der American Thoracic Society (ATS) publiziert[1),3),4)].

Durchführung

Spiroergometrien bei Kindern müssen von einem erfahrenen Team durchgeführt und überwacht werden. Speziell bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler wird die Anwesenheit eines Kinderkardiologen empfohlen[5),6)]. Das Team soll mit Notfall- und Reanimationssituationen vertraut sein, auch wenn die Spiroergometrie eine sichere Untersuchung mit nur geringen Risiken für die Probanden darstellt[4),5)].

Um eine erfolgreiche Durchführung sicherzustellen, müssen Kinder vor der Untersuchung mit den Abläufen vertraut gemacht werden. Ferner ist bei Kindern zu beachten, dass sie emotional unreif sind und sie daher Ermutigung und positive Unterstützung vom Betreuungsteam brauchen, um die erwünschte Leistung zu erbringen[5)].

Belastungsuntersuchung können auf einem Laufband oder Fahrradergometer durchge-

Indikationen	Absolute Kontraindikationen	Abbruchkriterien
- Beurteilung der Belastungstoleranz und -intoleranz - Präoperatives Hilfsmittel für die Indikation eines Eingriffes - Erfassung von Herzrhythmusstörungen und Myokardischämien bei Belastung - Abklärung belastungsabhängiger Symptome - Überprüfung der Effektivität einer eingeleiteten Therapie	- Akuter, fieberhafter Infekt - Akuter Myokardinfarkt oder Instabile Angina pectoris - Akuter Asthmaanfall - Akute Myokarditis - Unkontrollierte schwere Hypertonie - Akute Entgleisung einer Stoffwechselstörung	- Subjektive Erschöpfung - Auffällige Blässe - Dyspnoe - Schwindel - Kopfschmerzen - Angina pectoris - Unphysiologische Blutdruck- oder Herzfrequenzantworten - Signifikante Herzrhythmusstörungen - Erregungsleitungs- oder Erregungsrückbildungsstörungen

Tabelle 1. Indikationen, Kontraindikationen und Abbruchkriterien von Belastungsuntersuchungen[1),3),4)]

[1]Abteilung Kardiologie, Kinder-Herzzentrum, Universitäts-Kinderklinik, Zürich

führt werden. Der Untersuchungszeitraum beträgt idealerweise 6–12 Minuten. Eine längere Untersuchung kann aufgrund nachlassender Motivation oder Aufmerksamkeit zu einem Abbruch des Tests vor Erreichen der maximalen Leistung führen[7]. Die gesamte Untersuchung erfolgt unter kontinuierlicher Überwachung von Herzrhythmus und Vitalparametern. Bei der Spiroergometrie atmet der Proband durch ein Mundstück oder eine Gesichtsmaske, mit einem darin eingebauten Filter, der stetig die O_2- und CO_2-Werte der Ein- und Ausatmungsluft misst. Anhand der erhobenen Messwerte können weitere Parameter direkt durch das Gerät berechnet werden.

Laufband vs. Fahrradergometer

Sowohl für Laufband als auch Fahrradergometer gibt es Vor- und Nachteile hinsichtlich der Anwendung in der pädiatrischen Kardiologie. Auf dem Laufband können bereits sehr kleine Kinder untersucht werden. Diesen wird zusätzlich ein Gurt angelegt, welcher an einem Seil befestigt ist und sie vor einem Sturz schützt. In der Literatur sind Spiroergometrien ab dem 3. Lebensjahr beschrieben[7]. Eine gewisse motorische Reife wird in diesem Fall vorausgesetzt. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese individuell sehr unterschiedlich ist und selten bereits bei 3-jährigen Kindern ausreicht.

Ein weiterer Vorteil des Laufbandes liegt in der den Kindern vertrauten Bewegung, welche im Vergleich zum Fahrradergometer die Arbeit einer grösseren Muskelmasse verlangt und bei der mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit das kardiovaskuläre System den limitierenden Faktor der Leistungserbringung darstellt[7]. Die 5–10% höheren VO_2max-Werte, die erreicht werden, stellen gegenüber dem Fahrradergometer ebenfalls einen Vorteil dar[7].

Anders als beim Laufband ist die Arbeitslast auf dem Fahrradergometer gewichtsunabhängig, was bei adipösen Patienten als wichtiger Vorteil angesehen wird[5]. Zudem wird auf dem Fahrradergometer aufgrund der kleineren Oberkörperbewegungen der Blutdruck zuverlässiger gemessen und das EKG weist weniger Artefakte auf.

Protokoll

Es existieren verschiedene Belastungsprotokolle. Man unterscheidet zwischen Stufen- und Rampenprotokollen. Bei Stufenprotokollen (wie z. B. dem Bruce-Protokoll) wird die Belastung stufenweise erhöht, wobei die Stufendauer meist 3 Minuten beträgt. Rampenprotokolle zeichnen sich durch eine sehr kurze Stufendauer aus, was für die Bestimmung der anaeroben Schwelle von Vorteil ist[7]. Abbildung 2 zeigt schematisch den Unterschied von Rampen- und Stufenprotokollen.

Parameter

Entsprechend Abbildung 1 erfordert die Leistungserbringung auch bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler ein enges Zusammenspiel zwischen den Systemen Atmung, Herzkreislauf und dem End-Organ Muskel. Die im Rahmen der Leistungsdiagnostik mittels Spiroergometrie gewonnen Parameter versuchen möglichst genau dieses Zusammenspiel zu charakterisieren. Graphisch werden von den modernen Spiroergometriegeräten die Messwerte in der 9-Felder-Tafel nach Wassermann dargestellt[8]. In der Folge werden die in der Beurteilung von Kindern mit einem angeborenen Herzfehler relevantesten Parameter zusammengestellt und Limitationen und Einflussfaktoren auf die Untersuchung benannt.

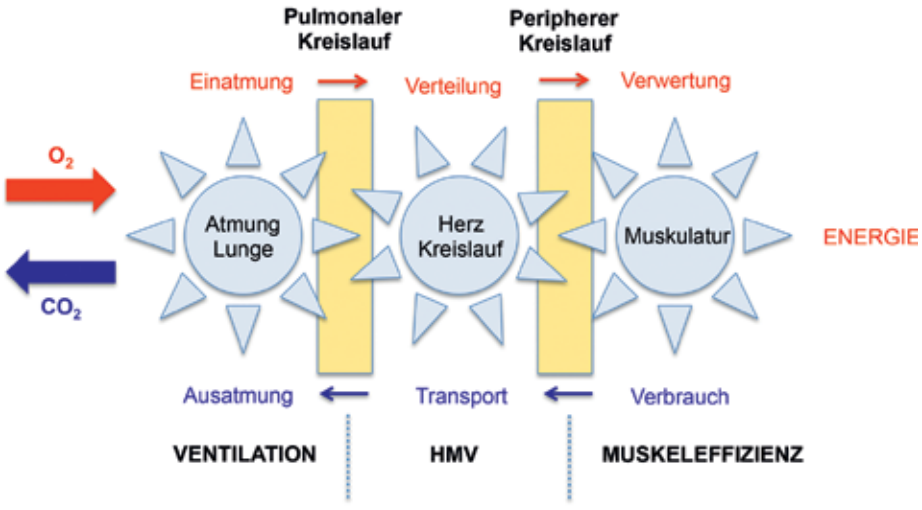


Abb. 1: Zusammenspiel der Organsysteme im Rahmen der O_2-Aufnahme und CO_2-Abgabe

Herzfrequenz

Die Herzfrequenz steigt bei gesunden Probanden während Belastung beinahe linear mit steigendem Sauerstoffverbrauch an. Gut trainierte Probanden zeigen einen verzögerten Anstieg der Herzfrequenz. Im Gegensatz dazu haben untrainierte Probanden oder Patienten mit Herzinsuffizienz oft einen schnelleren Herzfrequenzanstieg[4].

Das Verhalten der Herzfrequenz bei Kindern wurde in verschiedenen Studien untersucht. Die Antwort der Herzfrequenz bei Kindern ist unabhängig vom Alter und Geschlecht und variiert mit der Methode der Belastung[7),10)]. Werden Herzfrequenzwerte bei Fahrradbelastungen von 195/min und bei Laufbandbelastungen von 200/min erreicht, so wird dies als Ausbelastung betrachtet[11)].

Nach Beendigung einer Belastung sinkt die Herzfrequenz exponentiell ab, man spricht von der «Heart rate-Recovery» (HRR)[12)]. Die Herzfrequenz erholt sich schneller bei jüngeren Kindern, Knaben und nicht übergewichtigen Kindern[13)]. Herz Patienten hingegen zeigen häufig eine verzögerte HRR[12)]. Singh et al. zeigten, dass ein 12-wöchiges Rehabilitationsprogramm bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler zu einer deutlichen Besserung der HRR führte, ohne dass immer eine Steigerung der Leistung (gemessen an VO_2max, s. unten) beobachtet wurde[12)]. Somit könnte eine adäquate HRR ein erstes Zeichen für eine verbesserte kardiovaskuläre Antwort darstellen.

Blutdruck

Physiologisch steigt der Blutdruck unter Belastung an und fällt nach Belastung wieder ab[9)]. Bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler kann der Blutdruckanstieg unzureichend sein. Ursachen können eine Aortenklappenstenose oder auch eine eingeschränkte linksventrikuläre Funktion sein. Bei Aortenklappeninsuffizienzen kann es durch den erhöhten O_2-Bedarf des Myokards bei Belastung und dem durch die Insuffizienz bedingten relativen Minderangebot (in der Diastole) unter Belastung zu Ischämiezeichen (klinisch und im EKG) kommen.

Maximale Sauerstoffaufnahme/peak VO_2

Die maximale Sauerstoffaufnahme während der Belastung ist der wichtigster Messwert für

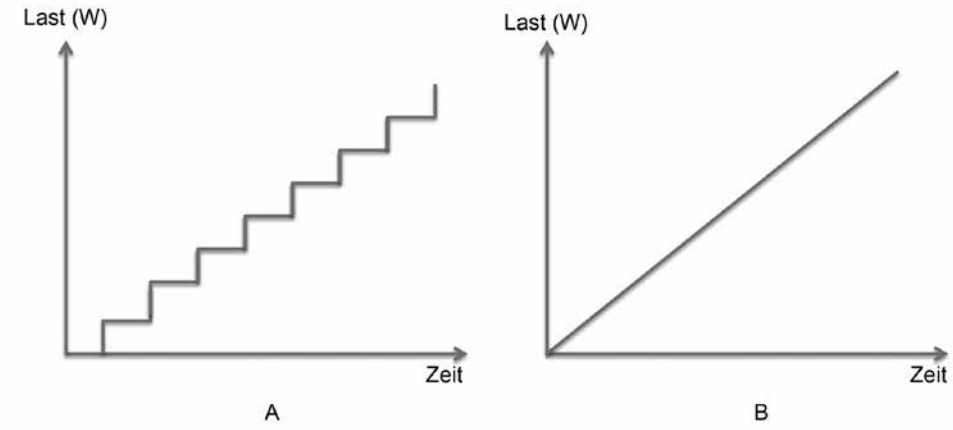


Abb. 2: Schematische Darstellung von (A) Stufen- und (B) Rampenprotokoll; W=Watt

die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit (peak VO_2 oder VO_2max)[4]. VO_2max entspricht der maximalen Menge O_2, welche das kardiovaskuläre System den arbeitenden Muskeln liefern kann. Neben der kardialen Funktion muss hierbei auch die pulmonale Funktion mitbeurteilt werden, da die erreichte VO_2max auch durch pulmonale Erkrankungen beeinflusst wird. Eine gesunde Lunge und Atemphysiologie vorausgesetzt, hängt die Höhe von VO_2max von der Fähigkeit des kardiovaskulären Systems ab, das Herzzeitvolumen während körperlicher Belastung zu steigern[14]. Als alters-, geschlechts- und gewichtsabhängiger Wert wird er in ml O_2/(kg*Min.) angegeben und gilt als bester Index für die aerobe Kapazität und somit der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit[4]. In verschiedenen Studien wurden VO_2max-Normwerte für Kinder präsentiert[14),15].

O_2-Puls (O_2P)

Stellt sich bei Patienten mit Herzerkrankungen die Frage, ob das Schlagvolumen unter Belastung angemessen gesteigert werden kann, so nimmt der Sauerstoffpuls eine zentrale Bedeutung ein. Die Sauerstoffaufnahme pro Herzschlag wird definiert als Sauerstoffpuls (O_2-Puls) und entspricht dem Produkt aus Schlagvolumen und arteriovenöser Sauerstoffextraktion[7]. Der O_2-Puls verhält sich proportional zum Schlagvolumen und ist bei Patienten mit einem reduzierten linksventrikulären Auswurfvolumen (wie bei Patienten mit «single-ventricle» Physiologie, schweren obstruktiven Läsionen, schweren Klappeninsuffizienzen) und pulmonalen oder systemischen vaskulären Krankheiten vermindert[14]. Anämien oder Polycythämien sowie die Herzfrequenz beeinflussende Medikamente (z. B. eine beta-Blocker-Therapie) können den O_2-Puls beeinflussen und müssen deshalb in die Beurteilung mit einbezogen werden[14]. Liegt bei einem Patienten in Ruhe eine verminderte Funktion des linken Ventrikels vor, so kann anhand des O_2-Pulses die Fähigkeit zur Steigerung des Schlagvolumens im dynamischen Zustand abgeschätzt werden.

Respiratory exchange Ratio (RER)

Das Verhältnis der CO_2-Ausatmung und der O_2-Aufnahme (VCO_2/VO_2) wird RER genannt[1]. Für eine korrekte Interpretation des kardiopulmonalen Status eines Probanden, muss dieser eine maximale Leistung erbringen. Die Respiratory Exchange Ratio (RER) kann helfen einzuschätzen, ob der Proband während des Belastungstests eine maximale Leistung erbracht hat[14]. In Ruhe entspricht RER dem respiratorischen Quotienten (RQ) und ist <1. Wird die anaerobe Schwelle überschritten, steigt RER >1. Bei Kindern werden RER-Werte von 1.05 oder 1.08 mit einer angemessenen Leistung bzw. Ausbelastung in Verbindung gebracht[2),14].

Ventilatory anaerobic threshold (VAT)

Die anaerobe Schwelle (VAT) stellt den Punkt dar, bei dem während zunehmender Belastung der aerobe Metabolismus die Muskeln nicht mehr ausreichend mit Energie versorgen kann. Dieser Vorgang wird limitiert durch die Menge an Sauerstoff die über das kardiovaskuläre System den Muskeln geliefert und in Energie umgewandelt wird[14]. VAT sinkt mit dem Alter und ist bei Kindern mit einem angeborenen Herzfehler vermindert[7]. Die anaerobe Schwelle kann mit 2 unterschiedlichen Methoden bestimmt werden. Die «V-slope-Methode» definiert als VAT den Zeitpunkt, an dem VCO_2 ohne Hyperventilation überproportional zum VO_2-Anstieg ansteigt. Die VCO_2-Zunahme entsteht durch vermehrt anfallendes Laktat oberhalb der anaeroben Schwelle, welches durch Bikarbonat gepuffert und als CO_2 abgeatmet wird. Die «ventilatorx equivalents»-Methode berechnet VAT mittels des Verhältnisses der Atemminutenvolumen und der VO_2-Kurve[1].
Wird die anaerobe Schwelle bei einer Belastung erreicht, so kann davon ausgegangen werden, dass ein kardialer Faktor für die Limitierung des Tests verantwortlich war[1].

VE/VCO_2 Slope

Das Atemminutenvolumen (VE, in l/Min.) steigt während zunehmender Belastung bis zu einem Punkt oberhalb von VAT linear an, proportional zu VCO_2[14]. Das Verhältnis VE/VCO_2 sinkt zu Beginn der Belastung ein wenig ab, da das Ventilations-Perfusions-Verhältnis optimiert wird. Anschliessend bleibt die Steigung VE/VCO_2 ziemlich konstant und steigt erst gegen Ende der Belastung stärker an[2]. Der lineare Abschnitt der Kurve wird VE/VCO_2 Slope genannt und gilt als Index für die Gas-Austausch-Effizienz während Belastung[14].
Die Bedeutung des VE/VCO_2 Slopes für Kinder ist bei der aktuellen Studienlage noch unklar, wobei aber gezeigt werden konnte, dass Kinder mit komplexen angeborenen Herzfehlern erhöhte VE/VCO_2-Slope-Werte aufweisen[16].



Abb. 3: Belastungsuntersuchung auf dem Laufband

Rhythmus

Belastungsuntersuchungen helfen, belastungsabhängige Arrhythmien zu demaskieren. Nebst Begleitarrhythmien bei verschiedenen Herzfehlern, spielt die Ergometrie eine entscheidende Rolle in der Diagnostik von insbesondere drei spezifischen Rhythmusstörungen: (A) supraventrikuläre Tachykardien, (B) Long-QT-Syndrom und (C) katecholaminerg polymorph ventrikuläre Tachykardie (CPVT).

A) Bei Patienten mit Präexzitationen (delta-Welle im EKG) dienen Belastungsuntersuchungen dazu, Eigenschaften der akzessorischen Leitungsbahn zu testen. Verschwindet während der Belastung die Präexzitation im EKG, so spricht dies für eine schlechte Leitungseigenschaft der akzessorischen Leitungsbahn. Das Risiko für die Entwicklung von schnellen ventrikulären Antworten auf Vorhofarrhythmien, insbesondere Vorhofflimmern, ist in diesem Fall geringer als wenn Präexzitationen bei Belastung persistieren[7].

B) Das Long-QT-Syndrom, eine angeborene Ionenkanalerkrankung, zeichnet sich durch ein verlängertes QT-Intervall im EKG aus. Ergänzend zu den bekannten diagnostischen Schwartz-Kriterien kann die Bestimmung der frequenzkorrigierten QT-Zeit (QTc) in der Nachbelastung (3–4 Minuten nach Belastung) als ergänzender Messwert zur Risiko-Stratifizierung herangezogen werden[7),17),18]. Hierbei werden QTc-Werte ≥ 480 ms zu diesem Zeitpunkt als erhöhtes Risiko gewertet.

C) Die CPVT stellt eine ebenfalls genetisch bedingte Rhythmusstörung dar, bei der häufig nur unter Belastung polymorphe ventrikuläre Extrasystolen oder ventrikuläre Tachykardien auftreten. Neben der Diagnosestellung wird die Belastungsuntersuchung auch zur Bewertung einer prophylaktischen medikamentösen Therapie eingesetzt[7].

Einsatz und Nutzen der Spiroergometrie bei Kindern mit angeborenen Herzfehlern

Die Spiroergometrie wird zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Kindern mit angeborenem Herzfehler als objektive Messmethode eingesetzt. Mit den Ergebnissen der Untersuchung sollen Indikationen und Erfolg von operativen oder interventionellen Eingriffen bewertet werden. Auch sollen anhand der Ergebnisse Empfehlungen hinsichtlich körperlicher Aktivität im Alltag abgegeben werden können. Zudem hilft sie subjektive Beschwerden der Patienten zu objektivieren und ein eventuelles kardiologisch-organisches Korrelat zu testen.

Die meisten angeborenen Herzfehler, die einen operativen Eingriff notwendig machen, führen im Langzeitverlauf häufig zu einer unterschiedlich stark eingeschränkten Leistungsfähigkeit[16]. Hierfür können eine chronotrope Inkompetenz (z. B. Sinusknotendysfunktion), aber auch eine reduzierte Ejektionsfraktion des linken Ventrikels sowie Klappeninsuffizienzen oder -stenosen mögliche Ursachen sein. Eine besondere Stellung nehmen in diesem Kontext Kinder mit einem univentrikulären Herzen und einer Glenn- oder Fontanphysiologie (bidirektionale – oder totale cavo-pulmonale Anastomose) ein. In dieser Patientengruppe erfolgt die Lungenperfusion nach operativer Palliation passiv. Diese Patienten zeigen im Vergleich zu anderen kardialen Vitien und der Normalpopulation in der Regel deutlich eingeschränkte Werte für VO_2 max[19].

In der Folge möchten wir exemplarisch einige Vitien und die typischen Fragestellungen an die Spiroergometrie zusammenfassen:

Transposition der grossen Arterien (TGA):

Nach Koronarchirurgie im Rahmen der arteriellen Switch-Operation (ASO) im Neonatalalter kommt in dieser Patientengruppe der Frage nach Hinweisen für Myokardischämien unter Belastung als frühes Zeichen der koronaren Insuffizienz eine besondere Rolle zu.

Aortenstenose:

Beurteilung des Blutdruckverhaltens unter Belastung sowie Erfassung von subendokardialen Ischämien.

Fallot`sche Tetralogie:

Beurteilung der Leistungsfähigkeit vor dem Hintergrund von im Langzeitverlauf auftretenden Re-Stenosen oder Insuffizienzen im Bereich des rechtsventrikulären Ausflusstrakts mit evtl. Dilatation der rechten Kammer. Die Leistungsfähigkeit in der Belastungsuntersuchung ist ein Baustein in der Indikationsstellung für einen Pulmonalklappenersatz.

Patienten mit Fontanphysiologie (totale cavo-pulmonale Anastomose)

Beurteilung der Leistungsfähigkeit. Eine Zunahme der Zyanose unter Belastung kann Ausdruck einer Fenestrierung zwischen Fontanconduit und rechtem Vorhof, oder vorhandener venovenöser Kollateralen sein. Die chronotrope Kompetenz unter Belastung oder andere Arrhythmien werden erfasst.

Fazit

Die Spiroergometrie stellt ein etabliertes Verfahren für die differenzierte Leistungs- und Funktionsdiagnostik bei Erwachsenen und Kindern dar. Sinnvolle Belastungsuntersuchungen bei Kindern mit angeborenen Herzfehlern können ab dem 8. Lebensjahr sowohl auf dem Laufband als auch auf dem Fahrradergometer durchgeführt werden. Hierbei wird eine höhere Ausbelastung auf dem Laufband und eine durch weniger Bewegungsartefakte bessere Rhythmusanalyse auf dem Fahrrad erreicht. Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2max) stellt einen der wichtigsten Messwerte der Leistungsdiagnostik dar. Als alters-, geschlechts- und gewichtsabhängiger Wert wird er in ml O_2/(kg*Min.) angegeben und gilt als bester Index für die aerobe Kapazität und somit der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit. Bei Rhythmusstörungen kann die Spiroergometrie als Hilfsmittel in der Diagnostik und Therapiesteuerung dienen. Dabei muss betont werden, dass eine Belastungsuntersuchung nicht isoliert betrachtet werden soll, sondern immer im Kontext mit den üblichen kardiologischen diagnostischen Modalitäten interpretiert werden muss.

Referenzen

1) Albouaini K, Egred M, Alahmar A, Wright DJ. Cardiopulmonary exercise testing and its application. Postgrad Med J. 2007 Nov;83(985):675–82.
2) Miliaresis C, Beker S, Gewitz M. Cardiopulmonary stress testing in children and adults with congenital heart disease. Cardiol Rev. 2014 Dec;22(6):275–8.
3) Leitlinie Spiroergometrie der Deutschen Gesellschaft für pädiatrische Kardiologie (DGPK), ausgearbeitet von W. Baden, Tübingen und K.O. Dubowy, Bad Oeynhausen.
4) ATS/ACCP statement on cardiopulmonary exercise testing. Am J Respir Crit Care Med. 2003 May 15;167(10):211-277.
5) Takken T, Blank AC, Hulzebos EH, van Brussel M, Groen WG, Helders PJ. Cardiopulmonary exercise testing in congenital heart disease: equipment and test protocols. Neth Heart J Mon J Neth Soc Cardiol Neth Heart Found. 2009 Sep;17(9):339–44.
6) James FW, Blomqvist CG, Freed MD, Miller WW, Moller JH, Nugent EW, et al. Standards for exercise testing in the pediatric age group. American Heart Association Council on Cardiovascular Disease in the Young. Ad hoc committee on exercise testing. Circulation. 1982 Dec;66(6):1377A–1397A.
7) Massin MM. The role of exercise testing in pediatric cardiology. Arch Cardiovasc Dis. 2014 May;107(5):319–27.

8) Wasserman K. Diagnosing cardiovascular and lung pathophysiology from exercise gas exchange. Chest. 1997 Oct;112(4):1091–101.
9) Connuck DM. The role of exercise stress testing in pediatric patients with heart disease. Prog Pediatr Cardiol. 2005 May;20(1):45–52.
10) Ten Harkel ADJ, Takken T, Van Osch-Gevers M, Helbing WA. Normal values for cardiopulmonary exercise testing in children. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil Off J Eur Soc Cardiol Work Groups Epidemiol Prev Card Rehabil Exerc Physiol. 2011 Feb;18(1):48–54.
11) Takken T, Blank AC, Hulzebos EH, van Brussel M, Groen WG, Helders PJ. Cardiopulmonary exercise testing in congenital heart disease: (contra)indications and interpretation. Neth Heart J Mon J Neth Soc Cardiol Neth Heart Found. 2009 Oct;17(10):385–92.
12) Singh TP, Curran TJ, Rhodes J. Cardiac rehabilitation improves heart rate recovery following peak exercise in children with repaired congenital heart disease. Pediatr Cardiol. 2007 Aug;28(4):276–9.
13) Singh TP, Rhodes J, Gauvreau K. Determinants of heart rate recovery following exercise in children. Med Sci Sports Exerc. 2008 Apr;40(4):601–5.
14) Rhodes J, Ubeda Tikkanen A, Jenkins KJ. Exercise testing and training in children with congenital heart disease. Circulation. 2010 Nov 9;122(19):1957–67.
15) Cooper DM, Weiler-Ravell D. Gas exchange response to exercise in children. Am Rev Respir Dis. 1984 Feb;129(2 Pt 2):S47-48.
16) Kempny A, Dimopoulos K, Uebing A, Moceri P, Swan L, Gatzoulis MA, et al. Reference values for exercise limitations among adults with congenital heart disease. Relation to activities of daily life--single centre experience and review of published data. Eur Heart J. 2012 Jun;33(11):1386–96.
17) Schwartz PJ, Ackerman MJ. The long QT syndrome: a transatlantic clinical approach to diagnosis and therapy. Eur Heart J. 2013 Oct;34(40):3109–16.
18) Schwartz PJ, Moss AJ, Vincent GM, Crampton RS. Diagnostic criteria for the long QT syndrome. An update. Circulation. 1993;88(2):782–784.
19) Hebert A, Jensen AS, Mikkelsen UR, Idorn L, Sørensen KE, Thilen U, et al. Hemodynamic causes of exercise intolerance in Fontan patients. Int J Cardiol. 2014 Aug;175(3):478–83.

Korrespondenzadresse
Dr. med. Martin Christmann
Facharzt Kinder- und Jugendmedizin
Schwerpunkt Kinderkardiologie
Universitätskinderspital Zürich
Steinwiesstrasse 75
CH-8032 Zürich
martin.christmann@kispi.uzh.ch

Die Autoren haben keine finanzielle Unterstützung und keine anderen Interessenkonflikte im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.