

Kardiologie 2014 · 8:231–243
DOI 10.1007/s12181-014-0562-3
Online publiziert: 9. Mai 2014
© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie -
Herz- und Kreislaufforschung e.V.
Published by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- all rights reserved 2014

**K.T. Laser¹ · U. Herberg² · M. Hofbeck³ · I. Dähnert⁴ · M. Vogt⁵ · O. Krogmann⁶ ·
T. Nekarda⁷ · K.R. Schirmer⁸ · D. Kececioglu⁹**

¹ Kinderherzzentrum/Klinik für Angeborene Herzfehler, Herz- und
Diabeteszentrum NRW, Ruhr-Universität Bochum, Bad Oeynhausen

² Abteilung für Kinderkardiologie, Rheinische Friedrich-Wilhelm Universität Bonn, Bonn

³ Abteilung für Kinderkardiologie, Pulmologie, Intensivmedizin, Universitätsklinik
für Kinder- und Jugendmedizin Tübingen, Tübingen

⁴ Herzzentrum Universität Leipzig, Leipzig

⁵ Klinik für Kinderkardiologie und Angeborene Herzfehler, Deutsches Herzzentrum München, München

⁶ Klinik für Kinderkardiologie, Herzzentrum Duisburg, Kaiser-Wilhelm-Krankenhaus, Duisburg

⁷ Klinik für Kinder und Jugendliche, Diakoniekrankenhaus Rotenburg (Wümme), Rotenburg (Wümme)

⁸ Praxis für Kinderheilkunde, Kardiologie und Sportmedizin, Hamburg

⁹ Kinderherzzentrum/Klinik für Angeborene Herzfehler, Herz- und
Diabeteszentrum NRW, Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Qualitätsstandards für die Echokardiographie bei Kindern und Jugendlichen mit angeborenen und erworbenen Herzfehlern

Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie (DGPK) zur Durchführung von echokardiographischen Untersuchungen im Kindes- und Jugendalter

Vorwort

Die Echokardiographie mit ihren verschiedenen Modalitäten ist die wichtigste nichtinvasive Methode für die Diagnostik und Verlaufsbeobachtung von Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit angeborenen oder erworbenen Herzerkrankungen. Untersuchungsgegenstände sind das fetale, kindliche und jugendliche Herz mit Perikard, die Gefäße des Lungenkreislaufes, die Hohlvenen sowie die Aorta einschließlich ihrer Abgänge unter besonderer Berücksichtigung ihrer Fehlbildungen, Funktionsstörungen und Behandlungsfolgestände.

Sie ermöglicht eine rasch durchführbare, beliebig oft wiederholbare und den Patienten dabei nicht belastende Untersuchung zur Beurteilung der Anatomie und Funktion des Herzens und der herz-

nahen großen Gefäße. Zudem zeichnet sie sich durch eine Präzision mit weniger als 100 Fehlern auf 50.000 Echokardiographien aus [1].

Allerdings unterscheidet sich die Echokardiographie angeborener Herzfehler ganz erheblich von Echokardiographien zur Evaluation von erworbenen Funktionsstörungen des Herzens. Die Echokardiographie angeborener Herzfehler ist ein untersucherabhängiges bildgebendes Verfahren, dessen diagnostische Aussagekraft in hohem Maße von der Erfahrung des Untersuchers und insbesondere seiner Fähigkeit, Schnittebenen korrekt einzustellen und zu interpretieren, abhängt. Die große Variabilität angeborener Herzfehler erfordert häufig die individuelle Anwendung und Anpassung echokardiographischer Schnittebenen. Die Interpretation und Wertung der Befunde ist nur

möglich auf der Basis eines profunden Verständnisses der Hämodynamik und Pathophysiologie der Herzfehler in den unterschiedlichen kindlichen Altersstufen. Darüber hinaus erfordert die Interpretation postoperativer oder postinterventioneller Befunde die genaue Kenntnis der ständig wachsenden Zahl neuer operativer und interventioneller Behandlungsverfahren.

Bei der großen Bedeutung der Echokardiographie in der Diagnostik angeborener Herzfehler ist ein hoher Qualitätsstandard zu fordern, der allen aus heutiger Sicht geltenden Ansprüchen an die Methode gerecht wird. Basierend auf den Qualitätsstandards für die Echokardiogra-

Beschlossen vom Vorstand der DGPK am
02.11.2013, Präsident: Prof. Dr. R. Grabitz.

phie bei Kindern und Jugendlichen der DGPK aus dem Jahr 1999 [2] sollen nun die vorliegenden Empfehlungen den Stellenwert neuerer echokardiographischer Methoden beschreiben und gleichzeitig Hilfe bei der Quantifizierung der echokardiographischen Untersuchung geben. Die Kommission sieht in der Beschreibung der Untersucherqualifikation einen unverzichtbaren Teil der Qualitätssicherung in der pädiatrischen Echokardiographie.

1. Qualifikation des Untersuchers

Echokardiographische Untersuchungen an Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mit angeborenen Herzfehlern werden von Ärzten vorgenommen und befundet, die eine den nachfolgenden Spezifikationen entsprechende Qualifikation erworben haben. Technische Assistenz kann teilweise erforderlich sein, die Durchführung der Untersuchung selbst kann jedoch nicht vom Arzt an nichtärztliches Assistenzpersonal bzw. nur unter dessen Verantwortung delegiert werden.

1.1. Voraussetzungen für die 2-dimensionale (2-D) und Time-Motion (TM)-Echokardiographie sowie Doppler- und Farb-Doppler-Echokardiographie

Der Untersucher ist Arzt für Kinderheilkunde und Jugendmedizin und hat ferner eine Weiterbildung im Schwerpunkt Kinderkardiologie erfolgreich abgeschlossen; in diesem Rahmen hat er mindestens 400 Echokardiographien an herzkranken Kindern und Jugendlichen selbstständig durchgeführt und befundet. Zur Sicherung eines hohen Qualitätsstandards sollte er sich regelmäßig auf dem Gebiet der Echokardiographie unter Berücksichtigung der neuen technologischen Entwicklungen fortbilden.

1.2. Voraussetzungen für transösophageale Echokardiographie

Gleiche Voraussetzungen wie unter 1.1; zusätzlich hat der Kinderkardiologe 50 transösophageale echokardiographische Unter-

Kardiologie 2014 · 8:231–243 DOI 10.1007/s12181-014-0562-3
© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie - Herz- und Kreislaufforschung e.V.
Published by Springer-Verlag Berlin Heidelberg - all rights reserved 2014

K.T. Laser · U. Herberg · M. Hofbeck · I. Dähnert · M. Vogt · O. Krogmann · T. Nekarda · K.R. Schirmer · D. Kececioglu

Qualitätsstandards für die Echokardiographie bei Kindern und Jugendlichen mit angeborenen und erworbenen Herzfehlern. Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie (DGPK) zur Durchführung von echokardiographischen Untersuchungen im Kindes- und Jugendalter

Zusammenfassung

Die Echokardiographie ist das Standardverfahren der nichtinvasiven Bildgebung zur Untersuchung des Herz-Kreislauf-Systems von Feten, Kindern und Jugendlichen. Ziel dieser Qualitätsstandards ist, dem Patienten mit angeborenem Herzfehler eine zielgerichtete und umfassende Diagnostik zu gewährleisten. Dazu werden Anforderungen an den Untersucher hinsichtlich unterschiedlicher Echokardiographiemodalitäten, Untersuchungsablauf, Dokumentation und Befundung definiert. Speziell wird auf Methoden der Bildakquisition und Auswertung eingegangen, die anhand der verfügbaren Literatur bewertet werden. Zusätzlich zur transtho-

rakalen Echokardiographie wird wegen spezieller Anforderungen an Technik und Untersucher auf die fetale und transösophageale Echokardiographie eingegangen. Die Verfahren Gewebe-Doppler, 2-d-Deformationsanalyse und 3-d-Echokardiographie werden anhand des aktuellen Standes der Forschung mit ihren Vor- und Nachteilen kritisch diskutiert und Empfehlungen zum klinischen Einsatz gegeben.

Schlüsselwörter

Bildgebung · Herz-Kreislauf-System · Feten · Kinder · Jugendliche

Quality standards for echocardiography in children and adolescents with congenital and acquired heart disease. Recommendations of the Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie (DGPK, German Society of Pediatric Cardiology) on the performance of echocardiographic examinations in childhood and adolescence

Abstract

Echocardiography is the standard non-invasive imaging modality to investigate the cardiovascular system of the fetus, child and adolescent. The purpose of these quality standards is to provide a consistently high level of diagnostic skills for the echocardiographic investigation of patients with congenital heart disease. In this article the requirements for the examiner are defined regarding the echocardiographic modality used, hardware, the course of image acquisition as well as documentation and reporting. We comment on the methods of investigation and analysis based on the most important published lit-

erature. In addition to transthoracic echocardiography, the more complex fetal and transesophageal techniques are discussed. Finally, a special overview on tissue Doppler, two-dimensional (2-D) deformation analysis as well as 3-D echocardiography is given including advantages, disadvantages and recommendations about the clinical value based on the current literature.

Keywords

Imaging · Cardiovascular system · Fetus · Child · Adolescent

suchungen an Kindern und Jugendlichen selbstständig durchgeführt und befundet.

1.3. Voraussetzungen für fetale Echokardiographie

Im Rahmen pränataler Konsile werden von Kinderkardiologen echokardiogra-

phische Untersuchungen an Feten durchgeführt und beurteilt. Bei Vorliegen der Voraussetzungen unter 1.1 muss der Kinderkardiologe 100 echokardiographische Untersuchungen an Feten selbstständig durchgeführt und befundet haben.

2. Apparative Voraussetzungen

Für alle im Folgenden beschriebenen echokardiographischen Untersuchungstechniken außerhalb der fetalen Echokardiographie sollen ausschließlich elektronische Sektorscanner eingesetzt werden.

Aufgrund der variablen Körpergröße von Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen müssen Schallköpfe mit unterschiedlichen Frequenzbereichen zur Verfügung stehen (Frühgeborene 12–10 MHz, Neugeborene 7 MHz oder mehr, Kleinkinder 5–7 MHz, Schulkinder, Jugendliche und Erwachsene 3,0–5 MHz). Für die Untersuchung soll der Schallkopf mit der höchstmöglichen Frequenz verwendet werden. Methodenspezifische Empfehlungen werden nachfolgend unter den einzelnen Verfahren angegeben. Die Bildfrequenz muss so hoch sein, dass eine Echtzeitdarstellung möglich ist; sie muss daher mindestens 25 Bilder pro Sekunde betragen. Bei Neugeborenen ist aufgrund der höheren Herzfrequenzen eine Bildfrequenz von mindestens 50/s zu empfehlen. Der Bildsektor soll variabel sein und einen maximalen Sektorwinkel von 80–90° aufweisen, um einen ausreichenden Überblick zu gewährleisten. Durch Verkleinerung des Sektors auf 30–60° soll eine Erhöhung der Bildfrequenz möglich sein.

Die echokardiographische Untersuchung soll mit simultaner EKG-Registrierung erfolgen, um eine herzphasengesteuerte Interpretation durch die R-Zacken-Erkennung zu ermöglichen.

3. Dokumentation

3.1. Monitorbild

Auf dem Monitorbild müssen Untersuchungsdatum und Uhrzeit, die Institution, an der die Untersuchung erfolgt, der Untersucher und der Patient erkennbar sein. Die Patientenidentifikation kann in Form von Klartext (Patientenname), einer Erkennungsnummer oder von Patienteninitialen mit Geburtsdatum erfolgen.

3.2. Dokumentation der Untersuchung

Die Dokumentation der Echokardiographie sollte bevorzugt auf digitalen Spei-

chermedien erfolgen. Neben Standbildwiedergaben müssen dabei in den Standardschnittebenen aber auch Cineloop-Sequenzen gespeichert werden. Die weiter unten beschriebenen Schnittebenen sollten als Cineloops in 2-D- und Farbdoppler-Modus digital gespeichert werden. Eine zusätzliche Dokumentation von Standbildern als Papiausdruck ist für den internen Gebrauch, für zuweisende Kollegen sowie für Aus- und Fortbildungszwecke hilfreich. Die Dauer der Aufbewahrung von Dokumentationen echokardiographischer Untersuchungen muss den speziellen Erfordernissen der pädiatrischen Kardiologie Rechnung tragen, die im Fall eines angeborenen Herz/Gefäßfehlers in der Regel mit lebenslangen Problemen eines noch sehr jungen Patienten zu rechnen hat.

3.3. Befundbericht

- a) Angaben zur Patienten- und Untersucheridentifikation: Name, Geburtsdatum, Echo-Nr., Datum der Untersuchung, Untersucher
- b) Angabe der klinischen Diagnose und der Fragestellung/Indikation
- c) Angabe zur technischen Qualität der Untersuchung, etwa als: 1= gute Echoqualität, 2= zufriedenstellende Echoqualität, 3= schlechte Echoqualität
- d) Qualitative und quantitative Befundbeschreibung (s. unten)
- e) Zusammenfassende Interpretation der Befunde und Beurteilung
- f) Unterschrift des Untersuchers

4. Zweidimensionale (2-D) und Time-Motion (TM)-Echokardiographie

In der Regel kann die Untersuchung am wachen Patienten erfolgen. Gelegentlich kann jedoch bei abwehrenden Säuglingen und Kleinkindern eine Sedierung erforderlich sein. Da unter einer derartigen Medikation paradoxe Exzitationszustände, verzögerte Sedierung oder Erbrechen auftreten können, muss im Anschluss an die Untersuchung eine Überwachung des Patienten bis zum Ende der Wirkung des Sedativums gewährleistet sein [3, 4].

Hier steht eine Anzeige.



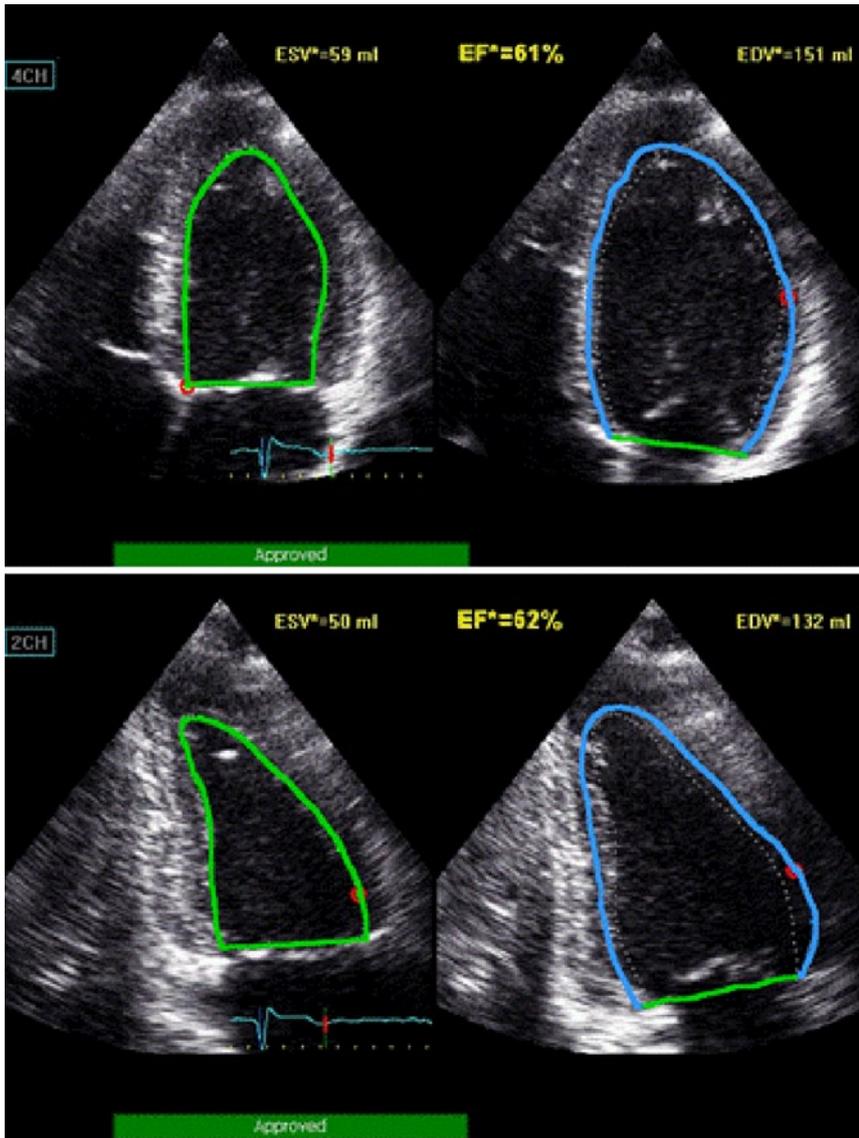


Abb. 1 ▲ Systolische und diastolische Flächenberechnung des linken Ventrikels zur Bestimmung der Ejektionsfraktion biplanar im apikalen 4-Kammer- und 2-Kammer-Blick

4.1. 2-D-Echokardiographie

Die Abbildungsqualität erfordert mindestens 256 Graustufen. Eine abgestufte Tiefenverstärkung muss möglich sein. Zur Kalibrierung muss auf dem Monitor ein Zentimetermaßstab eingeblendet sein. Die Untersuchung dient der Darstellung aller kardialen Verbindungen, der intrakardialen Anatomie sowie der Darstellung der großen Gefäße. Im Rahmen einer sequenziellen Analyse erfolgt die Bestimmung des viseroatrialen Situs und der Lage des Herzens, der venoatrialen Konnektion, der Vorhofanatomie, der atrioventrikulären Konnektion, der Ventrikelanatomie, der ventrikuloarteriellen Kon-

nektion, der Anatomie der großen Arterien sowie die Darstellung begleitender Fehlbildungen des Herzens und der großen Gefäße [5].

Bei einer Erstuntersuchung ist die Darstellung und Dokumentation aller von der American Society of Echocardiography empfohlenen Standardschnittebenen erforderlich [6]; hierzu zählen die parasternale Längs- und Querschnitte, der apikale 4-Kammer- und 2-Kammer-Blick, die suprasternale lange und kurze Achse des Aortenbogens sowie die subkostalen langen, kurzen und schrägen Schnittebenen. Zusätzliche Schnittebenen ergeben sich durch pathologische Befunde sowie durch Lageanomalien des Herzens.

Bei pathologischen Befunden sollen Bestimmungen von Durchmessern oder Flächen relevanter Strukturen im 2-D-Standbild den optischen Eindruck quantifizieren (Durchmesser von Vorhof- und Ventrikelseptumdefekten, Durchmesser der Herzklappen, Durchmesser der großen Gefäße, Fläche der Vorhöfe und Ventrikel).

Die Darstellung der Anatomie und die Quantifizierung der Funktion im Rahmen einer echokardiographischen Untersuchung sind sowohl für die Diagnostik als auch für die Behandlung von Patienten mit erworbenen bzw. angeborenen Herzfehlern von größter Bedeutung [7]. Normale und pathologisch veränderte Herzen bzw. die Messungen in solchen Herzen sind abhängig vom Körperwachstum [8], hier sollten die Messwerte auf die Körperoberfläche des Patienten bezogen werden. Bei den Messungen sollte berücksichtigt werden, dass die axiale Auflösung des Ultraschalls deutlich besser ist als die laterale, sodass Messungen möglichst in der axialen Richtung vorgenommen werden sollten. Bei Messungen, die auf der lateralen Auflösung beruhen, sollte beachtet werden, dass die Ungenauigkeit mit der Tiefe des untersuchten Gebietes zunimmt. Ferner sollte bei der Abbildung von tiefer gelegenen Strukturen auch beachtet werden, dass hier oft die Pixelauflösung des Bildmonitors schlechter ist als die des Ultraschalls. Hier hilft einerseits die Verminderung der Eindringtiefe, andererseits die vergrößerte Darstellung der untersuchten Strukturen (Zoom-Funktion). Wegen der besseren räumlichen Orientierung sollten die Messungen in der 2-D-Echokardiographie durchgeführt werden.

Im Gegensatz zur TM-Echokardiographie werden Durchmesserbestimmungen im 2-D-Echokardiogramm nicht nach der Leading-edge-Methode (Außenwand zu Innenwand), sondern von Innenwand zu Innenwand der betreffenden Strukturen vorgenommen [8, 9, 10].

Die Durchmesser der Ausflusstrakte bzw. der herznahen Gefäße sollten in der Phase der maximalen Expansion (d. h. in der Mittelsystole) bestimmt werden, so auch bei der Bestimmung der Durchmesser der Aorten- und Pulmonalklappe. Die Messwerte sollten auf die Körperoberfläche, bestimmt nach der sog.

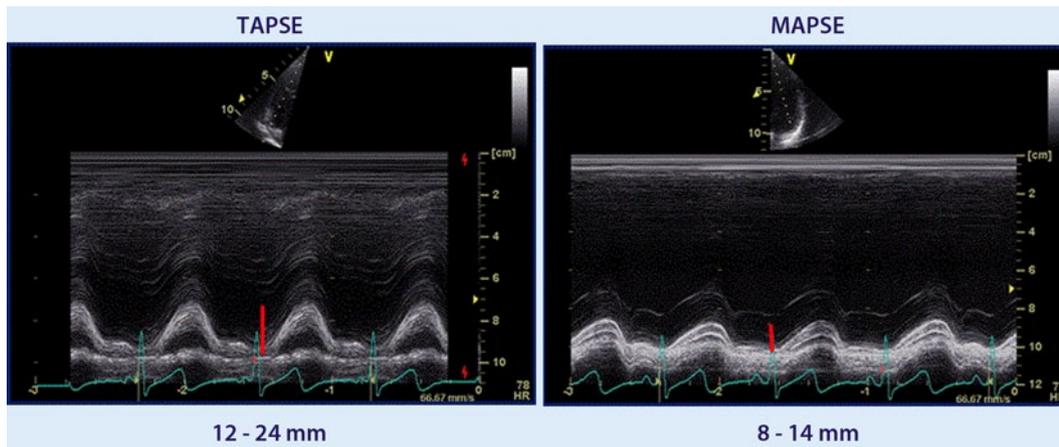


Abb. 2 ◀ Berechnung der sog. TAPSE („tricuspid annular plain systolic excursion“) und MAPSE („mitral annular plain systolic excursion“) zur Beurteilung der systolischen longitudinalen Bewegung des jeweiligen basalen lateralen Myokardareals im 4-Kammer-Blick mit M-Mode

Haycock-Formel ($0,024265 \times \text{Gewicht in kg}^{0,5378} \times \text{Körpergröße in cm}^{0,3964}$), bezogen werden. Die Messwerte werden mit Normalwerten verglichen. Hier empfiehlt sich die Verwendung von sog. Z-Scores [11], wobei ein Z-Score von 0 dem Mittelwert einer Normalpopulation für die bestimmte Körperoberfläche entspricht, während die Abweichung um 1 Z die einer Standardabweichung entspricht.

Die Größe des linken und rechten Vorhofes kann im apikalen 4-Kammer-Blick linear als Längs- und Querdurchmesser angegeben werden. Die Größe der Trikuspidal- und Mitralklappe soll durch die Angabe der Durchmesser in 2 senkrecht zueinander stehenden Ebenen bestimmt werden, die Fläche kann über die Ellipsenformel ($\pi/4 \times \text{Durchmesser 1} \times \text{Durchmesser 2}$) berechnet werden. Die Größe des linken Ventrikels sollte im apikalen 4-Kammer-Blick linear durch den Querdurchmesser in Höhe der Mitralklappe bzw. in der Mitte des Ventrikels angegeben werden. Zur Bestimmung des Volumens und somit auch der Ejektionsfraktion empfiehlt sich die Messung im apikalen 4-Kammer-Blick und apikalen 2-Kammer-Blick (biphan bestimmte Ejektionsfraktion; **Abb. 1**). Die Größe des rechten Ventrikels kann ebenfalls linear durch die Angabe eines Durchmessers in Höhe der Trikuspidalklappe und in etwa der Ventrikelmitte aus dem apikalen 4-Kammer-Blick angegeben werden. Des Weiteren können im apikalen 4-Kammer-Blick die maximale und minimale Fläche des rechten Ventrikels in End-Systole und End-Diastole bestimmt und die Angabe der fraktionierten Flächenänderung kann als Hinweis für die systolische Funktion

genutzt werden. Eine zuverlässige Volumenmessung mittels der 2-D-Echokardiographie alleine ist für den rechten Ventrikel aufgrund der Ventrikelmorphologie nicht möglich, wobei neue Techniken zurzeit validiert werden, mit deren Hilfe anhand bestimmter „landmarks“ nach Abgleich mit einer Knowledge-based-Datenbank exakte Volumina bestimmt werden können. Diese erfordern jedoch spezielle zusätzliche Hardware [12, 13].

Volumenbestimmungen des linken Ventrikels und der Ejektionsfraktion werden am besten nach der Scheibchen-Summations-Methode („Simpson's rule“) vorgenommen; dies erfolgt durch Planimetrie des linken Ventrikels in apikalen 4- und 2-Kammer-Schnitten. Bei komplexer atypischer Anatomie des linken Ventrikels steigt dabei die Fehlerquote.

Zum Ausschluss struktureller Herzkrankungen ist im Kindesalter immer eine Kombination der 2-D-Echokardiographie mit den Verfahren der Doppler-Sonographie (PW-/CW- und Farb-Doppler-Echokardiographie) notwendig. Bei Patienten, die bereits vollständig echokardiographisch untersucht wurden, kann sich eine erneute Untersuchung und deren Dokumentation auf eine spezielle Fragestellungen (z. B. Überprüfung der kardialen Funktion, Kontrolle von Druckgradienten) beschränken.

4.2. TM-Registrierung

Die Abbildungsqualität erfordert mindestens 256 Graustufen. Um eine korrekte Platzierung der Messlinie zu gewährleisten, erfolgt die TM-Registrierung unter Kontrolle durch das 2-D-Echokardio-

gramm. Zur genauen zeitlichen Zuordnung der Signale ist ferner eine simultane EKG-Registrierung erforderlich. Die Registrierung muss eine Zeitmarkierung zur Orientierung enthalten; die Registriergeschwindigkeit soll mindestens 50 mm/s betragen, in bestimmten Fällen (Messung von Zeitintervallen, hohe Herzfrequenz) können 100 mm/s erforderlich sein. Die TM-Registrierung kann in der parasternalen langen Achse erfolgen, zur Bestimmung der linksventrikulären Durchmesser wird jedoch im Kindesalter die parasternale kurze Achse bevorzugt. Die Auswertung erfolgt nach Empfehlungen der American Society of Echocardiography [6, 14] am gespeicherten Standbild. Die TM-Registrierung dient der Durchmesser- und Bewegungsanalyse des rechten und linken Ventrikels, Ventrikelseptums, der linksventrikulären Hinterwand, des Aortenbulbus, des linken Vorhofes, der Mitralklappe, rechtsventrikulären Vorderwand sowie ggf. eines Perikardergusses. Aus enddiastolischem und endsystolischem Durchmesser des linken Ventrikels kann die Verkürzungsfraktion als ein klinisch häufig verwendetes Maß für die linksventrikuläre systolische Funktion bestimmt werden [15]. Hier sollte allerdings als genauere Funktionsbeurteilung die biphan Ejektionsfraktion im 2-D-Modus bevorzugt eingesetzt werden.

Die systolische Funktion des rechten Ventrikels kann auch über die Bestimmung der trikuspidalen Ringbewegung („tricuspid annular plane systolic excursion“, TAPSE) schnell, einfach und reproduzierbar [16] bestimmt werden (**Abb. 2**). Die TAPSE korreliert im Erwachsenenalter gut mit der Ejektionsfrak-

tion des rechten Ventrikels [17], bei Kindern auch mit der systolischen RV-Funktion bei erhöhter Vor- oder Nachlast. Bisherige Studien bezogen sich dabei auf Patienten mit Fallot-Tetralogie und kombinierter Druck/Volumenbelastung und pulmonal arterieller Hypertonie (PAH; [18, 19]). Normwerte für das Kindesalter sind publiziert [20, 21], nach der Geburt finden sich zunächst erniedrigte Werte bei noch erhöhtem pulmonalem Widerstand, die dann bis ins Erwachsenenalter ansteigen. Der Parameter hat mittlerweile Eingang in die Empfehlungen der American Society of Echocardiography zur Durchführung pädiatrischer Untersuchungen gefunden [6] und sollte zur Einschätzung der globalen rechtsventrikulären Funktion erhoben werden, wobei er naturgemäß für die regionale Deformation nicht aussagekräftig ist.

4.3. Auswertung

Der Auswertung des Befundes sollte eine Qualitätsbeurteilung des Echokardiogramms vorangehen (s. Abschnitt 3.3 Befundbericht). Die Auswertung von 2-D- und TM-Echokardiogrammen erfolgt entsprechend den Richtlinien der American Society of Echocardiography [6, 14]. Ein Teil der Auswertung geschieht numerisch durch die Angabe von ermittelten Messwerten, vor allem der TM-Registrierung, die mit größenbezogenen Normalwerten verglichen werden. Der deskriptive Teil der 2-D-Auswertung beschreibt den Situs und die Herzlage, die einzelnen Herzsegmente (Vorhöfe, Hauptkammern, große Gefäße), ihre jeweiligen Konnektionen sowie das Vorliegen von begleitenden Fehlbildungen wie Klappenanomalien oder Shuntverbindungen (Lage und Größe eines Vorhof- oder Kammerseiwanddefektes).

Bei auffälligen Befunden ist die zusätzliche Angabe objektiver Messparameter sinnvoll, die mit altersentsprechenden Normalwerten verglichen werden. Für weitere 2-D-Messwerte im Kindesalter liegen umfangreiche Normalwerte vor [8, 9, 10, 22, 23, 24]. Insbesondere können Durchmesserbestimmungen der Klappenringe von Aorten-, Pulmonal-, Mitral- und Trikuspidalklappe sowie die Volummessung des linken Ventrikels sinn-

volle Zusatzinformation liefern (s. Abschnitt 4.1 „2-D-Echokardiographie“).

5. Doppler-Echokardiographie

5.1. Gepulster (PW-) und kontinuierlicher (CW-) Doppler

Die Ultraschallgeräte müssen mit Schallköpfen ausgestattet sein, die eine kombinierte, simultane Doppler- und 2-D-echokardiographische Untersuchung ermöglichen. Um eine gute Registrierung der Doppler-Spektren in allen Altersstufen zu gewährleisten, ist eine Schallfrequenz von $\geq 2,0$ MHz erforderlich.

Der CW-Strahl soll schwenkbar sein. Beim PW-Doppler muss die Größe des Messvolumens von 1–6 mm variabel sein. Die Pulswiederholungsfrequenz („pulse repetition frequency“, PRF) soll mindestens 2 kHz betragen. Bei Nutzung der „High pulse repetition frequency“ (HPRF)-Option muss die 3- bis 4-fache Pulswiederholungsrate des konventionellen PW-Dopplers erreicht werden.

Bei der Doppler-Echokardiographie sind im Rahmen der Dokumentation zusätzliche Informationen zur aktuellen Filter- und Verstärkungseinstellung des Gerätes [Rauschunterdrückung, Wandfilter, Amplitudenskalierung, Globalverstärkung, Messvolumengröße, „time gain compensation“ (TGC)] festzuhalten, die dem Monitorbild zu entnehmen sein müssen.

5.2. Farbkodierter Doppler

Mit der farbkodierten, 2-Dimensionalen Doppler-Echokardiographie erfolgt die simultane Darstellung der Blutströmung, die flächenhaft in das 2-D-Bild eingeblendet wird. Verwendet werden Schallköpfe mit Schallfrequenzen ≥ 3 MHz. In das Monitorbild eingeblendete Informationen zu den wichtigsten Parametern der Verstärker- und Filterfunktionen sind erforderlich. Die Schallsektorfläche für die farbkodierte Doppler-Untersuchung sollte der zu untersuchenden Struktur angepasst werden, um so eine möglichst hohe Bildfrequenz und damit eine bessere zeitliche Auflösung zu erreichen.

5.3. Registrierung und Auswertung

Die Registrierung von PW- und CW-Doppler-Frequenzspektren erfolgt ausschließlich durch Geräte mit amplitudengewichteter Spektralanalyse. Die Spektralanalyse der Doppler-Frequenzspektren erfolgt über Fourier-Analyse („fast Fourier transformation“, FFT) oder über Chirp-Z-Transformation. Zeitgleich mit den Doppler-Spektralkurven wird ein EKG registriert. Die Registriergeschwindigkeit soll mindestens 50 mm/s betragen, in bestimmten Fällen (Messung von Zeitintervallen, hohe Herzfrequenz) sind 100 mm/s erforderlich. Aus den registrierten Spektralkurven des Doppler-Shifts sowie dem simultan aufgezeichneten EKG sollten mit der im Gerät integrierten Mess- und Recheneinheit folgende Parameter bestimmt werden:

1. die maximale Flussgeschwindigkeit (V_{\max} in cm/s oder m/s) an Herzklappen und in Gefäßen und somit die maximale instantane Druckdifferenz (ΔP_{\max} in mmHg) zwischen einzelnen Herzhöhlen und/oder großen Gefäßen,
2. die Zeitintervalle (in ms oder s),
3. die Steilheit von Flussgeschwindigkeitsanstieg oder -abfall (dV/dt in cm/s^2 oder m/s^2),
4. Geschwindigkeits-Zeit-Integral („velocity time integral“, VTI, in cm oder m) und über die mittlere Flussgeschwindigkeit (V_{mean} in cm/s oder m/s) der mittlere Druckgradient (in mmHg).

Die wichtigsten Parameter sind die maximale und mittlere Flussgeschwindigkeit und die maximale und mittlere Druckdifferenz. Diese Messungen sind nur verwertbar, wenn die Doppler-Frequenzspektren möglichst artefaktfrei und mit klar zu erkennenden Grenzflächen und -punkten registriert werden. Eine derart auswertbare Registrierung ist über optimierte Verstärkungs- und Filtereinstellung (Filterbereich 100–1600 Hz, mindestens 200–800 Hz) zu gewährleisten. Die Messwerte sollten über 3 Herzzyklen gemittelt werden, um atemabhängige Schwankungen auszugleichen.

Hier steht eine Anzeige.



5.4. Untersuchungsablauf

Bei der Doppler-echokardiographischen Untersuchung ist ebenso wie bei der 2-D-Echokardiographie im Sinne der sequenziellen segmentalen Analyse vorzugehen. Nur so können auch bei einer bereits bestehenden Verdachtsdiagnose alle flussdynamischen Details erfasst und die Diagnose dadurch gesichert werden. Im Zusammenhang mit der 2-D-Untersuchung sind daher alle Herzsegmente, Konnektionen und herznahen großen Gefäße mit farbkodierter und/oder konventioneller Doppler-Sonographie (PW-, ggf. CW-Doppler) zu untersuchen. Dabei werden Strömungsrichtung und -profil orientierend mit der farbkodierten Doppler-Sonographie beurteilt und ggf. die maximale Flussgeschwindigkeit mit dem PW- und/oder CW-Doppler ermittelt. Bei beschleunigter Flussgeschwindigkeit kann nach der vereinfachten Bernoulli-Gleichung der maximale instantane Druckgradient bestimmt werden. Bei Vorliegen einer Klappenregurgitation werden die Rückflussgeschwindigkeit und ggf. auch die Ausdehnung eines Regurgitationsjets beurteilt. Nach aktuellem Wissensstand korreliert aber die Weite des Jets an der engsten Stelle des Durchtrittes (sog. V. contracta) am besten mit dem Schweregrad einer Insuffizienz. Für die im Erwachsenenalter zusätzlichen Methoden, wie z. B. EROA-Bestimmung [25, 26], gibt es aktuell noch keine dem Wachstum und den Größenverhältnissen des Kindes angepassten Richtwerte bzw. Validierungen. Werte wie die Druckhalbzeit bei Aorteninsuffizienz sowie die „peak rate“ des systolischen Druckabfalls über einer Mitralinsuffizienz sind ebenfalls für Kinder nicht validiert.

Zur Beurteilung der diastolischen Funktion werden die maximalen Geschwindigkeiten von E- und A-Welle, die Dezelerationszeit der E-Welle, die Dauer der A-Welle, die E/A-Ratio sowie die isovolumetrische Relaxationszeit (IVRT) gemessen. Einschränkend sind hier die Lastabhängigkeit der Parameter sowie die erschwerten Messungen bei Verschmelzen der Druckkurven aufgrund hoher Herzfrequenzen zu berücksichtigen. Ferner können bei geeignetem Schallfenster die Doppler-Untersuchungen des pulmonal-

venösen Einstroms in den linken Vorhof mit Messung der S-, D- und A-Wellen-Geschwindigkeiten sowie die A-Dauer gemessen werden. Aufgrund der Abhängigkeit von der Atmung sollten dabei Mittelwerte aus 3 aufeinanderfolgenden Zyklen gebildet werden. Die Integration der mitralen Flusskurven zur Berechnung der Füllungsfraktionen sowie die Ratio zwischen pulmonalvenösen A-Wellen und der mitralen A-Wellen-Dauer sind weitere Parameter, die zur Charakterisierung der diastolischen Funktion eingesetzt werden können [27].

Aus dem Verhältnis der systolischen Austreibungszeit über der entsprechenden Semilunarklappe kann in Relation zu den isovolumetrischen Zeitintervallen [IVRT und isovolumetrische Relaxationszeit (IRT)] der sog. Tei-Index als Quotient gebildet werden [28]. Er gilt als Maß für sowohl systolische als auch diastolische Funktion, ist für den rechten und linken Ventrikel mit dem PW-Doppler anwendbar und kann auch mit dem Gewebe-Doppler gemessen werden. Es existieren unterschiedliche klinische Anwendungsgebiete bei angeborenen Herzfehlern [29] sowie Normwerte für Kinder [30], der Index ist unabhängig von der Ventrikelgeometrie. Seine klinische Aussagekraft ist eingeschränkt, da er stark von der Herzfrequenz und den Lastbedingungen abhängig ist [31]. Die Unterscheidung zwischen systolischer und diastolischer Funktionsstörung ist naturgemäß nicht möglich.

6. Fetale Echokardiographie

Die fetale Echokardiographie bietet die Möglichkeit, pränatal Fehlbildungen oder Funktionsstörungen des fetalen Herzens zu erkennen und deren Verlauf zu kontrollieren. Aufbauend auf einer kompetenten interdisziplinären Beratung eröffnet eine akkurate pränatale Diagnose die Möglichkeit, potenziell lebensbedrohliche Herzfehler unmittelbar postnatal einer optimalen Behandlung zuzuführen.

Die Untersuchung ist zunächst bei Risikoschwangerschaften indiziert. Es sollte hier jedoch betont werden, dass mit der Definition von Risikokollektiven nur ein Bruchteil der relevanten fetalen Herzfehler erkannt werden kann. Die Mehrheit

verbirgt sich in sog. Low-risk-Kollektiven und könnte somit nur durch ein geeignetes systematisches Screening vorgeburtlich erkannt werden.

Die fetale Echokardiographie umfasst sowohl strukturabbildende (2-D-, TM-Echokardiographie) als auch Doppler-sonographische Untersuchungstechniken, mit deren Hilfe die Anatomie aller Herzabschnitte und der herznahen großen Gefäße sowie intra- und extrakardiale Blutflussmuster dargestellt werden. Apparative Empfehlungen für eine sichere Durchführung fetaler Ultraschalluntersuchungen sind hierbei zu beachten [32, 33, 34, 35] und durch entsprechende Gerätevoreinstellungen bei den Doppler-Untersuchungen zu gewährleisten. Der günstigste Zeitpunkt für die fetale Echokardiographie liegt bei Risikopatientinnen in der 20. bis 22. Schwangerschaftswoche (SSW). Unabhängig davon soll eine fetale Echokardiographie aber immer dann durchgeführt werden, wenn beim Feten extrakardiale Auffälligkeiten gefunden werden, die gehäuft mit kardialen Anomalien assoziiert sind [36, 37].

Zunehmend etabliert sich die sog. Früh-echokardiographie (16.–18. SSW) oder die Erst-Trimester-Echokardiographie (12.–14. SSW; [38]). Sinnvoll sind diese Untersuchungen bei speziellen Risikokollektiven wie z. B. einer gesteigerten Nackentransparenz im 1. Trimenon oder dem frühen sonographischen Verdacht auf ein Vitium cordis. Diese Untersuchungen werden mit möglichst hochfrequenten Ultraschallsonden (7–10 MHz) durchgeführt und verlangen eine besondere Erfahrung des Untersuchenden.

Bei der fetalen Echokardiographie wird ein segmentales Vorgehen gewählt, wobei zunächst die Lage des Feten und seine Seitenlokalisation (rechte und linke fetale Seite) bestimmt werden. Anschließend wird der abdominelle Situs nach der Lage des Magens und der großen Gefäße in Höhe des Zwerchfells beschrieben. Dann müssen schrittweise die venoatrialen, atrioventrikulären und ventrikuloarteriellen Konnektionen mit den zugehörigen Herzsegmenten (Systemvenen, Lungenvenen, Vorhöfe, Kammern, große Arterien) im 2-D-Bild erfasst werden. Die wichtigste Standardschnittebene ist dabei der fetale 4-Kammer-Blick, der

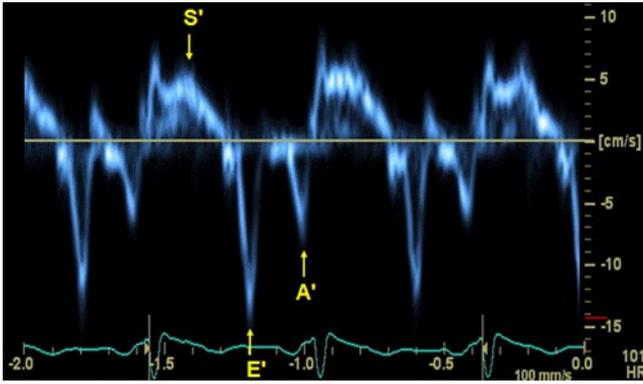


Abb. 3 ◀ Hochauflöser (Bildrate >300/s) Gewebe-Doppler zur Quantifizierung der regionalen Gewebebewegungs- und Geschwindigkeiten des Ventrikelmyokards. E' und A' als Maximalwerte in der Diastole, S' als maximale systolische Geschwindigkeit

die Lage des Herzens im fetalen Thorax, den Nachweis und die relative Größe der einzelnen Herzkammern sowie der AV-Klappen zeigt. Durch Lageänderung des Schallkopfes werden aus dem 4-Kammer-Blick heraus die links- und rechtsventrikulären Ausflusstrakte und die nachfolgenden großen Gefäße dargestellt werden. Beim rechtsventrikulären Ausflusstrakt sollten die Aufzweigung der Pulmonalarterien und der Ductus arteriosus dargestellt werden. Der Aortenbogen sollte, wenn lagebedingt möglich, inklusive dem Abgang der Halsgefäße abgebildet werden, hierzu eignen sich sowohl die transversale Schnittebene in Höhe der 3-Gefäß-Trachea-Ebene wie auch sagittale Ebenen. Die in allen diesen Strukturen vorkommenden Blutflussmuster werden im Farb-Doppler-Modus und – vor allem bei auffälligen Flussmustern – mit dem PW- oder – bei höhergradigen Stenosen oder Klappeninsuffizienzen – mittels CW-Doppler dargestellt. Dabei sollte auch das Flussmuster in den für den Feten eigenen Blutflusswegen (Foramen ovale, Ductus arteriosus, Nabelschnurarterien, Ductus venosus) erfasst und analysiert werden. Zur Beurteilung der fetalen Ventrikel- und eventuellen fetalen Dysrhythmien wird auch die TM-Echokardiographie eingesetzt. Quantitative Messungen fetaler Herzstrukturen sollen mit Normwerten verglichen werden [36, 37].

Die Dokumentation der fetalen Herzfrequenz gehört zu jeder Basisuntersuchung des fetalen Herzens. Die Auswertung und Befundung einer fetalen Echokardiographie folgt den oben beschriebenen Grundsätzen postnataler Untersuchungen, wobei wegen ungünstiger Untersuchungsbedingungen (z. B. Adipositas der Mutter oder ungünstige Lage des

Feten) nicht eindeutig darstellbare Strukturen oder Doppler-Parameter vermerkt werden sollen.

Eine fetale Echokardiographie im 2. Trimenon kann nicht alle relevanten Herzfehler detektieren. In einigen Fällen entwickeln sich z. B. relevante Klappenstenosen oder Gefäßhypoplasien erst zum 3. Trimester hin. In besonderen Risikokollektiven kann hier eine erneute fetale Echokardiographie sinnvoll sein. Wird ein fetaler Herzfehler diagnostiziert, sollte zum Ausschluss von assoziierten Fehlbildungen oder Hinweiszeichen auf syndromale Erkrankungen – falls noch nicht erfolgt – ein ergänzender Fehlbildungsschall durch einen qualifizierten Pränatalmediziner veranlasst werden. Im Bereich des Screenings z. B. auf Herzfehler ist auch das Gendiagnostikgesetz [39] zu beachten. Ohne Aufklärung vor der Untersuchung darf die werdende Mutter z. B. nicht über ein erhöhtes Risiko für eine Aneuploidie im Zusammenhang mit einem während der Untersuchung festgestellten Herzfehler informiert werden.

Bei Diagnose eines Herzfehlers sollte zwingend eine interdisziplinäre Beratung zur peri- und postnatalen Behandlung und seiner weiteren Prognose durch einen Kinderkardiologen erfolgen.

7. Transösophageale Echokardiographie

In der pädiatrischen Kardiologie sind die Hauptindikationen für eine transösophageale Echokardiographie (TEE) zu sehen in

1. der perioperativen oder während einer interventionellen Katheterisierung vorgenommenen Untersuchung, die der sofortigen Feststellung der

durch den Eingriff entstandenen anatomischen und funktionellen Verhältnisse dient,

2. der Untersuchung am älteren Kind, Jugendlichen und Erwachsenen oder postoperativen Patienten mit eingeschränkten transthorakalen Schallbedingungen.

Die Untersuchung erfordert spezielle Kenntnisse und Erfahrung mit der Handhabung der Ultraschallsonde, insbesondere mit deren Einführung in den Ösophagus und den Magen sowie der in diesem Zusammenhang zu berücksichtigenden Kontraindikationen und Risiken. Ferner muss der Untersucher Erfahrung in der Erkennung und Interpretation von transösophagealen Schnittbildern haben (bezüglich der Mindestvoraussetzungen s. auch Abschnitt 1.2).

Die transösophageale Echokardiographie wird mit einem Gerät vorgenommen, das alle einzelnen Modalitäten der Echokardiographie (2-D- und TM-Echokardiographie; Doppler- und Farb-Doppler-Sonographie) ermöglicht. Es sollten biplane oder omniplane Sonden benutzt werden. Der verwendete Schallkopf muss den technisch vorgeschriebenen Sicherheitsmerkmalen entsprechen, die Schallkopffrequenz soll ≥ 5 MHz betragen. Der Schallkopf muss regelmäßig auf Leckströme, die Sonde auf Biss- oder sonstige Beschädigungen kontrolliert werden. Ihr Durchmesser muss den Größenverhältnissen des kindlichen Ösophagus angepasst sein. Die Untersuchung wird immer zusammen mit einem zweiten Arzt, eventuell zusätzlich auch mit einer entsprechend ausgebildeten technischen Assistenz durchgeführt und erfordert bei Kleinkindern oder jungen Schulkindern die Intubationsnarkose oder eine tiefe Sedierung bei erhaltener Atmung, bei Jugendlichen die lokale Rachenanästhesie und eventuell zusätzliche Sedierung. Grundsätzlich muss ein venöser Zugang für die rasche Applikation von notwendigen Medikamenten oder Kontrastmittel geschaffen werden. EKG, Blutdruck und O_2 -Sättigung des Patienten werden kontinuierlich überwacht und protokolliert; Notfallmedikamente müssen unmittelbar erreichbar sein. Der Patient ist wenigstens 4 h vor der Untersuchung nüchtern. Die

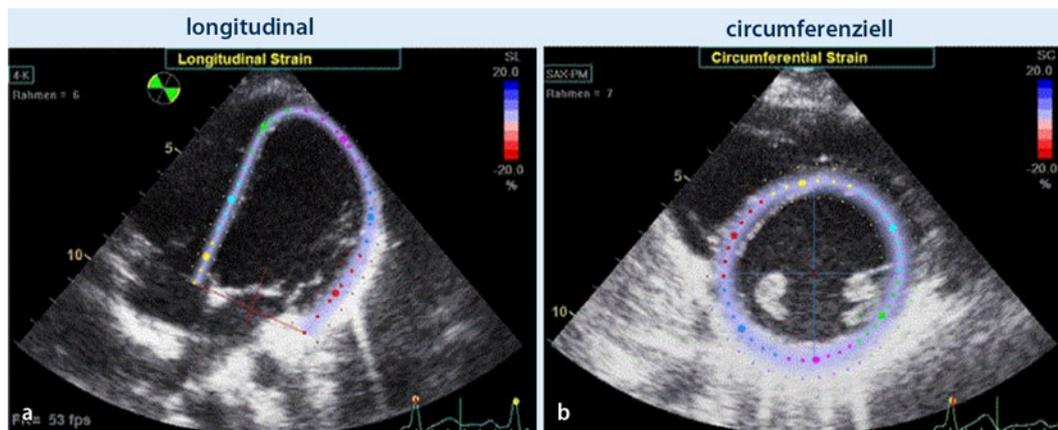


Abb. 4 ◀ Berechnung von globalen und regionalen Deformationsparametern mit der Speckle-tracking-Methode. Im apikalen 4-Kammer-Blick wird das linksventrikuläre Myokard mit Bildraten zwischen 50 und 90/s **a** in longitudinaler sowie **b** in einer parasternalen kurzen Achse in zirkumferenzieller Bewegungsrichtung untersucht

lokale Rachenanästhesie wird unmittelbar vor der Untersuchung mit einem Lokalanästhetikum durchgeführt.

Der nicht intubierte Patient wird in linker Seitenlage untersucht. Die leicht flektierte Sonde wird durch einen Beißring in den Pharynx eingeführt, wobei bei Widerstand dieser Versuch abgebrochen werden und zunächst nach anatomischen Ursachen für ein Passagehindernis gefahndet werden muss. Bei beatmeten Patienten hat sich die Zuhilfenahme eines Laryngoskops bei der Einführung der Sonde bewährt.

In Anlehnung an die Empfehlungen der amerikanischen und europäischen Fachgesellschaften für Echokardiographie und Anästhesie sollen standardisierte Schnittebenen als Grundlage für eine vollständige Erfassung der Morphologie und Funktion eingestellt werden [40, 41]. Eine Modifikation der Schnittebenen kann bei angeborenen Herzfehlern aufgrund der individuellen Unterschiede der Anatomie in Einzelfällen erforderlich sein.

Die Durchführung von intra- und postoperativen TEEs sollte nur in Kenntnis der nichtinvasiven und invasiven Vorbefunde des Patienten erfolgen [42]. Soweit möglich, sollte zu Beginn einer Operation eine TEE zur Evaluation des präoperativen Befundes durchgeführt werden. Das postoperative TEE sollte auf eine möglichst vollständige Erhebung des morphologischen und hämodynamischen Status abzielen. TEEs bei interventioneller Herzkatheterisierung können in Einzelfällen auf die Darstellung der interessierenden Fragestellungen konzentriert werden.

In einem vollständigen Befund [43] müssen neben den in Abschnitt 3.3 angegebenen Details zusätzlich der Ablauf der Untersuchung und die Einführbarkeit der Sonde beschrieben und verabreichte Medikamente sowie eventuelle Komplikationen festgehalten werden. Nach einer lokalen Rachenanästhesie oder Intubationsnarkose soll der Untersuchte wegen der Aspirationsgefahr für mindestens 2 h keine Nahrung oder Flüssigkeit aufnehmen.

8. Gewebe-Doppler

Die Gewebe-Doppler-Untersuchung ist eine Anwendung des gepulsten Doppler-Verfahrens am sich bewegenden Myokard (▣ **Abb. 3**). Dieses Verfahren generiert neue Parameter zur Beschreibung von regionalen Myokardgeschwindigkeiten. Es werden die maximalen Geschwindigkeiten gemessen, diese liegen 10–20% höher als die Werte, die als mittlere Geschwindigkeiten mit dem farbcodierten Doppler-Verfahren gemessen werden. Während das gepulste Verfahren schnell auswertbar und gut reproduzierbar ist, weist die farbcodierte Methode eine höhere Interobservervariabilität auf und ist in der Auswertung zeitintensiver. Mit beiden Methoden können ergänzende Parameter zur Beschreibung der systolischen und diastolischen Funktion des linken und rechten Ventrikels erhoben werden. Da die myokardiale Bewegung Doppler-Signale mit niedriger Geschwindigkeit erzeugt, sollte die Nyquist-Grenze auf 15–30 cm/s gesenkt werden. Zur Messung der Geschwindigkeit am Mitralklappen- bzw. Trikuspidalklappenring wird ein Messfenster von <5 mm am medialen und la-

teralen Mitralklappenring bzw. lateralen Trikuspidalklappenring positioniert, und die Geschwindigkeit der systolischen Auslenkung (S') und die beiden diastolischen Auslenkungen E' und A' werden bestimmt. Damit können Quotienten wie die E/E' -Ratio gebildet werden, die im Falle eines erhöhten Wertes Hinweise auf erhöhte Füllungsdrücke geben können [44]. Zudem können die sog. isovolumetrische Akzeleration (IVA) im Rahmen der isovolumetrischen Kontraktionszeit (ICT) sowie die isovolumetrische Relaxationszeit (IRT) bestimmt werden. Die IVA ist ein relativ lastunabhängiger Parameter für die Kontraktilität, weist aber Schwächen in der Reproduzierbarkeit der Messungen auf. Bei der Interpretation der Messwerte sollte beachtet werden, dass viele Normwerte [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] mit dem Alter, der Herzfrequenz, mit unterschiedlichen kardialen Dimensionen sowie der Ventrikelgeometrie variieren [46, 55]. Hinzu kommt eine unterschiedliche Abhängigkeit von vorherrschenden Vor- bzw. Nachlastbedingungen. Aus diesen komplexen Zusammenhängen ergibt sich die Schwierigkeit der klinischen Anwendung der Methode bei angeborenen Herzfehlern. Korrelationen mit klinischem Verlauf sind bisher in der Literatur kaum zu finden. Daher können die publizierten Studien [7, 56] an kleinen Kollektiven nicht als Leitlinie einer klinischen Anwendbarkeit verstanden werden, sondern könnten im Rahmen einer regelmäßigen intraindividuellen Bestimmung geeigneter Parameter allenfalls zur Verlaufskontrolle beitragen.

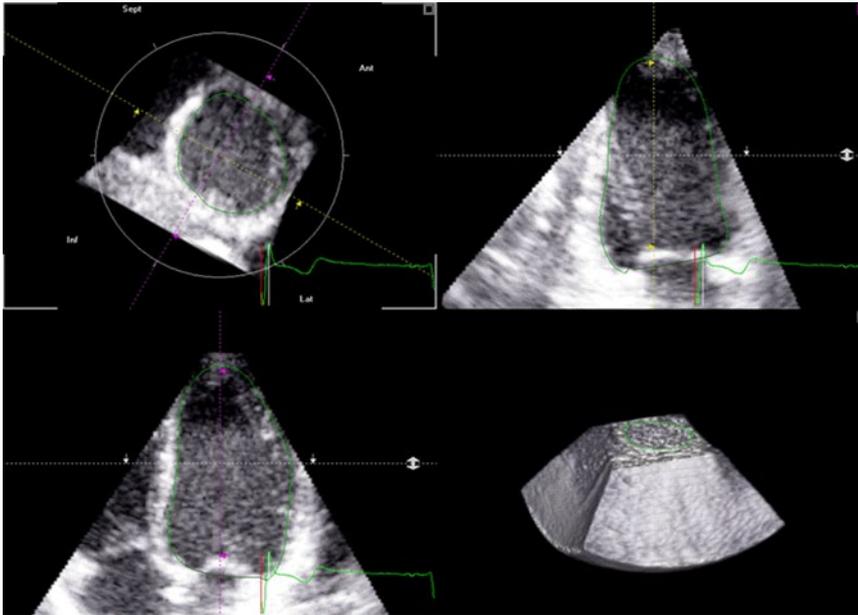


Abb. 5 ▲ Linksventrikuläre Volumenbestimmung an einem 3D-Datensatz des linken Ventrikels. Das aufgenommene Vollvolumen wurde mit einer Bildrate von 24/s aufgenommen, danach erfolgte in 3 repräsentativen apikalen 2D-Schnitten in Systole und Diastole die Konturfindung zwischen Myokard und Lumen des Ventrikels zur Berechnung der Volumina

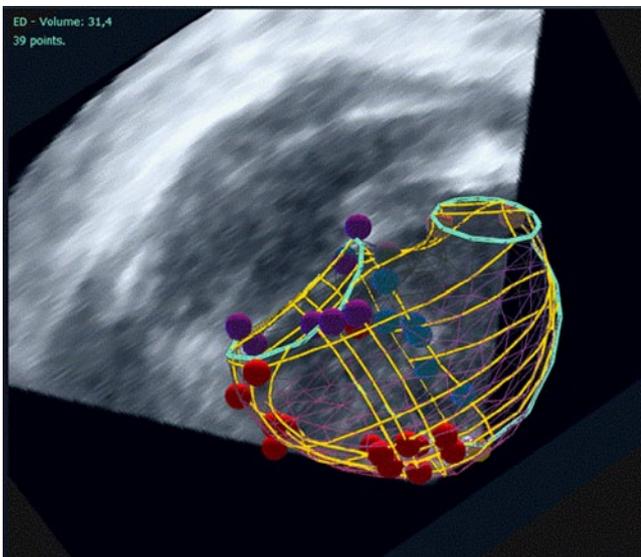


Abb. 6 ▲ Rechtsventrikuläre Volumenbestimmung an einem 3D-Datensatz des rechten Ventrikels. Aufnahme als Vollvolumen mit einer Bildrate von 24/s, Berechnung des dargestellten Volumens anhand der sog. „knowledge-based reconstruction“. Nach Markierung von bekannten anatomischen Bezugspunkten des individuellen rechten Ventrikels vom Untersucher wird eine externe Datenbank zur Bestimmung von Form und Volumen abgefragt und ein 3D-Volumen generiert

9. 2-D-Deformationsanalyse

Die Deformationsanalyse beschreibt eine Formänderung von Myokardarealen. Unterschiede von Gewebesgeschwindigkeiten erlauben eine Differenzierung, ob sich ein Myokardareal passiv mitbe-

wegt oder aktiv deformiert, d. h. kontrahiert oder sich ausdehnt. Der Begriff „strain“ steht dabei für die prozentuale Verformung in Bezug zur Ausgangslänge eines Myokardareals, während der Begriff „strain rate“ die Geschwindigkeit der Deformation beschreibt. Die Messmethoden

erlauben ferner eine Differenzierung der Deformationsänderung in longitudinaler, radialer und zirkumferenzieller Richtung. Diese verschiedenen Deformationsrichtungen werden dem komplizierten Muskelfaserverlauf des linken Ventrikels gerecht. Quantifiziert werden können die globale und regionale Deformation sowie deren zeitlicher Ablauf über den gesamten Herzzyklus. Als erste Methode wurde die Farb-Gewebe-Doppler-Technologie verwendet. Sie weist eine hohe zeitliche Auflösung auf, ist allerdings winkelabhängig und von einer sehr guten Bildqualität abhängig. Nachteile bestehen auch in einer aufwendigen Nachbearbeitung, die mit einer verminderten Reproduzierbarkeit einhergeht. Ausnahme bildet hier die Quantifizierung des radialen Strains in der kurzen Achse [57].

Eine neuere Methode, das „speckle tracking“, erfasst durch eine komplexe Verfolgung von Echosignalen (sog. „speckles“) während der Systole und Diastole des Herzens die Myokarddeformation (■ **Abb. 4**). Sie ist im Prinzip unabhängig von der Geometrie des Herzens und ist schnell und einfach quantifizierbar. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Parametern ist mit dem „speckle tracking“ eine einfache Quantifizierung der Rotations- und der Torsionsbewegung des Herzens möglich. Nachteilig sind eine schlechte zeitliche Auflösung bei niedrigen Bildraten, die gerade bei hohen Herzfrequenzen zu Fehlbestimmungen führen können, sowie das Verschwinden der „speckles“ aus der Aufnahmeebene, was insbesondere bei der Bestimmung des radialen „strains“ in den Kurzachsenschnitten zu einer sehr schlechten Reproduzierbarkeit führt. Daher sind die globalen Strain-Werte insgesamt wesentlich besser reproduzierbar als die regionalen, und es gibt auch Abweichungen zwischen den Auswertungstechniken verschiedener Anbieter [57]. Trotzdem könnte diese Methode die Funktionsbeschreibung des linken und rechten Ventrikels verbessern helfen. Aktuell ist „speckle tracking“ Gegenstand ausgiebiger Forschung auf dem Gebiet der angeborenen Herzfehler. Analog zu den Empfehlungen hinsichtlich der Gewebesgeschwindigkeiten sollte das „speckle tracking“ als zusätzlicher Parameter in der Verlaufsbeurteilung von

Patienten basierend auf den bisher vorliegenden Studien [7, 56] eingesetzt werden.

10. 3-D-Echokardiographie

Mit speziellen hochfrequenten Matrixultraschallsonden können Herz bzw. einzelne Herzabschnitte als 3-dimensionaler Volumendatensatz in Echtzeit aufgenommen bzw. in simultanen 3-dimensionalen Sequenzen bei Eingriffen visualisiert werden. Dies dient zur Darstellung der Herzanatomie und ermöglicht, die örtliche Beziehung zwischen den Strukturen besser als mit dem 2-D-Ultraschall zu erkennen. Bei Kindern ist diese Technik aktuell noch eingeschränkt einsetzbar, da nicht alle Hersteller entsprechende Sonden bereitstellen bzw. die vorhandene Hardware eine zu geringe zeitliche und örtliche Auflösung bietet. Somit muss die intraoperative und interventionelle 3-D-Technologie aktuell in den einzelnen Institutionen als zusätzliche Möglichkeit bei entsprechendem Erfahrungsschatz gewertet werden und ist kein Standardverfahren. Voraussetzung für eine valide Berechnung von Herzkammervolumina ist eine vollständige und optimale Erfassung der Herzkammer im 3-D-Volumendatensatz (Abb. 5). Im Vergleich zum MRT werden Volumina beider Kammern im 3-D-Ultraschall generell niedriger gemessen. Für die linke Kammer findet sich mittlerweile unabhängig vom verwendeten Schallkopf [58] eine gute Übereinstimmung zur MRT mit guter Reproduzierbarkeit [59]. Die Volumina werden mit der 3-D-Echokardiographie quantitativ unterschätzt, sind aber in der Berechnung der Ejektionsfraktion der biplanaren Simpson-Methode überlegen [60]. 3-D-Volumetriem der rechten Herzkammer sind aufgrund der subkostalen Lage des rechten Ventrikels, die die Aufnahme der kompletten Herzkammer deutlich erschwert, und unausgereiften Auswertemethoden für die klinische Routine noch nicht ausreichend valide. Auswertemethoden wie die Scheibchen-Summations-Methode sind sehr zeitintensiv [61], modellbasierte Techniken haben bisher nicht durchgehend in ihrer Präzision und Reproduzierbarkeit überzeugen können [62]. Insbesondere dilatierte Ventrikel sind nur schwer volumetrisch zu quantifi-

zieren. Neue, modellbasierte Quantifizierung mit „knowledge-based“ MRT-Datenbanken sind unabhängiger von einem optimalen Datensatz, da sie nur bestimmte Orientierungspunkte („landmarks“) benötigen, um genaue Volumina zu bestimmen ([12, 13], Abb. 6). Normwerte für beide Kammern werden aktuell erstellt. Insgesamt wird diese Methode zurzeit wissenschaftlich und klinisch evaluiert [63] und kann daher derzeit als Routinemethode noch nicht empfohlen werden. Dies gilt in gleichem Maße für die von einigen Herstellern bereits auf dem Markt befindliche Methode des „3-D-speckle trackings“, das am Volumendatensatz eine zeitgleiche Bestimmung der Volumina sowie der 3-dimensionalen Gewebeformation ermöglichen soll.

Korrespondenzadresse

Dr. K.T. Laser

Kinderherzzentrum/Klinik für Angeborene Herzfehler, Herz- und Diabeteszentrum NRW, Ruhr-Universität Bochum
Georgstr. 11, 32545 Bad Oeynhausen
tlaser@hdz-nrw.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. K.T. Laser, U. Herberg, M. Hofbeck, I. Dähnert, M. Vogt, O. Krogmann, T. Nekarda, K.R. Schirmer und D. Kececioglu geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht. Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Benavidez OJ, Gauvreau K, Jenkins KJ, Geva T (2008) Diagnostic errors in pediatric echocardiography: development of taxonomy and identification of risk factors. *Circulation* 117:2995–3001
- Schmidt KG, Beyer C, Hausler HJ et al (1999) Reports by the German society of pediatric cardiology. Quality standards for echocardiography in children and adolescents. Recommendations by the German Society of Pediatric Cardiology for echocardiography studies in childhood and adolescence. *Z Kardiol* 88:699–707
- Mart CR, Parrish M, Rosen KL et al (2006) Safety and efficacy of sedation with propofol for transoesophageal echocardiography in children in an outpatient setting. *Cardiol Young* 16:152–156
- Heistein LC, Ramaciotti C, Scott WA et al (2006) Chloral hydrate sedation for pediatric echocardiography: physiologic responses, adverse events, and risk factors. *Pediatrics* 117:e434–e441
- Pacileo G, Di Salvo G, Limongelli G et al (2007) Echocardiography in congenital heart disease: usefulness, limits and new techniques. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)* 8:17–22
- Lopez L, Colan SD, Frommelt PC et al (2010) Recommendations for quantification methods during the performance of a pediatric echocardiogram: a report from the pediatric measurements writing group of the American Society of Echocardiography Pediatric and Congenital Heart Disease Council. *J Am Soc Echocardiogr* 23:465–495
- Koestenberger M (2012) Transthoracic echocardiography in children and young adults with congenital heart disease. *ISRN Pediatr* 2012:753481
- Sluysmans T, Colan SD (2005) Theoretical and empirical derivation of cardiovascular allometric relationships in children. *J Appl Physiol* 99:445–457
- Pettersen MD, Du W, Skeens ME, Humes RA (2008) Regression equations for calculation of z scores of cardiac structures in a large cohort of healthy infants, children, and adolescents: an echocardiographic study. *J Am Soc Echocardiogr* 21:922–934
- Zilberman MV, Khoury PR, Kimball RT (2005) Two-dimensional echocardiographic valve measurements in healthy children: gender-specific differences. *Pediatr Cardiol* 26:356–360
- Colan SD (2013) The why and how of z scores. *J Am Soc Echocardiogr* 26:38–40
- Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Mertens L (2012) Echocardiographic assessment of right ventricular volumes: a comparison of different techniques in children after surgical repair of tetralogy of Fallot. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 13:596–604
- Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C et al (2011) Echocardiographic assessment of right ventricular volumes after surgical repair of tetralogy of Fallot: clinical validation of a new echocardiographic method. *J Am Soc Echocardiogr* 24:1191–1198
- Lai WW, Geva T, Shirali GS et al (2006) Guidelines and standards for performance of a pediatric echocardiogram: a report from the task force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 19:1413–1430
- Feigenbaum H (2005) Evaluation of systolic and diastolic function of the left ventricle. Feigenbaum's echocardiography. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, S 138–180
- Forfia PR, Fisher MR, Mathai SC et al (2006) Tricuspid annular displacement predicts survival in pulmonary hypertension. *Am J Respir Crit Care Med* 174:1034–1041
- Frommelt PC, Ballweg JA, Whitstone BN, Frommelt MA (2002) Usefulness of Doppler tissue imaging analysis of tricuspid annular motion for determination of right ventricular function in normal infants and children. *Am J Cardiol* 89:610–613
- Koestenberger M, Nagel B, Avian A et al (2012) Systolic right ventricular function in children and young adults with pulmonary artery hypertension secondary to congenital heart disease and tetralogy of Fallot: tricuspid annular plane systolic excursion (tapse) and magnetic resonance imaging data. *Congenit Heart Dis* 7:250–258
- Koestenberger M, Nagel B, Ravekes W et al (2011) Tricuspid annular plane systolic excursion and right ventricular ejection fraction in pediatric and adolescent patients with tetralogy of Fallot, patients with atrial septal defect, and age-matched normal subjects. *Clin Res Cardiol* 100:67–75
- Koestenberger M, Ravekes W, Everett AD et al (2009) Right ventricular function in infants, children and adolescents: reference values of the tricuspid annular plane systolic excursion (tapse) in 640 healthy patients and calculation of z score values. *J Am Soc Echocardiogr* 22:715–719

21. Koestenberger M, Nagel B, Ravekes W et al (2011) Systolic right ventricular function in preterm and term neonates: reference values of the tricuspid annular plane systolic excursion (tapse) in 258 patients and calculation of z-score values. *Neonatology* 100:85–92
22. Colan SD, Borow KM, Neumann A (1984) Left ventricular end-systolic wall stress-velocity of fiber shortening relation: a load-independent index of myocardial contractility. *J Am Coll Cardiol* 4:715–724
23. Olivieri L, Arling B, Friberg M, Sable C (2009) Coronary artery z score regression equations and calculators derived from a large heterogeneous population of children undergoing echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 22:159–164
24. Kampmann C, Wiethoff CM, Wenzel A et al (2000) Normal values of m mode echocardiographic measurements of more than 2000 healthy infants and children in central Europe. *Heart* 83:667–672
25. Lancellotti P, Moura L, Pierard LA et al (2010) European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 2: mitral and tricuspid regurgitation (native valve disease). *Eur J Echocardiogr* 11:307–332
26. Lancellotti P, Tribouilloy C, Hagendorff A et al (2010) European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 1: aortic and pulmonary regurgitation (native valve disease). *Eur J Echocardiogr* 11:223–244
27. O'Leary PW, Durongpisitkul K, Cordes TM et al (1998) Diastolic ventricular function in children: a Doppler echocardiographic study establishing normal values and predictors of increased ventricular end-diastolic pressure. *Mayo Clin Proc* 73:616–628
28. Tei C, Ling LH, Hodge DO et al (1995) New index of combined systolic and diastolic myocardial performance: a simple and reproducible measure of cardiac function – a study in normals and dilated cardiomyopathy. *J Cardiol* 26:357–366
29. Yasuoka K, Harada K, Toyono M et al (2004) Tei index determined by tissue Doppler imaging in patients with pulmonary regurgitation after repair of tetralogy of Fallot. *Pediatr Cardiol* 25:131–136
30. Roberson DA, Cui W (2007) Right ventricular tei index in children: effect of method, age, body surface area, and heart rate. *J Am Soc Echocardiogr* 20:764–770
31. Eidem BW, O'Leary PW, Tei C, Seward JB (2000) Usefulness of the myocardial performance index for assessing right ventricular function in congenital heart disease. *Am J Cardiol* 86:654–658
32. Barnett SB, Ter Haar GR, Ziskin MC et al (2000) International recommendations and guidelines for the safe use of diagnostic ultrasound in medicine. *Ultrasound Med Biol* 26:355–366
33. Allan L, Dangel J, Fesslova V et al (2004) Recommendations for the practice of fetal cardiology in Europe. *Cardiol Young* 14:109–114
34. Lee W (2010) Aium practice guideline for the performance of fetal echocardiography
35. Rychik J, Ayres N, Cuneo B et al (2004) American Society of Echocardiography guidelines and standards for performance of the fetal echocardiogram. *J Am Soc Echocardiogr* 17:803–810
36. Schneider C, McCrindle BW, Carvalho JS et al (2005) Development of z-scores for fetal cardiac dimensions from echocardiography. *Ultrasound Obstet Gynecol* 26:599–605
37. Pasquini L, Mellander M, Seale A et al (2007) Z-scores of the fetal aortic isthmus and duct: an aid to assessing arch hypoplasia. *Ultrasound Obstet Gynecol* 29:628–633
38. Geipel A, Gembruch U (2012) Screening performance of first trimester nuchal translucency, ductus venosus blood flow and tricuspid regurgitation for cardiac defects. *Z Geburtshilfe Neonatol* 216:157–161
39. Gesetz über genetische Untersuchungen bei Menschen. 2009; Gendiagnostikgesetz vom 31. Juli 2009. BGBl. I S. 2529, 3672
40. Shanewise JS, Cheung AT, Aronson S et al (1999) ASE/SCA guidelines for performing a comprehensive intraoperative multiplane transesophageal echocardiography examination: recommendations of the American Society of Echocardiography council for intraoperative echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists task force for certification in perioperative transesophageal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 12:884–900
41. Flachskampf FA, Badano L, Daniel WG et al (2010) Recommendations for transoesophageal echocardiography: update 2010. *Eur J Echocardiogr* 11:557–576
42. Ayres NA, Miller-Hance W, Fyfe DA et al (2005) Indications and guidelines for performance of transesophageal echocardiography in the patient with pediatric acquired or congenital heart disease: report from the task force of the pediatric council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 18:91–98
43. Feneck R, Kneeshaw J, Fox K et al (2010) Recommendations for reporting perioperative transoesophageal echo studies. *Eur J Echocardiogr* 11:387–393
44. Border WL, Michelfelder EC, Glascock BJ (2003) Color m-mode and Doppler tissue evaluation of diastolic function in children: simultaneous correlation with invasive indices. *J Am Soc Echocardiogr* 16:988–994
45. Hiarada K, Orino T, Yasuoka K et al (2000) Tissue Doppler imaging of left and right ventricles in normal children. *Tohoku J Exp Med* 191:21–29
46. Eidem BW, McMahon CJ, Cohen RR et al (2004) Impact of cardiac growth on Doppler tissue imaging velocities: a study in healthy children. *J Am Soc Echocardiogr* 17:212–221
47. Kapusta L, Thijssen JM, Cuypers MH et al (2000) Assessment of myocardial velocities in healthy children using tissue Doppler imaging. *Ultrasound Med Biol* 26:229–237
48. Rychik J, Tian ZY (1996) Quantitative assessment of myocardial tissue velocities in normal children with Doppler tissue imaging. *Am J Cardiol* 77:1254–1257
49. Roberson DA, Cui W, Chen Z et al (2007) Annular and septal Doppler tissue imaging in children: normal z-score tables and effects of age, heart rate, and body surface area. *J Am Soc Echocardiogr* 20:1276–1284
50. Kukulski T, Voigt JU, Wilkenshoff UM et al (2000) A comparison of regional myocardial velocity information derived by pulsed and color Doppler techniques: an in vitro and in vivo study. *Echocardiography* 17:639–651
51. Ayabakan C, Ozkutlu S (2004) Left ventricular myocardial velocities in healthy children: quantitative assessment by tissue Doppler echocardiography and relation to the characteristics of filling of the left ventricle. *Cardiol Young* 14:156–163
52. Mori K, Hayabuchi Y, Kuroda Y et al (2000) Left ventricular wall motion velocities in healthy children measured by pulsed wave Doppler tissue echocardiography: normal values and relation to age and heart rate. *J Am Soc Echocardiogr* 13:1002–1011
53. Van de Veire NR, De Sutter J, Bax JJ, Roelandt JR (2008) Technological advances in tissue Doppler imaging echocardiography. *Heart* 94:1065–1074
54. Mori K, Nakagawa R, Nii M et al (2004) Pulsed wave Doppler tissue echocardiography assessment of the long axis function of the right and left ventricles during the early neonatal period. *Heart* 90:175–180
55. Cantinotti M, Lopez L (2013) Nomograms for blood flow and tissue Doppler velocities to evaluate diastolic function in children: a critical review. *J Am Soc Echocardiogr* 26:126–141
56. Dragulescu A, Mertens LL (2010) Developments in echocardiographic techniques for the evaluation of ventricular function in children. *Arch Cardiovasc Dis* 103:603–614
57. Koopman LP, Slorach C, Hui W et al (2010) Comparison between different speckle tracking and color tissue Doppler techniques to measure global and regional myocardial deformation in children. *J Am Soc Echocardiogr* 23:919–928
58. Laser KT, Bunge M, Hauffe P et al (2010) Left ventricular volumetry in healthy children and adolescents: comparison of two different real-time three-dimensional matrix transducers with cardiovascular magnetic resonance. *Eur J Echocardiogr* 11:138–148
59. Herberg U, Brand M, Bernhardt C et al (2011) Variables influencing the accuracy of 2-dimensional and real-time 3-dimensional echocardiography for assessment of small volumes, areas, and distances: an in vitro study using static tissue-mimicking phantoms. *J Ultrasound Med* 30:899–908
60. Lu X, Xie M, Tomberlin D et al (2008) How accurately, reproducibly, and efficiently can we measure left ventricular indices using m-mode, 2-dimensional, and 3-dimensional echocardiography in children? *Am Heart J* 155:946–953
61. Soriano BD, Hoch M, Ithuralde A et al (2008) Matrix-array 3-dimensional echocardiographic assessment of volumes, mass, and ejection fraction in young pediatric patients with a functional single ventricle: a comparison study with cardiac magnetic resonance. *Circulation* 117:1842–1848
62. Khoo NS, Young A, Occlshaw C et al (2009) Assessments of right ventricular volume and function using three-dimensional echocardiography in older children and adults with congenital heart disease: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 22:1279–1288
63. Simpson JM, Miller O (2011) Three-dimensional echocardiography in congenital heart disease. *Arch Cardiovasc Dis* 104:45–56