

Jörg Detlev Moritz

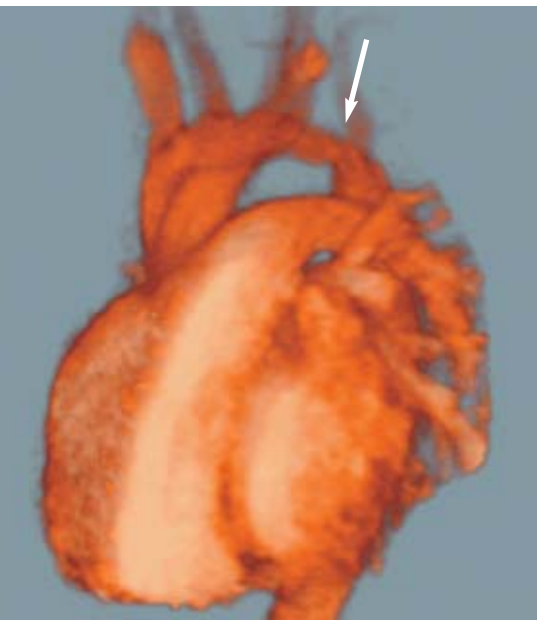
MRT des Herzens (Cardio-MRT) bei Kindern

Mit der Entwicklung moderner, leistungsfähiger MRT-Geräte ist es möglich geworden, in sehr kurzer Zeit (< 50 ms) Bilder mit hoher räumlicher Auflösung zu erstellen. Dies gestattet eine bildgebende Diagnostik auch des schlagenden Herzens mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Bildgebung des Herzens war bisher die Domäne der Echokardiographie und des Herzkatheters.

Die Echokardiographie ist ein schnell und mobil einsetzbares Verfahren, das die Untersuchung des

Fettgewebe unter der Haut zählen, erforderlich. Liegen solche Schallhindernisse zwischen dem Schallkopf und dem Herzen, so kann eine Untersuchung unmöglich werden. Vor allem bei Kindern jenseits der Neugeborenen- und Kleinkindzeit und nach Herzoperationen sind bestimmte Bereiche des Herzens, insbesondere die rechte Herzkammer, die Lungenarterien oder operativ geschaffene Kurzschlußverbindungen, aufgrund der genannten Schallhindernisse schwer oder gar nicht einsehbar.

wie eine größere Blutung oder eine Gefäßverletzung auftreten. Das Vorschieben der Katheter erfolgt unter Röntgenkontrolle, für die Untersuchung selbst werden in kurzem Zeitabstand viele Röntgenbilder aufgenommen, die anschließend als Film betrachtet werden können. Dabei entsteht eine nicht unerhebliche Strahlenbelastung für das Kind. Vorteile des Herzkatheters sind die Möglichkeiten der direkten Druck- und Flussmessungen im Gefäß. Darüber hinaus können therapeutische Maßnahmen (Interventionen) über den Katheter durchgeführt werden, wie z.B. das Aufweiten einer engen Stelle (Stenose) im Gefäßsystem mittels eines Ballons oder das Einlegen eines sich selbst ausdehnenden Drahtrohres – Stent – in einen veränderten Gefäßabschnitt.

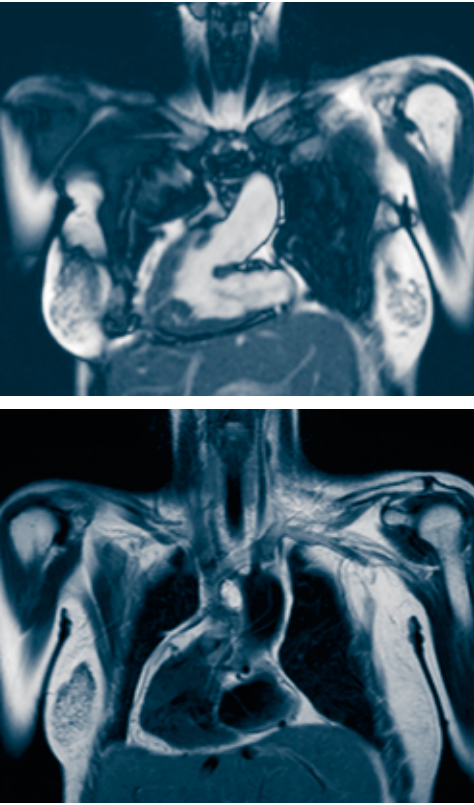


■ Abb. 1: Zustand nach OP einer Aortenisthmusstenose

Herzens in Echtzeit gestattet. Die Bildqualität in der Echokardiographie wird wie bei allen Ultraschallverfahren durch den Körperbau des Patienten mitbestimmt. Ein geeignetes Schallfenster ist für eine Beurteilung des Herzens ohne Schallhindernisse, zu denen Luft in der Lunge, Knochen (Rippen) oder viel

Die Herzkatheteruntersuchung unter Röntgendurchleuchtung ist ein invasives Untersuchungsverfahren. Ein Katheter wird dabei von der Leiste aus in ein zentrales Blutgefäß wie Hauptschlagader (Aorta), Hohlvene oder in eine Herzkammer vorgeschoben. Bei diesem Verfahren können bestimmte Komplikationen

Die Magnetresonanztomographieuntersuchung des Herzens (Cardio-MRT) stellt eine Alternative zu den beiden anderen Verfahren dar. Bei vielen Fragestellungen ist sie bereits heute die Methode der Wahl, wie zum Beispiel bei der Abklärung einer angeborenen Verengung der Hauptschlagader (Aortenisthmus-



■ Abb. 2a/b: White blood Technik (oben) und Black blood Technik (unten) bei einem rechts gelegenen Herz mit schwerem Herzfehler

stenose), nach Herzoperationen und zur Abklärung operativ geschaffener Kurzschlussverbindungen zwischen zentralen Gefäßen oder Herzhöhlen. Die Kernspintomographie ist ein nichtinvasives Verfahren und benötigt keine Röntgenstrahlen. Anatomische Hindernisse in Form von Luft, Knochen oder Fettgewebe wie im Ultraschall gibt es in der Kernspintomographie nicht. Fehler im Bild (Artefakte) entstehen nur dort, wo metallische Fremdkörper, wie Gefäßklips, Stents oder künstliche Herzklappen mit Metallanteilen in das Herz oder die zentralen Gefäße eingebracht worden sind. Nachteile sind die relativ

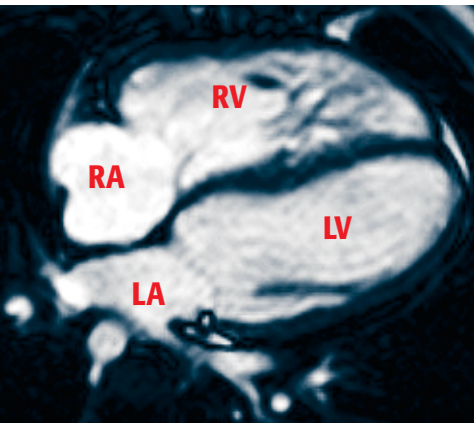
hohen Kosten, der Zeitaufwand für die Untersuchung und die noch nicht überall verfügbaren Geräte.

Für Herzuntersuchungen in der Kernspintomographie werden Magnete mit einer Magnetfeldstärke von (mindestens) 1,5 T benötigt. Außerdem sind eine spezielle Oberflächenspule zum Empfang der Messsignale sowie leistungsfähige Gradientenspulen erforderlich. Nur so lassen sich schnelle Bildfolgen mit hoher räumlicher Auflösung erzeugen.

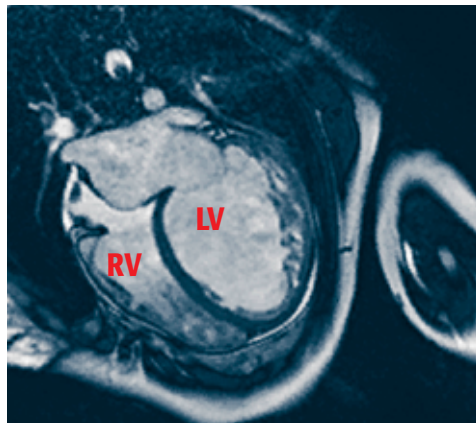
Zur Vorbereitung auf eine Herzuntersuchung benötigt der Patient eine Verweilkanüle in einer Armvene, um Kontrastmittel oder Medikamente zur Herzanregung spritzen zu können. Unmittelbar vor der Untersuchung werden dem Patienten EKG-Elektroden zur Erfassung der Herzströme auf die Brustwand geklebt (sog. Vektor-EKG). Zusätzlich erhält der Patient zur Registrierung der Atembewegungen einen Meßgurt auf den Oberbauch.

Die Untersuchung beginnt mit einigen Planungsbildern, einem sog. Scout, in Höhe des Herzens. Daran schließen sich spezielle für die Herzuntersuchung entwickelte Meßsequenzen an. Diese Sequenzen werden vom EKG-Signal getriggert, das

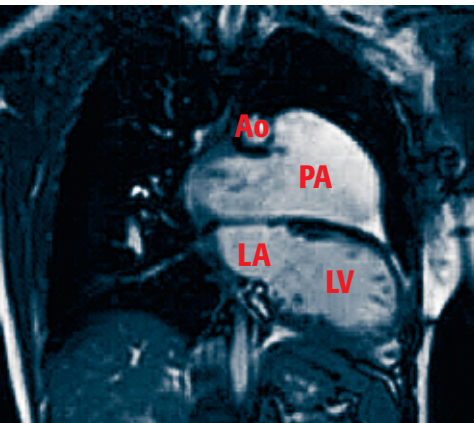
heißt, sie werden durch einen definierten Impuls des EKGs gestartet. Nach ihrem Start werden in 20-25 aufeinanderfolgenden Phasen eines Herzzyklus Bilder des Herzens erzeugt. Diese Messungen werden in den nachfolgenden Herzzyklen wiederholt, sodaß mehrere Daten pro Schicht und Herzphase gewonnen werden, die abschließend für das endgültige Bild gemittelt werden. Während einer Meßsequenz, die je nach Anzahl der Schichten, der Anzahl der gemessenen Herzphasen und der Herzfrequenz zwischen 6 und 20 s dauert, muss der Patient die Luft anhalten. Ergebnis einer solchen Messung sind 20-25 Bilder des Herzens in verschiedenen Herzphasen. Nacheinander als Film zusammengestellt, geben sie das schlagende Herz wieder. Es werden zwei verschiedene Arten von Sequenzen unterschieden: Meßsequenzen, die das Blut in den Herzkammern und Gefäßen weiß darstellen, sog. White blood Sequenzen und Meßsequenzen, die das Blut schwarz wiedergeben, sog. Black blood Sequenzen (Abb. 2). Nach dem Scout werden in bestimmter Reihenfolge mit diesen speziellen Herzsequenzen (in der Regel White blood Sequenzen) Schnittebenen durch das Herz gelegt, um die genaue Herzachse im Körper ermitteln zu können. Ergebnis ist neben dem Vierkammerblick, bei dem sowohl beide Herzkammern als auch beide Vorhöfe in einer Ebene dargestellt werden (Abb. 3), die Kurze-Achse-



■ Abb. 3: Vierkammerblick – LV = linke Herzkammer, LA = linker Vorhof, RV = rechte Herzkammer, RA = rechter Vorhof



■ Abb. 4: Herzmuskelerkrankung mit vergrößerten Herzkammern (LV = linke Herzkammer, RV = rechte Herzkammer)



■ Abb. 5: Weite Lungenarterie (PA) bei Hochdruck in der Lungenstrombahn. Ao = Hauptschlagader, LA = linker Vorhof, LV = linke Herzkammer

Ebene, die eine Ebene senkrecht zum Vierkammerblick mit Querschnitten durch die Herzhöhlen darstellt. Auf der Basis dieser definierten Ebenen können weitere Ebenen durch das Herz geplant werden, die z. B. die Ausflußbahn aus der linken Herzkammer in die Hauptschlagader oder aus der rechten Herzkammer in die Lungenarterie dar-

stellen.

Die auf diesem Weg erhaltenen Bilder in den verschiedenen Ebenen des Herzens erlauben eine rein morphologische Auswertung (Aussehen des Herzens). Herzfehler wie Veränderungen der Herzhöhlen, der Herzscheidewände, des Herzmuskels (Abb. 4), der Abgänge oder Mündungen der zentralen Gefäße (Abb. 5), operativ geschaffene Veränderungen am Herzen (Abb. 6) oder auch Herztumore und

Blutgerinnsel in einer Herzhöhle können diagnostiziert werden. Dafür ist es häufig erforderlich, nicht nur ein, sondern mehrere nebeneinander liegende Bilder pro Schichtebene darzustellen. Spezielle atemgetriggerte Meßsequenzen mit dünnen Schichten können die Herzkranzgefäße darstellen.

Da Informationen nicht nur aus ei-

ner bestimmten Phase des Herzzyklus vorliegen, sondern in 20-25 verschiedenen Phasen Bilder gemessen werden, können anhand der zu einem Film zusammengestellten Bilder problemlos Be-

wegungsstörungen der Herzwände und Kontraktionsstörungen des Herzmuskels untersucht werden. Bewegungsstörungen werden z.B. bei einer Herzmuskelerkrankung (Kardiomyopathie) oder einem Bluthochdruck in der Lungenstrombahn beobachtet. Kontraktionsstörungen des Herzmuskels können Ausdruck einer Narbe des Muskels z.B. nach einem Herzinfarkt sein. Neben der rein visuellen Erfassung können solche Bewegungsstörungen auch semiquantitativ ausgewertet werden. Ein geänderter Bewegungsablauf findet sich z.B. bei bestimmten Herzfehlern.

Da Bilder aus verschiedenen Herzphasen, also bei verschiedenen Kontraktionszuständen des Herzmuskels, vorliegen, kann über volumetrische Verfahren die Änderung der Volumina der Herzhöhlen im Verlauf einer Herzaktion berechnet werden. Neben dem Volumen am

Ende der Austreibungsphase (end-systolisch) und am Ende der Füllungsphase (enddiastolisch) lassen sich das Schlagvolumen, die Auswurfraction, das Herzzeitvolumen und die Muskelmasse berechnen. Berechnet man die Volumina für beide Herzkammern, so kann aus der Differenz das Ausmaß von Kurzschlussverbindungen und Herzfehlern quantifiziert werden. Zur Berechnung der Volumina stehen zwei verschiedene Methoden zur Verfügung. Im Vierkammerblick kann das Volumen einer Herzkammer mittels der Methode nach ALEF (area length ejection fraction) geschätzt werden (Abb. 7).

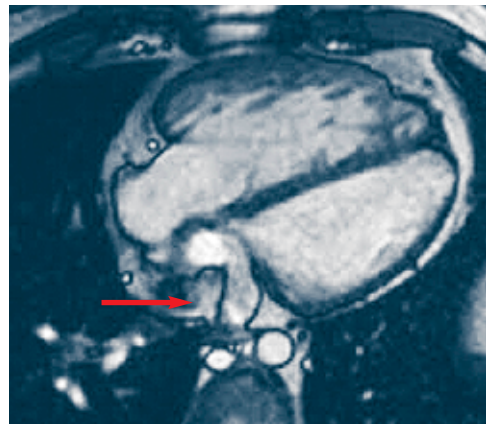
Voraussetzung für diese relativ einfach durchzuführende Methode ist allerdings eine ovale Form der Herzkammer. Für die nur selten oval geformte rechte Herzkammer ist diese Methode nur bedingt verwendbar. Genauer ist die Methode nach Simpson, bei der Schichten in der Kurze-Achse-Ebene benötigt werden. Beide Herzkammern müssen dafür lückenlos in dieser Ebene dargestellt werden (Abb. 8). Für das Einkreisen der Herzkammern werden automatische Segmentierungshilfen bereitgestellt, die allerdings die exakte Form der Herzkammern nur ungenau erfassen. Eine manuelle Korrektur der Markierungslinien ist in den meisten Fällen erforderlich. Dadurch wird diese Methode sehr arbeits- und zeitaufwendig, gestattet dafür aber eine sehr ge-

naue Bestimmung der Volumina beider Herzkammern. In den White blood Sequenzen wird die Flußrichtung des Blutes erkennbar. Sehr schnell fließendes Blut hat eine fehlende Signalintensität. Bei Betrachtung der Bilder als Film kann deshalb ein veränderter Blutfluß gesehen werden, wie er z.B. bei Herzklappenfehlern auftritt. Bei der Verengung einer Herzklappe kommt es zu einer Flußbeschleunigung im Bereich der Verengung mit Ausbildung eines Jets (sehr schnelle Blutflußgeschwindigkeit), der bis weit hinter die verengte Klappe zu beobachten ist. Bei einer Herzklappeninsuffizienz kommt es dagegen zu einem Rückfluß von Blut über die normalerweise verschlossene Herzklappe (Abb. 9).

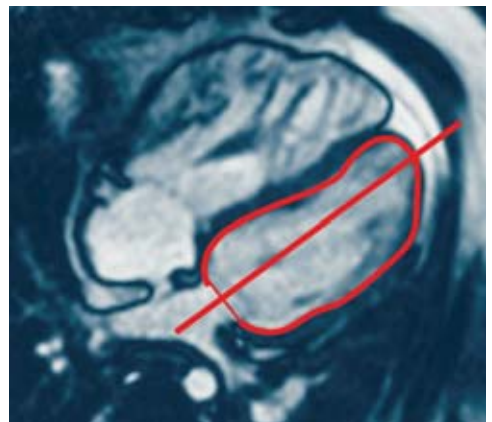
Kontraktionsstörungen des Herzmuskels nehmen unter Belastung zu und sind dann leichter erkennbar. Solche Belastungssituationen können im Stress-MRT simuliert werden. Hierbei spritzt man dem Patienten ein Medikament (Dobutamin), das das Herz

stärker schlagen lässt (Abb. 10).

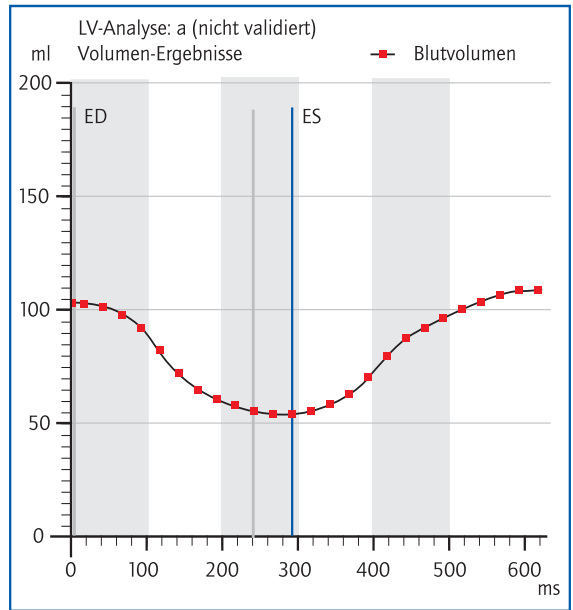
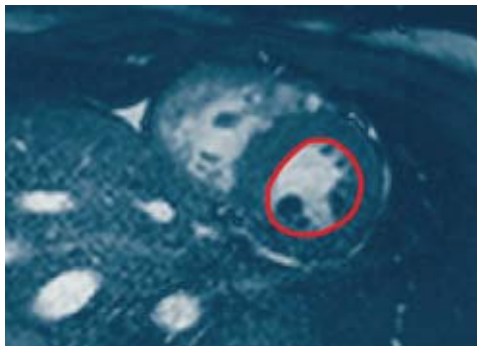
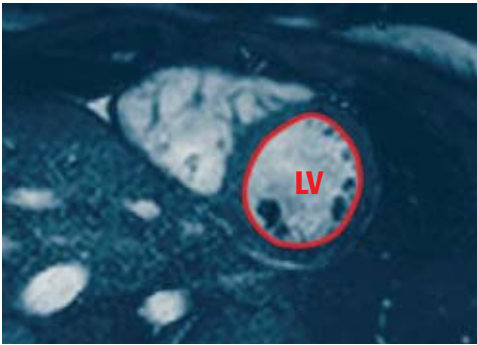
Eine andere Form des Stress-MRT ist die Verabreichung eines Medikamentes (Adenosin), das zu einer Erweiterung der Herzkranzgefäße führt. In geschädigten Gefäßabschnitten ist eine Weitstellung des Gefäßes nicht mehr oder nur eingeschränkt möglich, es kommt hier nach Kontrastmittelgabe in der Mu-



■ Abb. 6: Operativ veränderter linker Vorhof mit Einbringen einer Trennwand bei Fehlabgang der Hauptschlagader und der Lungenarterie



■ Abb. 7: Volumenbestimmung der linken Herzkammer (LV) nach ALEF



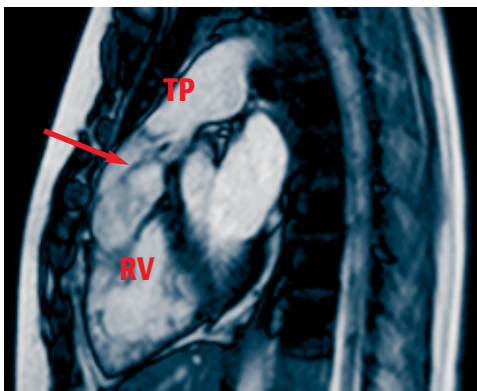
■ Abb. 8: Volumenmessung der linken Herzkammer (LV) nach Simpson, oben vor Beginn der Austreibungsphase, unten am Ende der Austreibungsphase

skulatur zu einer verminderten oder fehlenden Kontrastmittelanreicherung. Ein weiteres Verfahren zur Darstellung von Narben in der Herzmuskulatur ist das „late enhance-

ment“. Auch bei dieser Methode wird ein Kontrastmittel über eine Vene gespritzt, eine Stress-Situation ist allerdings nicht erforderlich. 15 Minuten nach der Kontrastmitteldosis findet sich in den Narben eine im Vergleich zur gesunden Herzmuskulatur vermehrte Anreicherung von Kontrastmittel, sie stellen sich in geeigneten Meßsequenzen signalintensiv dar. Das Verfahren ist allerdings nicht spezifisch für Narben bzw. Infarkte, auch z.B. Fibrosen

und Entzündungen des Herzmuskels zeigen eine Mehranreicherung von Kontrastmittel.

Mit speziellen dünn-schichtigen Meßsequenzen, die selektiv Kontrastmittel signalintensiv darstellen, werden Angiographien (Gefäßdarstellungen) durchgeführt. Das Einführen eines Katheters in eine Arterie oder Vene, wie bei der klassischen Angiographie, im Röntgen ist nicht mehr erforderlich. Es wird eine geringe Menge Kontrastmittel über eine Armvene injiziert. Mit einer sehr schnellen Planungssequenz wird der Kontrastmitteleinstrom in die Gefäße dargestellt. Erreicht das Kontrastmittel die zu untersuchenden Gefäße wird auf



■ Abb. 9: Insuffizienz der Pulmonalklappe zwischen Lungenarterie (TP) und rechter Herzkammer (RV) mit rückläufigem Jet in der Füllungsphase

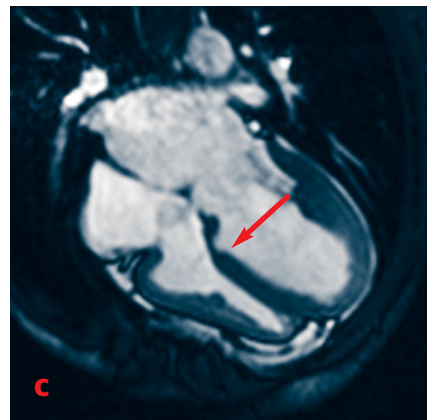
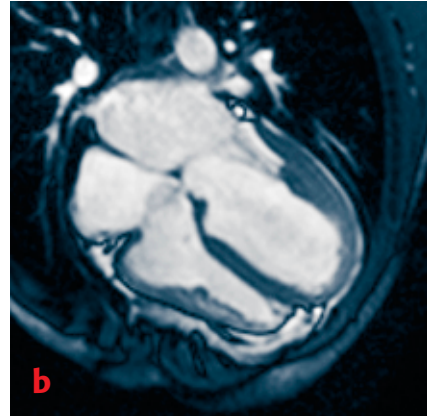
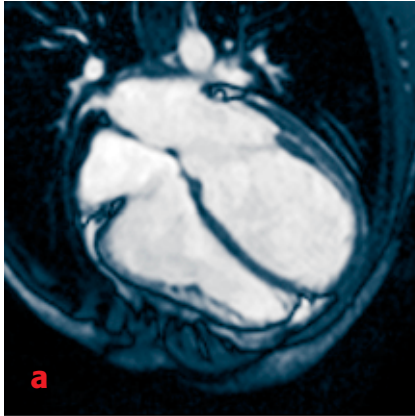
die eigentliche Meßsequenz umgeschaltet.

Die Dauer dieser Messung liegt bei 15-25 s. Nach Abschluss der Messung wird eine dreidimensionale Rekonstruktion angefertigt, bei der nur

signalintensive Strukturen berücksichtigt werden (sog. MIP = maximal intensity projection).

Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Darstellung des Gefäßsystems, das in Form eines Films um eine gewählte Achse gedreht werden kann. Dies erlaubt eine virtuelle Betrachtung der Gefäße von allen Seiten. Darüber können nicht nur der Gefäßverlauf, sondern auch Gefäßverengungen und Umgehungskreisläufe beurteilt werden.

Bei einem anderen Verfahren, bei dem die bereits weiter oben beschriebenen White blood Sequenzen zum Einsatz kommen, werden Phasenverschiebungen in dem zu untersuchenden Gefäß gemessen. Diese Phasenverschiebungen sind proportional zur Flußgeschwindigkeit. Wird solch eine Messung in einem senkrecht zur Gefäßachse liegenden Querschnitt über eine Herzaktion durchgeführt, kann daraus ein Flußprofil des Gefäßes errechnet werden. Dieses Flußprofil ermög-



licht eine quantitative Auswertung der Flußverhältnisse im Gefäß und gibt neben dem Vorwärtsfluß, dem Schlagvolumen, der mittleren und maximalen Flußgeschwindigkeit auch den Rückfluß bei einer Flußumkehr im Gefäß an. Darüber lassen sich z.B. die Flußveränderungen bei Herzklappenfehlern (Verengung oder Insuffizienz) und damit ihre Ausprägung beurteilen und quantifizieren.

Mit der Kernspintomographie des Herzens steht uns somit ein Verfahren zur Verfügung, das eine Beurteilung morphologischer und funktioneller Veränderungen am Herzen z.B. bei Kindern mit angeborenen Herzfehlern erlaubt. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten des Herz-MRT ist zu erwarten, dass es – gerade bei der Diagnostik von Kindern – andere Verfahren, insbesondere die invasive Herzkatheteruntersuchung, immer

weiter verdrängen wird.

■ Abb. 10: Vierkammerblick zu Beginn der Austreibungsphase ohne Belastung (a), am Ende der Austreibungsphase ohne Belastung (b) und unter Belastung (c). Bereich verminderter Kontraktilität in der Herzscheidewand

▶ Dr. med. Jörg Detlev Moritz
Klinik für Diagnostische Radiologie
Abt. Päd. Radiologie und Sonographie
Schwanenweg 20
D-24105 Kiel