

Klinische Indikationen für die kardiovaskuläre Magnet- resonanztomographie (CMR)

Positionspapier

Herausgegeben vom Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufrorschung e.V.

Bearbeitet im Auftrag der Kommission für Klinische Kardiologie

G. Ertl, D. Andresen, M. Böhm, M. Borggrefe,
 J. Brachmann, F. de Haan, A. Osterspey,
 S. Silber, H.J. Trappe
 außerdem G. Arnold, H.M. Hoffmeister,
 E. Fleck

Korrespondierender Autor:

Prof. Dr. Eckart Fleck, Deutsches Herzzentrum
 Berlin, Klinik für Innere Medizin – Kardiologie,
 Augustenburger Platz 1, 13353 Berlin,
 E-Mail: Fleck@DHZB.de

Präambel

Dieses *Positionspapier* ist eine Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufrorschung e.V. (DGK), die den gegenwärtigen Erkenntnisstand wiedergibt und allen Ärzten und ihren Patienten die Entscheidungsfindung erleichtern soll. Ein Positionspapier ersetzt nicht die ärztliche Evaluation des individuellen Patienten und die Anpassung der Diagnostik und Therapie an dessen spezifische Situation.

In Positionspapieren wird der Stellenwert eines diagnostischen und/oder therapeutischen Verfahrens beurteilt, und es werden Empfehlungen für die tägliche Praxis abgegeben. Es werden bisher publizierte, relevante Studien herangezogen, gelöste Fragen beantwortet und ungelöste aufgezeigt. Es wird eine Empfehlung abgegeben, für welche Patienten ein neu vorge-

stelltes diagnostisches und/oder therapeutisches Verfahren in Frage kommt.

Einleitung

Die kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie (CMR) hat sich in der klinischen Anwendung zur Diagnose und Therapieentscheidung kardiovaskulärer Krankheiten etabliert. Die hier dargestellten Empfehlungen beinhalten und erweitern den Konsensusbericht, der 2004 im *European Heart Journal* publiziert wurde [1], dort finden sich auch weitere relevante Literaturstellen. Die Empfehlungen der US-amerikanischen Fachgesellschaften bezüglich angemessener Kriterien für den adäquaten Einsatz der kardialen MRT und Computertomographie in der kardiovaskulären Diagnostik sind ebenfalls berücksichtigt [2].

Die hier dargestellten Positionen basieren auf Literatur und Expertenerfahrung. Finden sich in der Literatur ungenügend Daten zur ausreichenden Unterstützung einer Empfehlung, wird dies entsprechend angegeben oder auf eine Empfehlung verzichtet. Die diagnostische Indikationsliste mit ihrer Wertigkeit ist auf die Bereiche der Kardiologie beschränkt, bei denen Informationen bildgebender Verfahren von Interesse sind. Dabei wird die Verwendung der CMR anderen konkurrierenden bildgebenden Verfahren, insbesondere der Echokardiographie, gegenübergestellt. Wie bei allen bildgebenden Verfahren fehlen weitgehend randomisierte Studien und Metaanalysen, sodass die übliche AHA/ACC/ESC-Klassifizierung nicht angewendet werden kann. Die Be-

urteilung der Wertigkeit der CMR für die kardiovaskulären Fragestellungen erfolgte deshalb anhand folgender Kriterien:

1. Vorliegen einer robusten und reproduzierbaren CMR-Technik,
2. relevante klinische Ergebnisse in der wissenschaftlichen Literatur¹,
3. Konsensus der Autoren unter Berücksichtigung der Indikationswertung des American College of Cardiology Foundation und des American College of Radiology [2].

Aufgrund der verwendeten niedrigen Energie ist die Magnetresonanztomographie – bei Beachtung der Kontraindikationen – als sicher einzustufen. Derzeit ist die Untersuchung von Patienten mit Herzschrittmachern und ICDs als kontraindiziert zu betrachten. Lediglich in gut begründeten Ausnahmefällen kann unter Berücksichtigung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen eine Untersuchung erfolgen [3]. Eine genauere Beschreibung der Technik erfolgt in Anhang 1. Für nahezu alle Untersuchungen des Herzens verläuft die Untersuchung nach dem gleichen Schema:

Die Patienten werden mit EKG, Blutdruckmanschette und für eventuelle Kon-

¹ Von den Autoren wurde in enger Abstimmung mit der klinischen Kommission der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie ganz bewusst ein von anderen Klassifikationen abweichendes Modell gewählt. Hiermit soll die Einschätzung der Autoren bezüglich der diagnostischen Genauigkeit der Indikationen zum Ausdruck gebracht werden, die teilweise – aufgrund der raschen Entwicklung der Methode – noch nicht mit ausreichender Evidenz für eine übliche Klassifikation belegt sind. Eine ausführliche Liste der Literatur bis 2004 in [1].

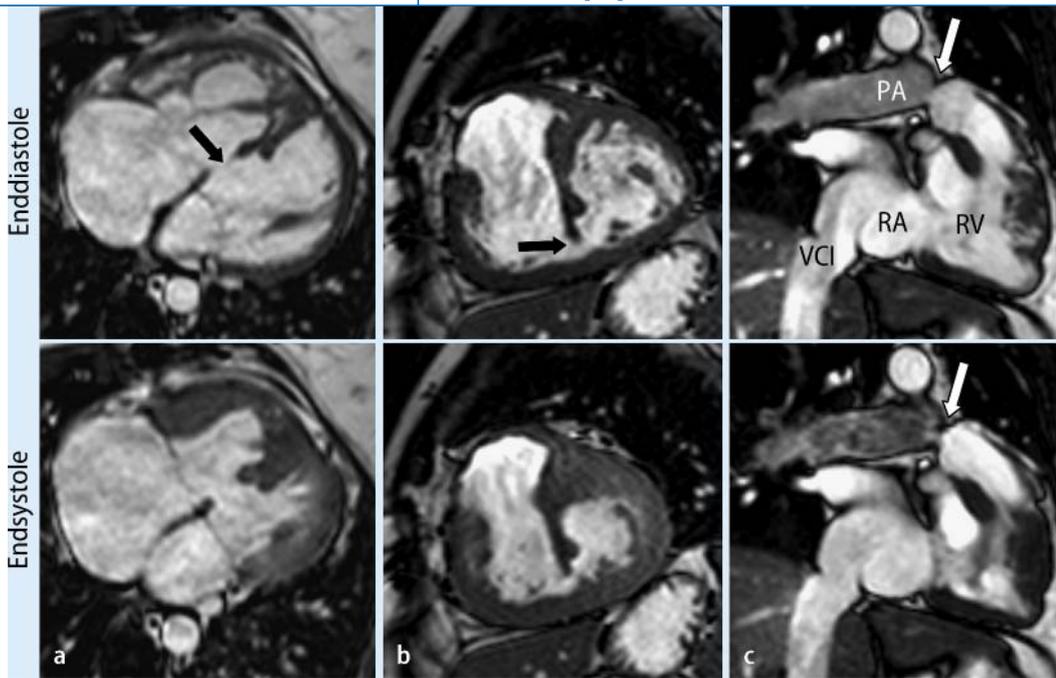


Abb.1 ◀ Cine MR-Bildgebung mit Darstellung eines Ventrikelseptumdefektes (schwarzer Pfeil) nach erfolgreichem operativem Pulmonalarterien-Banding (weißer Pfeil). Obere Reihe: Enddiastole, untere Reihe: Endsystole. **a** 4-Kammer-Blick. **b** Kurzachsenschnitt. **c** Rechtsventrikulärer 2-Kammerblick und rechtsventrikulärer Ausflusstrakt. PA, Pulmonalarterie; RV, rechter Ventrikel; RA, rechtes Atrium; VCI, Vena cava inferior

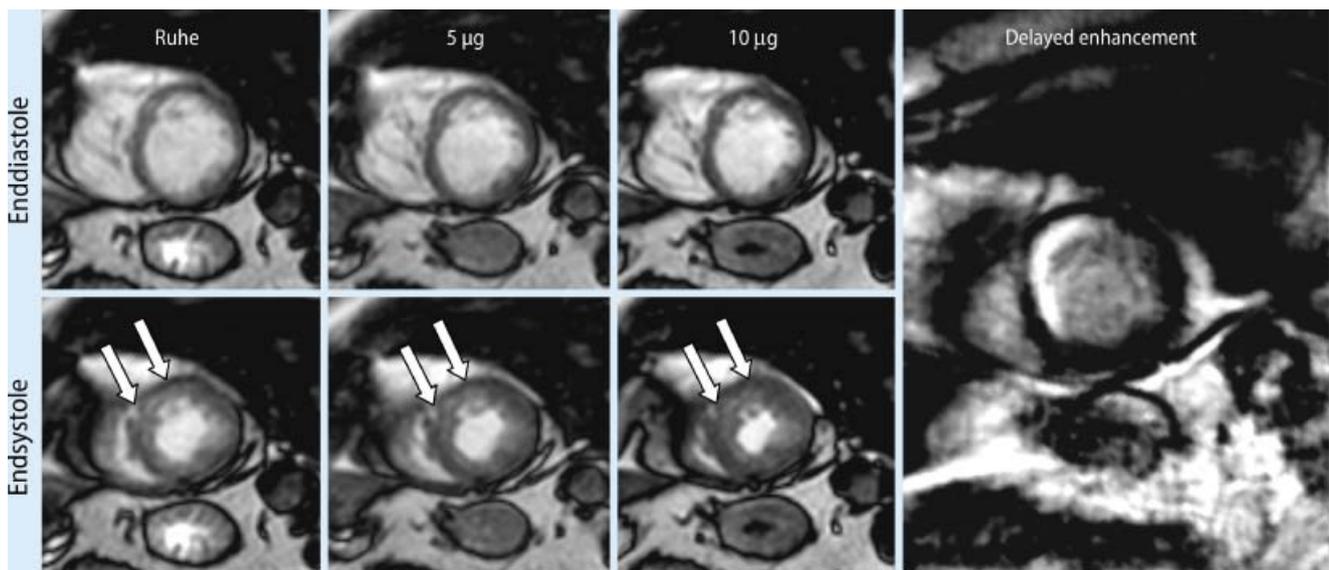


Abb.2 ▲ Dobutamin-Stress-MR-Untersuchung mit 5µg/kg/min und 10µg/kg/min Dobutamininfusion (obere Reihe: Enddiastole, untere Reihe: Endsystole) sowie Infarktnebenarrestung ("delayed enhancement"). In Ruhe Hypokinesie anterior und septal (weiße Pfeile). Die niedrigdosierte Dobutamin-Stress-MR-Untersuchung zeigt eine Zunahme der Kontraktion in diesen Segmenten und erlaubt somit den funktionellen Nachweis vitaler Myokardabschnitte (anterior und septal, weiße Pfeile). Morphologischer Nachweis einer subendokardialen Infarktnebenarrestung anterior und septal mit ca. 50%iger Transmuralität

trastmittelgaben bzw. Stressmedikamente mit 1–2 i.v.-Zugängen vorbereitet. Die Untersuchung findet in Rückenlage statt, meist werden spezifisch für den Untersuchungsbereich optimierte Spulen (=“Antennen“) verwendet. Da die meisten Messungen doppelt anguliert nach der Herzachse ausgerichtet werden, erfolgt zuerst eine Übersichtsmessung (Scout). Anhand dieser Daten werden Kurz- und Längsachsen geplant, die dann als Cine-Aufnahmen die Herzanatomie und -funktion

zeigen. Die weiteren Schritte sind von der Fragestellung abhängig.

Angeborene Herzerkrankungen (Kinderkardiologie)

(Siehe auch Anhang 3)

Generelle Aspekte

Die Beurteilung von Patienten mit angeborenen Herzfehlern ist eine der Stärken

der CMR, da komplette 3-dimensionale Datensätze mit anatomischen und funktionellen Inhalten akquiriert werden können (▣ Abb. 1). Insbesondere der rechte Ventrikel und komplexe anatomische Zusammenhänge können genauer als mit anderen Verfahren dargestellt und hämodynamische Auswirkungen durch Flussmessungen einschließlich des Flussvolumens erfasst werden. Zusätzlich ist insbesondere bei diesen Patienten das Fehlen von Röntgenstrahlen von großem Vorteil. Al-

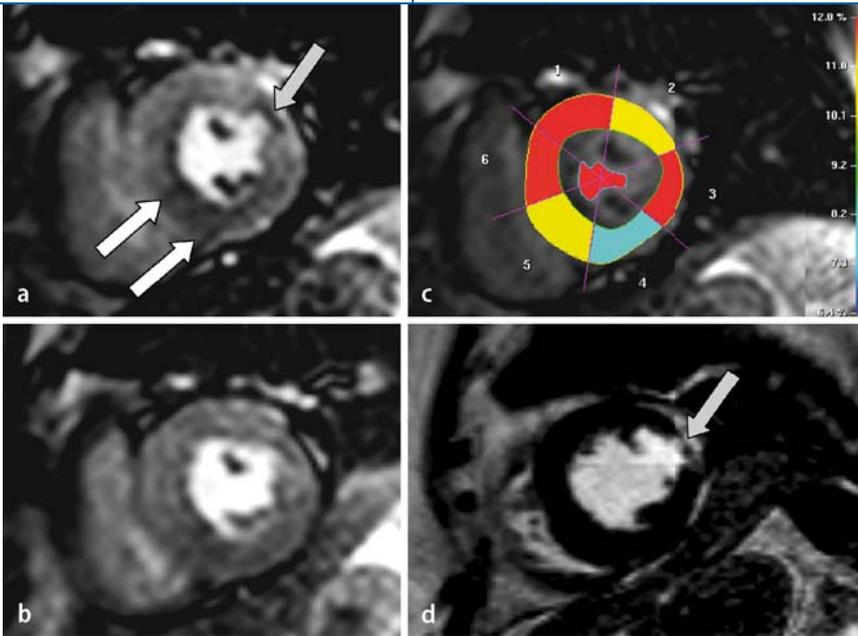


Abb. 3 ▲ Messung der myokardialen Perfusion mittels MR-Bildgebung der initialen Kontrastmittelpassage eines Gadolinium-Bolus. **a** Adenosin-Stress-MR (Kurzachsenschnitt). **b** Ruheuntersuchung (identischer Kurzachsenschnitt). **c** Farbkodierte Darstellung der Signalintensitätsverstärkung während der Adenosin-Stress-MR. **d** Delayed-enhancement-Bildgebung. Induzierbares Perfusionsdefizit inferior und inferoseptal (weiße Pfeile) sowie fixiertes Perfusionsdefizit anterolateral (grauer Pfeil). Mittels delayed enhancement erfolgt der Nachweis eines myokardialen Infarktes anterolateral (grauer Pfeil)

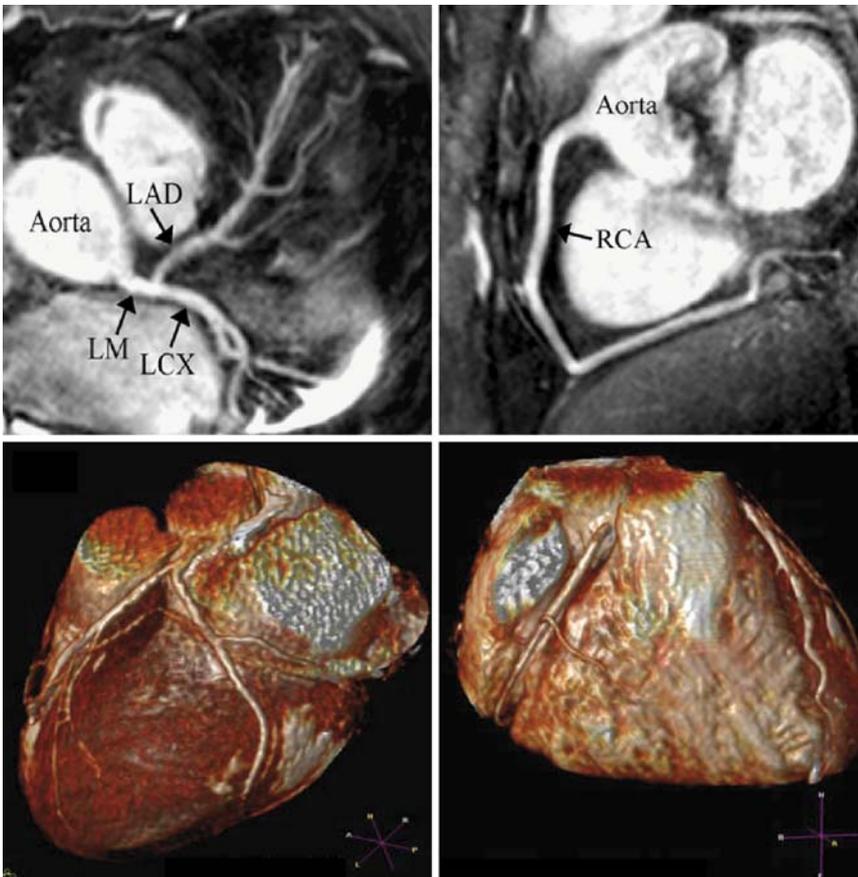


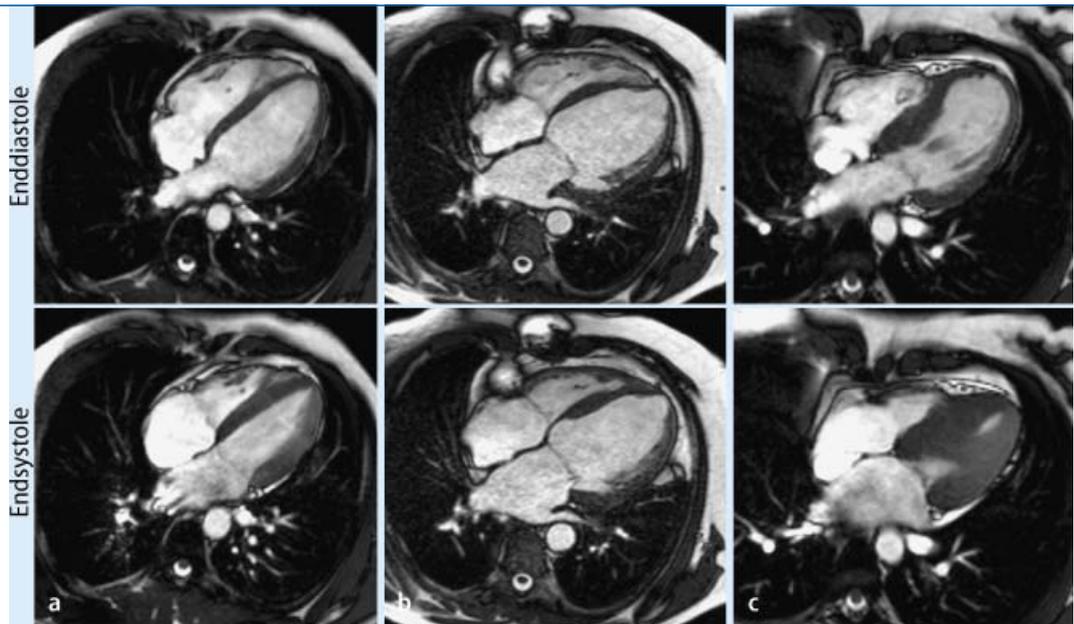
Abb. 4 ▲ Darstellung des koronararteriellen Gefäßbaumes mit der MR-Angiographie. Multiplanare Reformatierung eines 3-dimensionalen Datensatzes einer MR-Koronarangiographie (LAD, left anterior descending artery; RCA, right coronary artery; LCX, left circumflex artery). 3-dimensionale Rekonstruktion der MR-Koronarangiographie

lerdings muss die Indikationsstellung vom Alter und Zustand des Patienten abhängig gemacht werden, da kleine Kinder sediert werden müssen und teilweise eine im MR-Umfeld schwierigere hämodynamische Überwachung notwendig ist. Deshalb wird die CMR bei diesen Patienten üblicherweise erst nach einer transthorakalen Echokardiographie durchgeführt. Bei älteren Kindern, Jugendlichen oder Erwachsenen wird die CMR neben der transthorakalen Echokardiographie als Methode erster Wahl eingesetzt, insbesondere, wenn die Veränderungen komplex oder die Patienten bereits voroperiert sind und damit die Ableitbedingungen für die Ultraschalluntersuchung aufgrund von Veränderungen der Herzlage, Narbenbildung oder Lungenüberlagerung erschwert sind. Die Notwendigkeit und Dauer einer Herzkatheteruntersuchung kann durch die vorherige Untersuchung mit der CMR reduziert, ihre Aussage präzisiert und die Diagnostik meist mit einer Intervention verbunden werden; in einigen Zentren können beide Untersuchungen durch spezielle Geräte (XMR) kombiniert durchgeführt werden. In diesem Positionspapier werden die angeborenen Herzfehler nur cursorisch dargestellt, da ein Großteil der Indikationen bereits in früheren Empfehlungen für die Anwendung der kardiovaskulären Magnetresonanztomographie beschrieben wurden [1]. Lediglich auf fehlverlaufende Koronararterien wird genauer eingegangen, da sich hier die technischen Möglichkeiten der CMR deutlich entwickelt haben.

Eine Basisuntersuchung besteht aus folgenden Schritten:

1. Anatomische Bilder in transversalen und mindestens einer zusätzlichen orthogonalen Ebene (je nach Fall sagittal oder koronal). Bei Vorliegen einer thorakalen Aortenerkrankung werden zusätzlich angulierte Schnitte dargestellt. Üblicherweise werden Schwarz- oder Weißblut-Aufnahmen mittels Turbo-Spin-Echo- oder Gradienten-Echo-Sequenzen erstellt.
2. Funktionelle Information mit Turbo-Gradienten-Echo- oder SSFP-Sequenzen (SSFP="steady state free precession") in angrenzenden Kurzachsenschichten zur Messung der Funkti-

Abb. 5 ▶ Cine-MR-Aufnahmen in der 4-Kammer-Blick-Geometrie. **a** Normalbefund. **b** Dilatative Kardiomyopathie mit deutlich eingeschränkter systolischer linksventrikulärer Funktion bei globaler Hypokinesie. Linkes und rechtes Atrium sind vergrößert. **c** Hypertrophe obstruktive Kardiomyopathie mit asymmetrischer Septumhypertrophie (Septumdicke 21 mm)



- on, des Volumens und der Masse von Ventrikeln und Vorhöfen.
- Bei klinischer Indikation (z. B. Shunt- und Klappenvitien) werden Messungen von Geschwindigkeiten, Flussvolumen und Regurgitationsfraktion in den großen Gefäßen/Conduits und im Herzen durchgeführt.
 - Bei speziellen Indikationen kann die Gadolinium-gestützte MR-Angiographie zur 3D-Darstellung der thorakalen Aorta, Pulmonalarterien und Venen zum Einsatz kommen. Dies ist insbesondere vorteilhaft bei komplexen kardiovaskulären Anatomien.

Bei einigen Erkrankungen besteht die Indikation, die myokardiale Perfusion und Vitalität mit Hilfe von MR-first-pass-Perfusionssequenzen bzw. Inversionstechniken zu bestimmen. Hierdurch können strahlenbelastende nuklearmedizinische Untersuchungen vermieden werden.

Angeborene Herzerkrankungen bei Erwachsenen

CMR und Echokardiographie ergänzen sich bei der Untersuchung von angeborenen Herzerkrankungen bei Erwachsenen. Bei der transthorakalen Echokardiographie sind insbesondere das eingeschränkte Schallfenster und die teilweise unzureichende Bildqualität durch schlechte Ableitbedingungen problematisch. Im Vergleich zur Echokardiographie ist die CMR

tendenziell besser zur morphologischen Darstellung der Aorta und Pulmonalarterien sowie zur Quantifizierung der rechtsventrikulären Funktion und des Blutflusses geeignet. Zusätzlich ist die CMR immer indiziert, wenn das Ergebnis einer echokardiographischen Untersuchung nicht ausreichend aussagekräftig ist.

Veränderungen der Koronararterien

Bei der Detektion und Quantifizierung des Ausmaßes angeborener oder entzündlicher Veränderungen der Koronararterien wie beim Bland-White-Garland-Syndrom oder beim Kawasaki-Syndrom ist die Magnetresonanztomographie Methode erster Wahl. [1]. Vergleichbare Aussagen lassen sich auch mit der MSCT erreichen, wobei die Notwendigkeit der Kontrastmittelapplikation und Strahlendosis abgewogen werden muss. Sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern können angeborene Veränderungen der proximalen Koronararterien ohne Kontrastmittelgabe zuverlässig dargestellt werden. Solche Koronarabnormalitäten treten bei Patienten mit sonst normaler Herzanatomie in ca. 1% auf, bei Patienten mit angeborenen Herzfehlern mit einer Prävalenz von 30% und bei der Fallot-Tetralogie noch häufiger. Da sich die technischen Möglichkeiten der CMR deutlich weiterentwickelt haben, kann die räumliche Beziehung der Koronargefäße relativ zur Aorta

und den Pulmonalarterien auch bei kleinen Kindern exakt dargestellt werden.

Erworbene Erkrankungen der Gefäße

(Siehe auch Anhang 3)

Auch bei erworbenen Erkrankungen der Gefäße hat sich die CMR für viele Fragestellungen in der klinischen Routine etabliert. Im Vordergrund steht hierbei die Möglichkeit, die Gefäßlumina nach Gabe von intravenösen Gadoliniumpräparaten dreidimensional darzustellen (MRA). Zusätzlich zur MRA kann die vasculäre Bildgebung mit einer Vielzahl von Weichteilgewebekontrasten (Protonendichte, T₁, T₂, Fettsättigung) ergänzt werden, um Veränderungen der Gefäßwände wie Hämatoome, Thromben, Entzündungen oder atherosklerotische Plaques zu erfassen. Neben der reinen morphologischen Darstellung der Blutgefäße können Geschwindigkeitsmessungen zur Bestimmung der Blutflussgeschwindigkeit und des Blutflussvolumens durchgeführt werden. Vorteil gegenüber der Echokardiographie (auch transösophageal) ist die Abbildung des gesamten Verlaufs der Gefäße einschließlich des Aortenbogens und der abdominalen Aorta. Gegenüber dem CT ist neben der Strahlenfreiheit die Kombination mit Flussmessungen zu erwähnen. Nachteilig sind der etwas längere Untersuchungsverlauf im Vergleich zum CT, die geringere Flexibilität im Vergleich

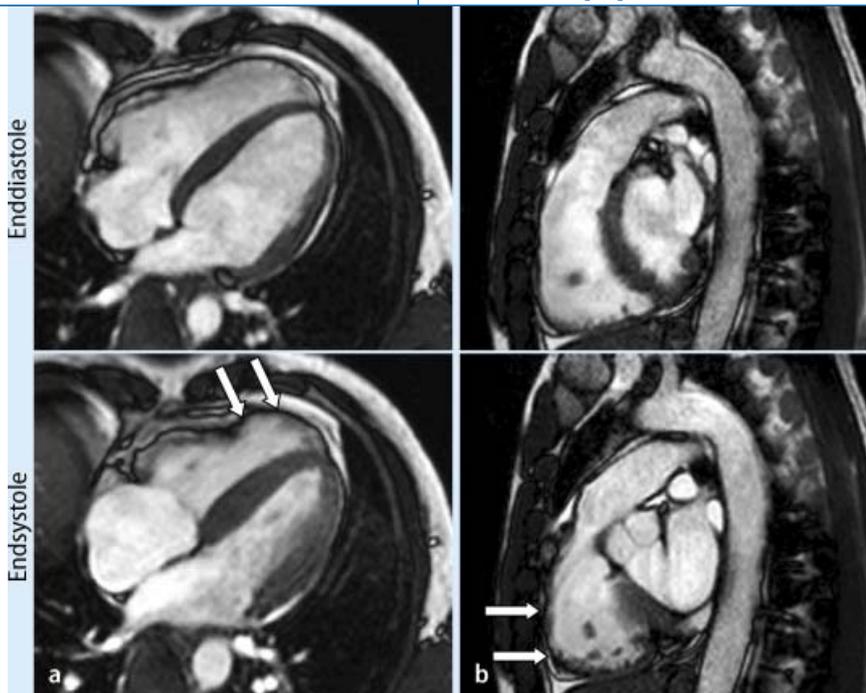


Abb. 6 ▲ Arrhythmogene rechtsventrikuläre Dysplasie. Bislang kardial beschwerdefreier 33-jähriger Patient mit erstmalig dokumentierter ventrikulärer Tachykardie; Bruder im Alter von 24 Jahren plötzlich verstorben. **a** Cine-MR-Aufnahmen (4-Kammer-Blick, oben Enddiastole, unten Endsystole) mit regionaler Ausdünnung und Dyskinesie der rechtsventrikulären freien Wand ("bulging"). **b** Cine-MR-Aufnahmen (rechtsventrikulärer Ausflusstrakt, oben Enddiastole, unten Endsystole) mit regionaler Wandausdünnung des rechten Ventrikels und Dyskinesie

zum Echo (z. B. intraoperatives Echo) und die schwierige Überwachung der Patienten.

Aorta

Mit der CMR werden die Größe, Ausdehnung und Form von thorakalen oder abdominalen Aneurysmata exakt erfasst. Auch bei gewundenen Segmenten wird mittels multiplanarer oder dreidimensionaler Bildgebung der Querdurchmesser exakt bestimmt und die Beziehung des Aneurysmas zu Gefäßabgängen dargestellt. Üblicherweise werden sowohl Bilder in Weißbluttechnik (kontrastverstärkt oder SSFP) als auch Schwarzbluttechnik angefertigt, um eine Aortenpathologie zu klassifizieren. Das perfundierte Lumen lässt sich sicher von intraluminalen Thromben abgrenzen. Die Anwendung von Kontrastmittel lohnt sich insbesondere bei der Beurteilung kleinerer Gefäße (Verschlüsse, Aneurysmata) und sehr langsamem Fluss im Rahmen eines ausgeprägten Aneurysmas. Durch T1-gewichtete Aufnahmen nach Gadoliniumgabe – speziell in Kombination mit Fett-

sättigung – können auch Bereiche periaortaler Entzündungen identifiziert werden. Die größte Einschränkung der CMR bei der Beurteilung der Aorta liegt darin, dass Kalk nicht dargestellt werden kann.

Die Diagnostik der Aortendissektionen ist eine gut etablierte Indikation für die CMR, die es erlaubt, die Lokalisation des Intimaeinrisses („Entry“), Ausdehnung des Aneurysmas (Stanford-Typ), Seitenastbeteiligung und die Dissektionsklasse (Klasse 1–5) zuverlässig zu erfassen. Zur Darstellung des Intimarrisses und der Ausdehnung wird der 3D-Datensatz axial zum Gefäß reformatiert. Die Aortenwand wird in Schwarzbluttechnik untersucht. Eine eventuelle Aortenklappeninsuffizienz wird durch eine Kombination mit einer Cine-Gradienten-Echo-Darstellung der Klappe und des Ausflusstrakts mit entsprechender Flusskodierung erfasst und quantifiziert. Perikardergüsse sind meist schon in den Übersichtsaufnahmen zu sehen und können quantifiziert werden. Im Vergleich zur transthorakalen Echokardiographie kann mit der CMR die Aorta vollständig dargestellt werden.

Zunehmend werden auch Patienten mit akuten Dissektionen untersucht, da sowohl die Überwachungsmöglichkeiten als auch die Messgeschwindigkeit in den letzten Jahren deutlich zugenommen haben. Damit ist die CMR prinzipiell zum CT konkurrenzfähig. Zeichen, die auf eine Notfallsituation hinweisen (Perikarderguss, Pleuraerguss), werden schon während der ersten Minuten der Untersuchung erkannt.

Schwierigkeiten können bei der Abgrenzung eines intraluminalen Thrombus von einer thrombosierte, nicht kommunizierende Klasse-1-Dissektion oder einem intramuralen Hämatom entstehen. Hier fehlt die beim CT oder der Echokardiographie genutzte Möglichkeit zur Lokalisation des endothelialen Kalks.

Mit der Spin-Echo-Bildgebung mit T1-Wichtung bilden sich sowohl in akuten als auch subakuten Phasen einer Dissektion die Abbauprodukte des Hämoglobins (Methämoglobin) als helles Signal innerhalb der Aortenwand ab. Durch die Verwendung von Fettsättigung wird ein Hämatom innerhalb der Aortenwand vom umgebenden mediastinalen Fett unterschieden. Auch Ulzerationen der Aortenwand, meist bei ausgeprägter Atherosklerose und Aortenektasie im hohen Alter, können zu fokalen intramuralen Blutungen führen und von der CMR erfasst werden.

Pulmonalarterien und -venen

Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung sowie der einfacheren Patientenüberwachung bleibt die CT in den meisten Zentren die Methode der Wahl zur Darstellung akuter Lungenarterienembolien. Die CMR kann jedoch bei Patienten mit Kontraindikationen gegen Röntgenkontrastmittel eine Alternativmethode sein. Dabei stellt die Unterdrückung von Atemartefakten die größte Schwierigkeit dar. Durch die Anwendung der Navigatortechnik kann auf Atemstopps verzichtet werden. Seltener Erkrankungen wie Pulmonalarterienaneurysmata und -dissektionen lassen sich mit der CMR gut darstellen.

Die gleiche Technik wird zur Darstellung der Pulmonalvenenanatomie genutzt. Dies spielt besonders bei der Planung und

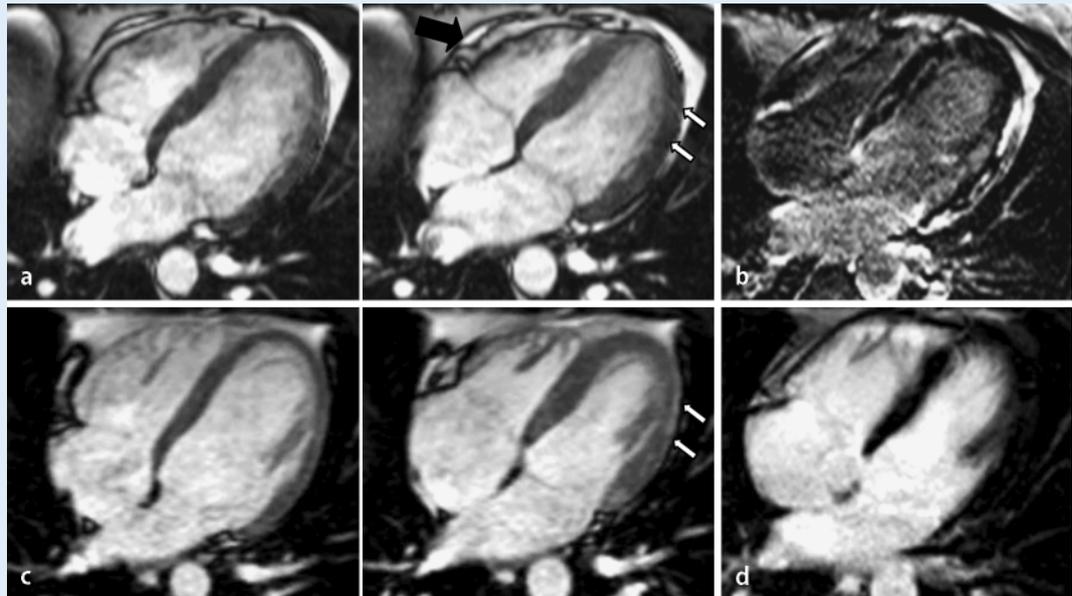


Abb. 7 ▲ Cine-MR und Delayed-enhancement-Bildgebung bei akuter (Peri)-Myokarditis. 27-jähriger Patient mit subfebrilen Temperaturen und Abgeschlagenheit seit einer Woche, erhöhter Blutsenkung und Leukozytose, Creatinkinase 650 U/l, Troponin T 2.6 µg/l. Akutsituation (*obere Bildreihe*): Global eingeschränkte linksventrikuläre Funktion und Akinesie inferolateral (*weiße Pfeile*, 4-Kammer-Blick während Enddiastole (links) und Endsystole (rechts)). Kleiner Perikarderguss (*grauer Pfeil*). Linksventrikuläres enddiastolisches/endsystolisches Volumen 187/125 ml, Ejektionsfraktion 33%. Delayed enhancement (4-Kammer-Blick): Deutliche Signalanhebung intramyokardial, insulärer Areale des linksventrikulären Myokards, teilweise vom Subepikardium ausgehend. Kontrolluntersuchung nach 3 Monaten (*untere Bildreihe*): Deutliche Verbesserung der globalen und regionalen linksventrikulären Funktion; es besteht eine Hypokinesie der Inferolateralwand (*weiße Pfeile*, 4-Kammerblick während Enddiastole (links) und Endsystole (rechts)). Linksventrikuläres enddiastolisches/endsystolisches Volumen 182/87 ml, Ejektionsfraktion 52%. Delayed enhancement (4-Kammer-Blick): Kein Nachweis regionaler Signalintensitätsunterschiede des linksventrikulären Myokards

Kontrolle elektrophysiologischer Fragestellungen (Vorhofflimmern) eine zunehmende Rolle [4].

Periphere Gefäße

Die Magnetresonanztomographie hat sich zur Darstellung der Gefäße etabliert und ist als Methode der Wahl zu betrachten. Eine genaue Beschreibung der Indikationen und anzuwendenden Techniken findet sich in der Literatur [5, 6]. Dabei eignet sich die MR-Schwarzbluttechnik besonders gut zur Darstellung der Gefäßwand und möglicher Wandveränderungen.

Messung der ventrikulären Funktion und Masse

(Siehe auch Anhang 3)

Die CMR ist durch ihre hohe Reproduzierbarkeit die beste Methode zur Beurteilung der LV-Masse, LV- und RV-Volumina und erlaubt damit sowohl individuell eine genauere Diagnose als auch die Durch-

führung von Verlaufskontrollen. Auf geometrische Modelle wird verzichtet. Hierzu existiert umfangreiche Literatur auch im Vergleich zu anderen Methoden [7].

Im klinischen Alltag wird die regionale Funktion des linken und rechten Ventrikels oft nur visuell anhand von zeitlich hochaufgelösten Turbo-Gradienten-Echo- oder SSFP-Cine-Aufnahmen bestimmt und in Normo-, Hypo-, A- und Dyskinesie eingeteilt. Eine quantitative Erfassung der Ejektionsfraktion, sowie der regionalen Wandbewegung und Wanddickenzunahme ist sowohl für den linken als auch für den rechten Ventrikel möglich.

Koronare Herzerkrankung

(Siehe auch Anhang 3)

Bei Patienten mit bekannter oder vermuteter koronarer Herzerkrankung (KHE) können mit der Magnetresonanztomographie gegenüber herkömmlichen Verfahren (EKG, Belastungs-EKG, Echo-

kardiographie, Stress-Echo, nuklearmedizinische Verfahren) zusätzliche Informationen gewonnen werden. Dies spiegelt sich auch in aktuellen nationalen Leitlinien wider (http://www.versorgungsleitlinien.de/themen/khk/pdf/nvl_khk_lang.pdf).

Patienten mit vermuteter koronarer Herzerkrankung können mit verschiedenen Strategien untersucht werden. Dabei wird entweder eine Ischämie induziert und die Auswirkungen werden erfasst (Wandbewegung, Perfusion) oder die Koronararterien werden direkt dargestellt (in klinischer Erprobung) bzw. deren Funktion wird bestimmt (Koronarangiographie und Fluss; in klinischer Erprobung) (■ **Abb. 2, 3**). Die Indikation der CMR ist von verschiedenen klinischen Szenarien und Vortestwahrscheinlichkeiten abhängig [2]. Die Untersuchung von Patienten mit Koronarstents ist mit 1,5 Tesla sofort nach Implantation als sicher einzustufen.

Wandbewegungsanalyse unter Belastung

Da körperliche Aktivität innerhalb des Magneten zu einer Verschlechterung der Bildqualität durch Bewegungsartefakte führt, werden für Belastungsuntersuchungen mit der CMR üblicherweise pharmakologische Stressoren eingesetzt. Dabei wird zur Induktion von Wandbewegungsstörungen meist Dobutamin eingesetzt, das sowohl gegenüber dem Dipyridamol als auch dem Adenosin [8] überlegen ist. Die Messungen finden nach einem standardisierten Schema entsprechend der Dobutamin-Stress-Echokardiographie statt, bei jeder Belastungsstufe werden in kurzen Atemstopps 3 Längs- und 3 Kurzachsen mittels Turbo-Gradienten-Echo- oder SSFP-Cine-Aufnahmen abgebildet und die regionale Wandbewegung des linken Ventrikels vor und während Dobutamin-Stress visuell beurteilt (■ **Abb. 2**). Die Methode ist zum Nachweis von ischämisch bedingten Wandbewegungsstörungen und dem daraus folgenden Rückschluss auf eine relevante koronare Herzerkrankung gut etabliert und in mehreren monozentrischen Studien als auch einer multizentrischen Datenanalyse [9] für verschiedene Patientenkollektive untersucht. Die diagnostische Genauigkeit liegt unabhängig vom untersuchten Patientenkollektiv bei ca. 85% im Vergleich zur invasiven Angiographie. Im direkten Vergleich mit der Dobutamin-Stress-Echokardiographie wurde mit der Dobutamin-Stress-MR eine signifikant höhere diagnostische Genauigkeit erreicht. Dobutamin-Stress-MR hat insbesondere bei Patienten mit echokardiographisch eingeschränkter Bildqualität Vorteile, da nahezu immer eine gute oder sehr gute Bildqualität erreicht wird. Erste Studien über den prognostischen Wert der Dobutamin-Stress-MR zeigen eine niedrige Ereignisrate bei Patienten mit negativer Untersuchung und ein signifikant höheres Risiko bei Vorliegen einer Ischämie [10]. Die Dobutamin-Stress-MR kann zur präoperativen Risikostratifizierung eingesetzt werden.

Ein möglicher Nachteil der Dobutamin-Stress-MR im Vergleich zur Dobutamin-Stress-Echokardiographie besteht darin, dass während der MR-Untersuchung ST-Strecken-Veränderungen im

EKG nicht beurteilt werden können. Die Überwachung erfolgt mittels EKG-Rhythmusstreifen, Blutdruck und Pulsoxymetrie. Zusätzlich werden die MR-Bilder sofort nach Datenakquisition auf Wandbewegungsstörungen überprüft. Die Sicherheit der Dobutamin-Stress-MR entspricht den aus der Dobutamin-Stress-Echokardiographie bekannten Werten [11].

Myokardperfusion

Die MR-Perfusionsbildgebung erlaubt heute dank schneller und starker Gradientensysteme eine umfassende Abdeckung des linken Ventrikels durch Abbildung mehrerer Schichten in benachbarten Kurzachsen oder einer Kombination von Kurz- und Längsachsen. Üblicherweise wird mit einem Hochdruckinjektor ein Bolus eines gadoliniumhaltigen Kontrastmittels (Dosis meist zwischen 0,03 bis zu 0,1 mmol/kg Körpergewicht) intravenös mit einer Injektionsrate von 3–7 ml/s über eine antekubitale Vene infundiert und mit NaCl nachgespült. Dabei sollte während der ersten Kreislaufpassage des Kontrastmittelbolus pro Herzschlag jede Schnittebene 1-mal abgebildet werden und der Patient während der Kontrastmittelanflutung im Myokard die Luft anhalten. In den meisten Zentren wird entweder die Perfusion nur unter Stressbedingungen mit Adenosinstimulation (140 µg/kg Körpergewicht/min für 3–6 min) gemessen, oder es wird zunächst eine Stressaufnahme unter Adenosinstimulation und ca. 15 min später eine Ruheaufnahme durchgeführt. Beide Methoden werden – zumindest bei visuell auffälligem Befund – durch eine Narbendarstellung mit „late enhancement“ ergänzt (■ **Abb. 3**). Um die Zahl falsch pathologischer Perfusionsuntersuchungen, die durch Ringartefakte in der Belastungsuntersuchung entstehen können, zu minimieren, sollte eine Ruheperfusionuntersuchung durchgeführt werden, wenn die Belastungsuntersuchung nicht völlig normal ist. Wenn auch in der Ruhe ein Ringartefakt zu sehen ist, sollte die Untersuchung als unauffällig gewertet werden [12].

Anschließend wird die Menge und Geschwindigkeit der Kontrastmittelanflutung durch das Myokard entweder visuell, semiquantitativ oder quantitativ ana-

lysiert. Bei der visuellen Analyse werden dunkle, signalarme Areale als hypoperfundiert von sich mehr oder früher anfärbenden (normal perfundierten) Bereichen abgegrenzt. Bei der semiquantitativen Messung wird die Anstiegsgeschwindigkeit oder maximale Signalintensität des Myokardsignals computergestützt bestimmt. Leichte Atemverschiebungen können korrigiert werden, Bilder mit stärkeren Atembewegungen werden von der Analyse ausgeschlossen. Zur vollständigen Quantifizierung muss die myokardiale Signalintensitätskurve für die Kreislaufgeschwindigkeit des Kontrastmittelbolus korrigiert werden, dies geschieht durch Messung der Signalintensitätskurve des Kontrastmittels im linken Ventrikel und anschließender Normierung oder Entfaltung. Damit können regionale Werte für den Perfusionsindex und die myokardiale Perfusionsreserve erhalten werden, die exakten Methoden zur Berechnung dieser Parameter finden sich in der Literatur.

In klinischen Studien zur Erkennung einer koronaren Herzerkrankung sind die Ergebnisse der MR-Perfusion im Vergleich zur invasiven Koronarangiographie, zur PET und zur SPECT sehr gut. Erste Multicenterstudien zur Dosisfindung zeigen eine gute Sensitivität der MR-Perfusion mit allerdings etwas eingeschränkter Spezifität bei verblindeter Auswertung [13, 14]. Auch im multizentrischen Vergleich ist die MR-Perfusion der SPECT überlegen [15]. Der Hauptvorteil der CMR liegt in der höheren räumlichen Auflösung (besser als 3×3 mm) im Vergleich zur SPECT (ca. 10×10 mm).

Koronarangiographie

Während die MR-Angiographie (MRA) in der klinischen Routine für die Beurteilung von Arterien und Venen des gesamten Körpers genutzt wird, ist die MR-Koronarangiographie (MRCA) wegen des geringen Gefäßdiameters sowie der gewundenen und komplexen 3D-Anatomie der Koronararterien und durch die kontinuierliche Herz- und Atembewegung technisch deutlich anspruchsvoller (■ **Abb. 4**). Im direkten Vergleich zum Mehrzeilen-CT können mit der MRCA derzeit weniger Koronarsegmente dargestellt werden, und

die diagnostische Genauigkeit ist geringer. Aus diesem Grund kann derzeit lediglich die Darstellung der proximalen Gefäße zur Erfassung möglicher Fehlverläufe und die Darstellung von Koronaraneurysmata mit der MRCA empfohlen werden.

CMR bei Patienten mit chronischem Myokardinfarkt

Chronische Myokardinfarkte können mit hoher Genauigkeit und Sensitivität durch kontrastmittelverstärkte Spätaufnahmen („late enhancement“) dargestellt werden. Zehn bis 20 min nach intravenöser Gabe von 0,1–0,2 mmol/kg Körpergewicht eines extrazellulären gadoliniumhaltigen Kontrastmittels wird die Bildgebung mit einer Inversion-Recovery-Sequenz durchgeführt. Die Inversionszeit wird dabei so gewählt, dass das Myokardsignal „genullt“ wird und ein gleichmäßiges dunkles Signal resultiert. Die in der klinischen Routine verwendeten extrazellulären Kontrastmittel verteilen sich rasch in den Kapillaren und interstitiell, jedoch nicht intrazellulär. In normalem Myokard ist das Verteilungsvolumen klein, da die gleichmäßig, dicht nebeneinander liegenden Myozyten den meisten Raum einnehmen. Nach einem Myokardinfarkt ist im Bereich des irreversibel geschädigten Myokards der extrazelluläre Bereich durch Zelluntergang und anschließende Narbenbildung vergrößert. Dies führt zu einer höheren Gadoliniumkonzentration und somit zu einem helleren Signal in den kontrastmittelverstärkten Spätaufnahmen. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der CMR ist es erstmals möglich, die transmurale Ausdehnung eines Infarktes zu bestimmen. Die Technik wurde in Tiermodellen validiert und hat andere CMR-Techniken zur Infarktdarstellung abgelöst. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und des sehr guten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses können mit „late enhancement“ auch sehr kleine subendokardiale Infarkte dargestellt werden. Dabei ist die CMR der SPECT überlegen [16]. Die Technik kann auch zur Vitalitätsbeurteilung und damit zur Vorhersage einer Funktionsverbesserung nach Revaskularisierung genutzt werden. Wenn das transmurale Ausmaß des Infarktes <50% beträgt, ist die Wahrscheinlichkeit einer funktionellen Erholung nach einem aku-

ten Myokardinfarkt durch eine Revaskularisierung hoch [17]. Möglicherweise kann die ergänzende Nutzung von niedrig dosiertem Dobutamin zur Visualisierung der Funktionsreserve das Ausmaß der Funktionsverbesserung nach Revaskularisierung noch besser vorhersagen.

Die CMR erlaubt auch die sensitive Erkennung linksventrikulärer Thromben [18], die echokardiographisch schwierig zu beurteilen sein können.

CMR bei Patienten mit akuten Koronarerkrankungen

Bisher liegen nur wenige Daten über die Anwendung der CMR bei Patienten mit akutem Brustschmerz vor [19, 20]. In diesen Studien erreichte die CMR bei der Identifizierung von Patienten mit einer koronaren Herzerkrankung eine Sensitivität und Spezifität von 84 und 85%. Die multivariate Datenanalyse inklusive klinischer Standardtests (EKG, Troponin, „TIMI risk score“) zeigte, dass CMR die stärkste Vorhersagekraft für das Vorliegen einer koronaren Herzerkrankung hat und auch bei Vorliegen der üblichen klinischen Parameter eine zusätzliche unabhängige Aussage ergab. Dies galt auch für Patienten mit Troponin-negativer instabiler Angina Pectoris.

Neben Myokardnekrosen kann mit der CMR das „No-reflow-Phänomen“ bei Patienten mit einem akuten Infarkt dargestellt werden. Dabei wird die oben beschriebene Late-enhancement-Technik genutzt, die Bilder jedoch früh, d. h. 1–2 min nach Kontrastmittelgabe erstellt. Zu diesem Zeitpunkt zeigt die Inversion-recovery-Technik schwarz abgegrenzte Bereiche innerhalb des Infarktareals (das sich bereits zu diesem Zeitpunkt etwas signalverstärkt darstellt). Diese – auch als „microvascular obstruction“ bezeichnete – Beobachtung ist ein Hinweis auf eine schwer einträchtige Perfusion („no reflow“) und wurde mit verstärktem ventrikulärem Remodeling und dem gehäuften Auftreten von kardiovaskulären Ereignissen in Zusammenhang gebracht. Wie beim chronischen Infarkt, kann die Transmuralität des signalverstärkten Bereichs auch beim akuten Infarkt zur Vorhersage einer Funktionserholung genutzt werden, da irreversibel geschädigte Bereiche von „myocardial stunning“ abgegrenzt werden können

[21]. Die Differenzierung zwischen chronischem und akutem Myokardinfarkt gelingt durch Nachweis des Ödems mit T2-gewichteten Sequenzen [22].

Komplikationen nach akuten Infarkten, wie z. B. ventrikuläre Aneurysmata, Pseudoaneurysmata, ventrikuläre Septumperforation oder das Auftreten einer Mitralinsuffizienz können sicher dargestellt werden.

Kardiomyopathien

(Siehe auch Anhang 3)

Der Diagnose einer primären Kardiomyopathie (KMP) geht definitionsgemäß der Ausschluss anderer kardialer Erkrankungen voraus, die Einteilung der häufig genetisch determinierten Erkrankung folgt einem Vorschlag der WHO. Die CMR erweist sich bei der Erkennung und Differenzialdiagnose dieser Krankheitsgruppe als zunehmend wertvoll.

Hypertrophe Kardiomyopathie

Während die Echokardiographie in der Regel weiterhin Routinemethode bei der Erstdiagnose einer hypertrophen Kardiomyopathie ist, können mittels CMR genauere Befunde bezüglich der Diagnosestellung, des Ausmaßes der Hypertrophie und der Lokalisation insbesondere apikal und anterolateral erhoben werden [23], die für eine Risikostratifizierung von Bedeutung sein könnte.

Ein möglicher diagnostischer Wert liegt auch in der Anwendung der Late-enhancement-Technik, mit der fibrotische Veränderungen des Myokards bereits bei asymptomatischen Patienten erfasst werden können. Das Ausmaß der Fibrosierung scheint mit dem Risiko eines plötzlichen Herztodes sowie der Entwicklung einer systolischen Herzinsuffizienz assoziiert zu sein [24]. Weiterhin ist die Methode gut einsetzbar bei der Kontrolle nach Septumablation, da myokardiale und funktionelle Veränderungen effizient korreliert werden können [25].

Linksventrikuläre Non-Compaction-Kardiomyopathie

Aufgrund der verbesserten diagnostischen Möglichkeiten, wurde in den letz-

ten Jahren das Bild der Non-compaction-Kardiomyopathie häufiger beschrieben, die Phänotypisierung beruht auf echokardiographischen Kriterien, direkte Vergleichsstudien zwischen CMR und Echokardiographie existieren nicht. Durch die hohe räumliche Auflösung lässt sich die Trabekularisierung mittels CMR gut darstellen, die CMR-basierte Definition erlaubt eine gute Differenzierung zu Trabekularisierungen anderer Genese [26]. Der klinische Stellenwert ist derzeit unklar.

Dilatative Kardiomyopathie

Die morphologischen und funktionellen Veränderungen der dilatativen Kardiomyopathie (DCM) können mit der CMR gut dargestellt und quantifiziert werden. Diese Befunde erlauben jedoch keine sichere Unterscheidung zwischen der DCM und anderen Formen der linksventrikulären Dysfunktion, wie z. B. einer ischämischen Kardiomyopathie. Ein Vorteil der CMR gegenüber der Echokardiographie ist die Möglichkeit, durch den Einsatz der Late-enhancement-Technik fibrotische Veränderungen nachweisen zu können. Diese beziehen bei einer ischämischen Kardiomyopathie die subendokardiale Region ein und können typischerweise einem spezifischen Versorgungsgebiet zugeordnet werden (▣ **Abb. 5**). Bei ca. 60% der Patienten mit idiopathischer DCM findet sich keine Anreicherung von Kontrastmittel, in einigen Fällen sind Kontrastmitelanreicherungen nachweisbar, die meist intramyokardial oder subepikardial lokalisiert sind [27].

Arrhythmogene rechtsventrikuläre Kardiomyopathie

Bei einer CMR-Untersuchung von Patienten mit vermuteter arrhythmogener rechtsventrikulärer Kardiomyopathie (ARVC) werden nach den von McKenna publizierten Kriterien morphologische und funktionelle Veränderungen insbesondere des rechten Ventrikels überprüft. Aufgrund der erheblichen Normvarianten des RV sind bei der Interpretation der Befunde ein erfahrener Untersucher und ein standardisiertes Protokoll erforderlich. Isolierte Veränderungen müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Mit

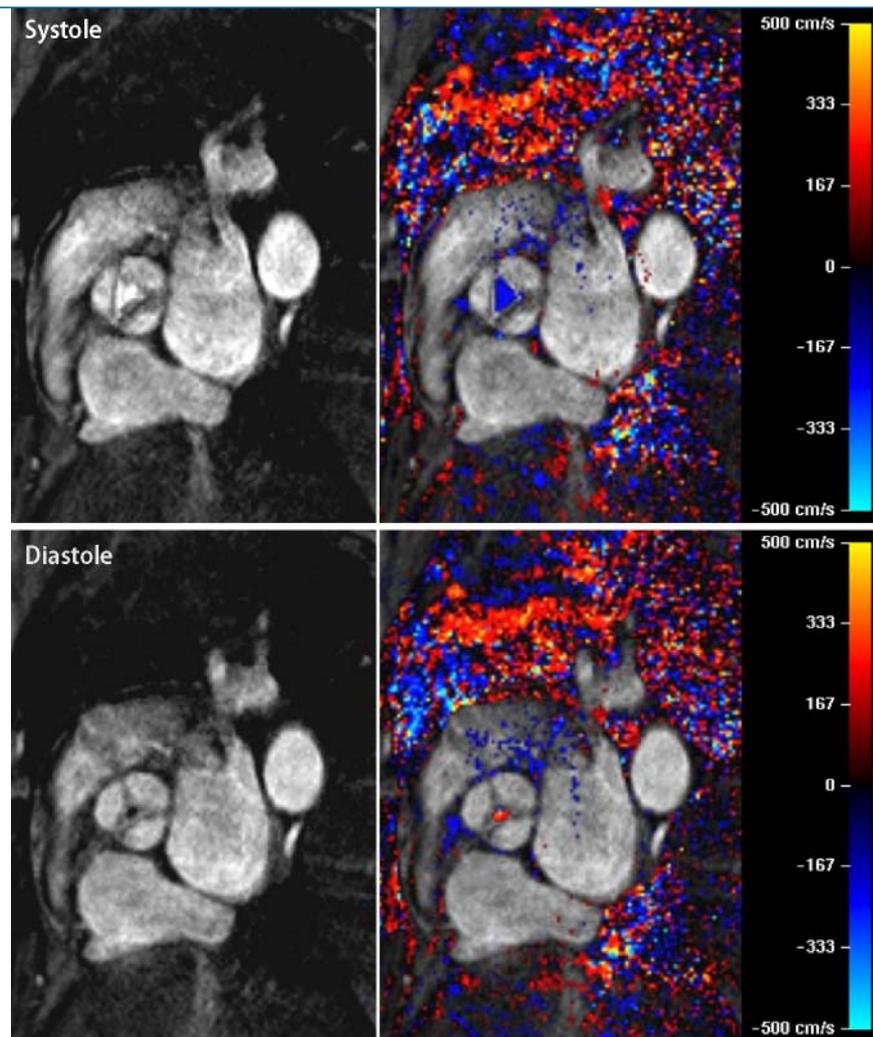


Abb. 8 ▲ *Oben:* MR-Bildgebung der Aortenklappe während der Systole (links) sowie farbige Flussmessung. *Unten:* MR-Bildgebung der Aortenklappe während der Diastole (links) sowie farbige Flussmessung. Es besteht eine leichte Aortenklappeninsuffizienz

der CMR können Major- oder Minor-Kriterien nachgewiesen werden. Dabei werden die Größe und regionale Wandbewegungsstörungen bzw. Wandausdünnungen des rechten Ventrikels beurteilt [28] (▣ **Abb. 6**). Der Nachweis intramyokardialen Fettes gilt nicht als spezifisches Kriterium.

Restriktive Kardiomyopathie

Im Vordergrund steht die Differenzierung zur „konstriktiven Perikarditis“ (s. dort). Eine häufige Ursache einer RCM ist die Amyloidose. Dabei wird häufig eine Wanddickenzunahme des Vorhofseptums beobachtet. In den letzten Jahren wurde zur Differenzierung der Hypertrophie die Late-enhancement-Technik eingesetzt, mit der früh nach Kontrastmit-

telgabe eine charakteristische globale subendokardiale Anreicherung bei schlechter Suppressierbarkeit des Myokards gezeigt wurde [29].

Eisenspeicherkrankheiten/ Eisenüberladung

Eine gelegentlich verkannte Ursache einer Kardiomyopathie ist eine Eisenüberladung bei Patienten mit vererbten schweren Anämien, die von Geburt an regelmäßige Bluttransfusionen benötigen. Mit T2*-Messungen kann Gewebeeisen nachgewiesen werden, wobei eine enge Beziehung zwischen einer Verkürzung der myokardialen T2*-Zeit (hoher Eisengehalt) und einer LV-Dysfunktion besteht [30].

Tab. 1 Herzmorphologie/-struktur und -funktion

Spule	Zielvolumenadaptiertes Oberflächen-Empfangsspulensystem
Untersuchungsvolumen/ Schichtlage	3D-Datensatz mittels 2D-Bildgebung und Positionierung in variablen Achsen, sodass das 17-Segment-Modell angewendet werden kann Alternativ: 3D-Volumenbildgebung
Messparameter:	
– Schichtdicke	≤10 mm (besser 8 mm für morphologische Fragestellungen bzw. <6 mm bei Kindern)
– Zeitliche Auflösung	Datenakquisition in der Diastole für Herzmorphologie, bei Cine-Sequenzen für funktionelle Fragen ≤50 ms
– Matrix	≥256×(180–204) Pixel Morphologie, Strukturanalyse ≥256×128 Pixel Funktion
– FoV	≤380 mm
– Maximale Pixelgröße	≤1,5 mm×(1,9–2,1) mm Strukturanalyse, Morphologie ≤1,5×3,0 mm Funktion
– Relaxationszeitwichtung	Je nach Fragestellung. Zum Beispiel: „Brightblood“ bei nativen funktionellen Untersuchungen T2/T2* (Ödemnachweis, vermehrte Eisenablagerung bei Hämochromatose; zur Quantifizierung wird die Nutzung der Körperspule empfohlen) Spezielle T1-Vorpräparation bei der Narben-/Fibrosedarstellung (Null-Signaldurchgang des vitalen Myokards) Eventuell Verwendung von Fettsättigung
– Sequenzen	SSFP Gradientenecho (FLASH), Turbo-Spin-Echo Cine-Sequenzen für die Beurteilung der Klappenmorphologie und für die Detektion bewegter Raumforderungen
– Berücksichtigung der Atembewegung	Atemanhaltetechnik Navigatorverfahren
– EKG-Triggerung	Obligat
– i.v.-Kontrastmittel (Gd-Chelat)	Mindestens 0,1 mmol/kg Körpergewicht, bei Raumforderungen, entzündlichen Herzerkrankungen und Narben-/Fibrosedarstellung („late enhancement“). Late-enhancement-Aufnahmen erfolgen 10–20 min nach der Injektion Für funktionelle Herzdiagnostik ist meist kein Kontrastmittel notwendig
Nachverarbeitung	Berechnung ventrikulärer Parameter – Enddiastolisches Volumen – Endsystolisches Volumen – Ejektionsfraktion – Myokardiale Masse (nur linker Ventrikel) Angabe absolut und normalisiert (auf die Körperoberfläche KOF)

Kardiale Sarkoidose

In autoptischen Serien konnte in einem hohen Prozentsatz der Patienten eine kardiale Mitbeteiligung bei Sarkoidose erfasst werden, die aber nur in 50% der Fälle bereits klinisch diagnostiziert wurde. Klinische Informationen und übliche bildgebende Methoden leiden unter einer niedrigen diagnostischen Genauigkeit. Mit Kontrastmittelverstärkten Techniken kann bei Herzbeteiligung ein erhöhtes Signal erfasst werden [31], wobei eine Steroidbehandlung zu einer Reduktion dieses Signals führt.

Myokarditis

Die klinische Diagnose einer Myokarditis ist schwierig, da die Symptome unterschiedlich und oft unspezifisch sind. Die Wertigkeit der Myokardbiopsie ist infolge ihrer Invasivität und die potenziell negativen Befunde durch Entnahme aus einem nichtentzündlichen Myokardabschnitt eingeschränkt. Akut entzündlich verändertes Myokard kann sowohl in T2-gewichteten als auch in frühen und insbesondere späten Kontrastmittelverstärkten Messungen einen Signalanstieg zeigen [32, 33]. Kontrastmitteleicherungen

werden häufig subepikardial in der Lateralwand des linken Ventrikels nachgewiesen (■ **Abb. 7**). Es gibt Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Ausprägung der Kontrastmitteleicherungen und Prognose [34].

Perikarderkrankungen

(Siehe auch Anhang 3)

Anatomische Veränderungen des Perikards einschließlich der Perikarddicke und eines eventuellen Perikardergusses können mit CMR und CT gut dargestellt werden. Die CMR hat den Vorteil, auch funktionelle Veränderungen, die in Kombination mit einer Perikarderkrankung auftreten, darzustellen und quantifizieren zu können. Mit beiden Verfahren können das Ausmaß und die Beziehung mit umgebenden anatomischen Strukturen exakt erfasst werden. CT hat einen Vorteil bei der Erkennung von Perikardkalkifikationen. Mit der CMR kann die akute perikardiale Entzündung anhand einer Kontrastmitteleicherungen im Perikard nachgewiesen werden.

Konstriktive Perikarditis

Die charakteristischen anatomischen und funktionellen Veränderungen, die mit einer konstriktiven Perikarditis verbunden sind (ausgedehnte und enge RV, abnormale Bewegung des sigmoid geformten interventrikulären Septums, Vergrößerung des rechten Vorhofs und der inferioren V. cava, langsamer Fluss in den Vorhöfen sowie Perikardverdickung) werden mit Spin-Echo-CMR eindeutig dargestellt. Dabei zeichnet sich die CMR durch einen hohen positiven Vorhersagewert aus.

Prinzipiell ist eine Perikardverdickung das Kennzeichen einer konstriktiven Perikarditis, es kommen jedoch auch Fälle ohne Perikardverdickung vor. CMR in Spin-Echo-Technik und CT sind der Echokardiographie bei der Erfassung einer Perikardverdickung überlegen, die CMR hat jedoch den Vorteil, gleichzeitig einen eventuellen Einfluss auf die Hämodynamik messen zu können. Lediglich bei Patienten mit schwerer Herzinsuffizienz und bei Patienten mit absoluter Arrhythmie bei Vorhofflimmern kann die CT der CMR vorgezogen werden, da die Darstel-

lungszeit kürzer ist und auf EKG-Gating verzichtet werden kann.

Angeborene Veränderungen des Perikards

Perikardzysten können von anderen Tumoren anhand ihres niedrigen T₁- und hohen T₂-Signals auf Spin-Echo-Bildern differenziert werden, in Cine-Aufnahmen ist das Signal normalerweise hoch. Allerdings kann die Differenzialdiagnose zu einem nekrotischen oder zystischen mediastinalen Tumor schwierig sein. Ein angeborenes Fehlen des Perikards führt zu einer charakteristischen Linksverlagerung der Herzlängsachse. Fehlen lediglich Teile des Perikards, entstehen typischerweise Ausbeulungen des Herzens, die gut visualisiert werden können. Der Perikarddefekt selbst wird jedoch häufig nicht gesehen.

Kardiale Tumoren

(Siehe auch Anhang 3)

Die Echokardiographie (insbesondere transösophageal) ist die Standardmethode bei der Suche nach und der Diagnose von intrakardialen Tumoren. In vielen Fällen ist die Charakterisierung jedoch unvollständig. Die CMR kann zur Bestimmung der Beziehung des Tumors zu intrakardialen Strukturen sowie zur Festlegung der Tumorausdehnung in Bezug auf angrenzende vaskuläre und mediastinale Strukturen sowie einer möglichen Infiltration ins Perikard herangezogen werden und erlaubt eine exaktere präoperative Planung. Es gibt etliche CMR-Merkmale, die bei der Tumorcharakterisierung behilflich sein können [35, 36].

Die Differenzialdiagnose einer signalintensiven Läsion auf T₁-gewichteten Bildern beinhaltet fetthaltige Tumoren (Lipom, Liposarkom), frische Blutungen (durch Methämoglobin-Abbauprodukte), Zysten (bedingt durch Protein im Inneren der Zyste) und Melanome (durch die Wirkung von Melanin). Eine Läsion mit niedriger Signalintensität in T₁-gewichteten Bildern kann ebenfalls eine Zyste sein, die Flüssigkeit mit geringem Proteinanteil enthält. Möglich ist auch eine Signalauslöschung durch turbulenten Fluss bei einer Gefäßfehlbildung, durch eine verkalkte Läsion oder durch Luft einschließen. Zysten

Tab. 2 Morphologie der großen Gefäße

Spule	Zielvolumenadaptiertes Oberflächen-Empfangsspulensystem
Untersuchungsvolumen	Aorta thoracalis: Zwerchfell bis einschließlich supraaortale Gefäße Pulmonalarterien: Zwerchfell bis Lungenspitze
Schichtlage	Entsprechend der Fragestellung
Messparameter:	
– Schichtdicke	1,5–4 mm
– Matrix	≥256×180
– FoV	≤480 mm
– Maximale Pixelgröße	≤1,9×2,7 mm
– Wichtung	T1
– Sequenzen	Gespoilte 3D-Gradienten-Echo-Sequenz Schwarzblutsequenzen (Wanddarstellung)
– Atemtriggerung	Atemanhaltetechnik
– EKG-Triggerung	Fakultativ
– i.v.-Kontrastmittel (Gd-Chelat)	Ohne Kontrastmittel: „Brigh/blackblood-Techniken“ 0,1–0,2 mmol/kg Körpergewicht Injektionsgeschwindigkeit: 2–4 ml/s
Zusatzanforderungen	Testbolus/Bolustracking Analyse von Ursprungsbildern und Rekonstruktionen
Nachverarbeitung	Fakultativ: multiplanare Reformatierung, Maximum-Intensity-Projektion, Volume-Rendering, Subtraktion

Tab. 3 Untersuchung unter pharmakologischer Belastung

Personelle Voraussetzungen	Permanente Überwachung durch einen in der Notfallmedizin erfahrenen Arzt
Aparative/instrumentelle Voraussetzungen	EKG-, Blutdruck- und ggf. Pulsoxymetrieüberwachung Sicherer venöser Zugang Automatische Injektoren Notfallausrüstung und Medikamente
Pharmaka	Vasodilatoren (Adenosin) zur Messung der Perfusion (visuell) oder möglichst der Perfusionsreserve (semiquantitativ) bzw. ggf. Koronarsflussreserve Inzidenz schwerer Nebenwirkungen: <0,02–0,07% Positiv inotrope Substanzen (Dobutamin) zur Induktion einer Ischämiekaskade mit entsprechenden Wandbewegungsstörungen Inzidenz schwerer Nebenwirkungen: 1%
Dosierungsprotokolle	Adenosin: 140 µg/kg Körpergewicht/min über 4–6 min und maximal 6 min Dobutamin: 5 und/oder 10 µg/kg Körpergewicht/min Untersuchungsbeginn bei signifikanter Steigerung der Herzfrequenz, spätestens aber nach 5 min, Fortführung der Infusion während der gesamten Untersuchung Dosissteigerung alle 3 min: 5, 10, 20, 30, 40 µg/kg Körpergewicht/min, ggf. zusätzlich 0,25 mg Atropin fraktioniert (bis max. 1 mg), wenn 85% der altersabhängig maximalen Herzfrequenz nicht erreicht sind. Beendigung bei Erreichen dieses Wertes oder beim Auftreten von Wandbewegungsstörungen

haben üblicherweise unabhängig von der Proteinkonzentration des Zysteninhalts eine hohe Signalintensität in T₂-gewichteten Bildern. Der definitive Nachweis einer aus Fett bestehenden oder fetthaltigen Struktur erfolgt durch die Anwendung von Fettsättigung. Eine weitere Differenzierung des Tumors muss nach Gadoliniumgabe erfolgen. Während der ers-

ten Kreislaufpassage zeigen vaskuläre Tumoren (Hämangiom, Angiosarkom) eine frühe Signalverstärkung als Zeichen kleiner, intramuraler Gefäße. In der späteren Phase zeigen viele Tumorentitäten eine Kontrastverstärkung als Hinweis auf progressive oder fibrotische Areale. Solch eine Verstärkung fehlt üblicherweise in zystischen Läsionen und in den meisten gut-

Tab. 4 Perfusionsmessung	
Spule	Zielvolumenadaptiertes Oberflächen-Empfangsspulensystem
Untersuchungsvolumen	Linker Ventrikel
Schichtlage	Kurze Herzachse
Messparameter:	
– Schichtdicke	≤10 mm, ≥3 Schichten/Herzschlag
– Zeitliche Auflösung	1 Messung/Herzschlag, ≥50 Messungen
– Matrix	≥128×76 Pixel
– FoV	≤380 mm
– Minimale Pixelgröße	≤3,0×5,0 mm
– Wichtung	T1
– Sequenzen	Saturation-Recovery-Gradienten-Echo-Sequenz oder SSFP-Sequenz oder Hybrid-Sequenz
– Atemtriggerung	Atemanhaltetechnik
– EKG-Triggerung	Obligat
– i.v.-Kontrastmittel (Gd-Chelat)	0,03–0,1 mmol/kg Körpergewicht Injektionsgeschwindigkeit: ≥2 ml/s
Zusatzanforderungen	Untersuchung in Ruhe und unter pharmakologischem Stress (Zeitabstand ≥10–20 min – je später, desto besser ist der Kontrast bei der 2. Messung, s. Untersuchung unter pharmakologischer Belastung)
Auswertung	Visuell, wenn möglich semiquantitativ

Tab. 5 Flussmessung	
Spule	Zielvolumenadaptiertes Oberflächen-Empfangsspulensystem
Untersuchungsvolumen	Aorta thoracalis/Truncus pulmonalis/Aa. pulmonales/Vv. pulmonales/V. cava/Koronararterien/Sinus coronarius/Bypassgefäße
Schichtlage	Senkrecht zum Gefäßverlauf „Region of interest“ im Isocenter
Messparameter:	
– Schichtdicke	≤7 mm
– Zeitliche Auflösung	≤50 ms (effektiv)
– Sequenzen	Phasenkontrast-Flussmessungs-Sequenz
– Atemtriggerung	In Abhängigkeit vom Gerät Atemanhaltetechnik oder Mittelung über mehrere Atemzyklen
– EKG-Triggerung	Obligat
– i.v.-Kontrastmittel (Gd-Chelat)	Nicht erforderlich
Zusatzanforderungen	Keine
Nachverarbeitung	Für die Flussquantifizierung muss eine entsprechende Auswertesoftware eingesetzt werden

artigen Tumoren (Hämangiom und Myxom als Ausnahme). Ventrikeltromben lassen sich mit der Late-enhancement-Technik sensitiver als mit der Echokardiographie darstellen [18]. Die Differenzierung frischer Tromben zu Tumoren gelingt meist anhand der fehlenden Vaskularisierung.

Herzklappenfehler

(Siehe auch Anhang 3)

Die CMR ist für die Untersuchung von Klappenerkrankungen Methode zweiter

Wahl nach der transthorakalen und transösophagealen Echokardiographie. Die CMR kann bei diskrepanten Befunden eine ergänzende Rolle spielen oder wenn eine individuelle Entscheidung über die Notwendigkeit eines operativen Eingriffs bei Klappeninsuffizienzen getroffen werden muss. Insbesondere bei der Aortenklappe hilft die direkte Visualisierung mit CMR bei der Beurteilung der Morphologie und Klappenöffnungsfläche [37]. Allerdings können kleine flottierende Strukturen wie bei Endokarditis der Darstellung mit der CMR entgehen.

Eine Visualisierung von Flussphänomenen durch turbulenten Fluss bei Stenosen oder Klappenregurgitationen ist mit Turbo-Gradienten-Echo- oder SSFP-Sequenzen möglich. Die Abschätzung des Schweregrades kann anhand der in der Echokardiographie üblichen Ansätzen (Bernoulli, „pressure half time“ etc.) erreicht werden [38]. Damit entstehen auch die aus der Echokardiographie bekannten Ungenauigkeiten. Vorteile der MRT liegen in der direkten Messung der Regurgitationsvolumina insbesondere über der Aortenklappe. Die Kombination aus Flussmessungen, Messungen des Regurgitationsvolumens und Bestimmung der Schlagvolumina erlaubt eine Quantifizierung auch kombinierter Viten (■ **Abb. 8**).

Prothetische Klappen

Die CMR bei 1,5 Tesla ist auch bei Patienten mit prothetischen Herzklappen sicher, da Herzklappenprothesen keine wesentlichen Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld haben und die Erwärmung unerheblich ist. Das in den Prothesen enthaltene Metall führt jedoch zu lokalen Artefakten und Signalverlusten durch die Verformung des Magnetfelds. Diese Artefakte sind auf Spin-Echo-Bildern am geringsten ausgeprägt – bei allen schnelleren Sequenzen vergrößern sich entsprechend auch die Artefakte. Als Konsequenz können durch die Artefakte kleinere Signalverluste bei paravalvulären Leckagen verdeckt werden. Die Beurteilung von Flussphänomenen durch die Kunstklappen und mögliche paravalvuläre Flüsse sind jedoch nicht beeinträchtigt.

Gültigkeit

In Anbetracht der raschen technischen Entwicklung der bildgebenden Techniken ist eine kontinuierliche Überprüfung der dargestellten Inhalte erforderlich. Dieses Positionspapier gilt deshalb bis zum 31.10.2008. Eine Überarbeitung ist in 2–3 Jahren vorgesehen.

Anhang 1: Übersicht der CMR-Techniken

Anhang 2: Technischer Anhang

Anhang 3: Diagnostische Wertigkeit

Anhang 4: Literatur

Tab. 6 Koronarangiographie

Spule	Zielvolumenadaptiertes Oberflächen-Empfangsspulensystem
Untersuchungsvolumen	Proximale Koronararterien
Schichtlage	Axial oder entlang des Verlaufs der Koronararterien
Messparameter:	
– Schichtdicke	≤2 mm
– FoV	≤380 mm
– Maximale Pixelgröße	≤1,5×2 mm ²
– Datenakquisitionsfenster	≤100 ms
– Atemtriggerung	Atemanhaltetechnik/Navigatortechnik
– EKG-Triggerung	Obligat
– i.v.-Kontrastmittel	Fakultativ Bei der Atemanhaltetechnik können 0,1–0,2 mmol/kg Körpergewicht Gd-Chelat gegeben werden
Zusatzanforderungen	Atemanhaltetechnik: Testbolus/Bolustracking Analyse von Ursprungsbildern und Rekonstruktionen
Auswertung	Primär anhand der Originaldaten

Anhang 1: Übersicht der CMR-Techniken

Für ein besseres Verständnis der Begriffe, die im klinischen Teil dieses Positionspapiers vorkommen, folgt hier eine kurze Beschreibung der technischen Aspekte. Für ausführlichere Informationen verweisen wir auf die entsprechenden Lehrbücher. Der entscheidende Punkt zum Verständnis der CMR ist, dass die für die Bildgebung nötige Interaktion auf Atomkernebene stattfindet. Elektronen, die an der chemischen Verbindung beteiligt sind (besonders in der DNS), werden zwar in Schwingungen versetzt, ihre chemischen Verbindungen werden jedoch aufgrund der geringen Energie der Magnetresonanztomographie nicht beeinflusst, während diese bei einer ionisierenden Strahlung, wie z. B. Röntgenstrahlung, verändert werden können. Damit ist die CMR bei Beachtung der Vorsichtsmaßnahmen und Kontraindikationen als sichere Methode einzustufen. Nur Atomkerne mit unpaarigen Protonen können mit der Magnetresonanz angeregt werden. Obwohl dies wichtige Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff, Natrium, Kalium und Fluor mit einbezieht, werden diese Elemente in der klinischen Bildgebung selten genutzt. Bei der Mehrzahl der klinischen CMR-Untersuchungen wird der Wasserstoffkern verwendet, der reichlich in Wasser, Fett und anderen biochemischen Komponenten des menschlichen Körpers vorkommt. Lediglich bei der klinischen Spektroskopie wird Phosphor genutzt.

Der Wasserstoffkern (ein Einzelproton) verhält sich wie ein kleiner rotierender Magnet (=Spin), der sich parallel zu einem äußeren Magnetfeld, wie es im MRT erzeugt wird, aufstellt. Ähnlich wie ein schräg stehender Kreisel rotiert der Spin dabei um dieses Magnetfeld. Diese Rotationsfrequenz (=Präzessionsfrequenz) liegt bei einer Feldstärke von 1,5 Tesla bei ca. 64 MHz, d. h. im Radiofrequenzbereich. Strahlt man Hochfrequenzstrahlung mit genau dieser Frequenz ein, können die Spins angeregt, d. h. von ihrer zum äußeren Feld parallelen Position weggedreht werden. Damit rotiert die gesamte Magnetisierung des Kerns in Richtung des Hauptfeldes zurück zur Ursprungsposition (*Relaxation*). Der Anteil der Magnetisierung, der sich rechtwinklig zum angelegten Magnetfeld befindet, sendet Energie als Radiosignal mit der Resonanzfrequenz aus. Dies kann über eine Empfängerspule aufgenommen werden, die bei der Herzbildgebung um den Brustbereich angelegt ist. Durch eine komplexe Schaltung der verschiedenen Magnetfelder des MR-Tomographen (Gradienten) wird für jeden Ort im Körper eine spezifische Frequenz erzeugt, die dann zur Erstellung des Bildes genutzt werden kann (Fourier-Transformation). Die Rückkehr des Vektors der Gesamtmagnetisierung zur ursprünglichen Position hat zwei Komponenten. Die Komponente des Vektors, die sich parallel zum Hauptfeld befindet, kehrt durch das Zusammenspiel mit den umgebenden Molekülen zurück zur Ursprungsposition. Dies ist ein relativ langsamer Prozess und wird *T1-Relaxation* genannt. Die Vektor-

komponente quer zum Feld verschwindet sehr schnell und ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen individuellen Spins. Sie wird *T2-Relaxation* genannt. CMR-Bilder können gewichtet werden, um die Verteilung von T1 und T2 oder die Dichte der Protonen darzustellen. Ein MR-Bild repräsentiert somit das räumlich aufgelöste Signal von relaxierenden Spins.

Ein CMR-Tomograph hat sechs Hauptkomponenten. Der supraleitende Magnet produziert das statische Magnetfeld, dessen Stärke in Tesla gemessen wird. Dieses Feld muss homogen, stabil und groß genug sein, um einen Patienten im Feld platzieren zu können. In der kardiovaskulären Bildgebung werden üblicherweise 1,5- (und zunehmend auch 3-)Tesla-Systeme genutzt. *Gradientenspulen* innerhalb der Röhre des Magneten produzieren Gradientenfelder, die durch *Gradientenverstärker* gesteuert werden. Die Leistung des Gradientensystems bestimmt die Geschwindigkeit des Tomographen. Eine an einen *Radiofrequenzverstärker* gekoppelte *Radiofrequenzspule* (Antenne) wird zur Aussendung der Radiofrequenzpulse genutzt, die zur Anregung der Spins nötig sind. Diese oder eine andere, näher am Untersuchungsvolumen platzierte Oberflächenspule ist wiederum an den Empfänger gekoppelt. Damit werden die vom Patienten kommenden Signale erfasst. Ein *Computer* ist erforderlich, um den MR-Tomographen zu steuern und Bilder zu generieren. Diese werden dann als Einzelschichten oder 3D-Volumina, statisch oder zeitlich über den Herzschlag aufgelöst („Cine-loops“), dargestellt. Bildserien, die nicht periodische (d. h. diskrete) Ereignisse darstellen (z. B. die Passage eines Kontrastmittelbolus), werden „dynamisch“ genannt.

Eine MR-Pulssequenz ist eine sehr komplexe Kombination aus Radiofrequenzpulsen und Schaltungen des magnetischen Gradientenfelds. Bei der CMR werden üblicherweise *Spin-Echo*-, *Gradienten-Echo*- und *Steady-State-Free-Precession*- (SSFP-)Pulssequenzen verwendet. Diese können durch Vorpulse in ihren Kontrasten beeinflusst werden. Dabei werden meist Sättigungs-, Inversions-, Schwarzblut- („black blood“) und Fettunterdrückungsvorpulse genutzt. Spin-Echo-Sequenzen eignen sich zur Darstellung der Anatomie, sind

tendenziell langsam und geben ein starkes Signal. Blut kann je nach Wichtung schwarz oder weiß dargestellt werden. Gradienten-Echo und SSFP sind tendenziell schneller, Blut stellt sich weiß dar. Sie werden bevorzugt zur Darstellung der Funktion eingesetzt. Inversionsvorpulse werden bei der Vitalitäts- bzw. Fibrosedarstellung genutzt, Sättigungsvorpulse für Perfusionsmessungen.

Die derzeit zur Verfügung stehenden Kontrastmittel basieren weitgehend auf Gadoliniumverbindungen. Gadolinium hat sieben unpaarige Elektronen, die zu einer Beschleunigung (Verkürzung) der T₁-Relaxation führen und damit das Signal erhöhen. Diese Kontrastmittel werden insbesondere bei der MR-Angiographie (MRA), Perfusionsmessungen und Narbendiagnostik („late enhancement“) verwendet.

Da die meisten Messungen (außer Perfusion) nicht in Echtzeit stattfinden, muss die Herzbewegung kompensiert werden. Dies geschieht durch EKG-Triggerung oder -Gating, bei der jeweils Teile des Bildes (genauer: des Frequenzspektrums) in verschiedenen Herzzyklen aufgenommen werden (=k-Raum-Segmentierung). Die Synchronisation mit dem EKG sorgt dafür, dass die Bildteile jeweils bei der gleichen Herzkonfiguration aufgenommen werden und dann zu einem Bild zusammengesetzt werden können. Die Dauer der Messung pro Herzzyklus (zeitliche Auflösung) ist invers mit der Dauer der Gesamtmessung korreliert. Das EKG kann innerhalb des Magnetfeldes nicht für diagnostische Zwecke verwendet werden, da insbesondere die ST-Strecken durch fließendes magnetisiertes Blut stark verändert sind.

Messungen, die nach wenigen Sekunden abgeschlossen sind, werden üblicherweise in *Atemstopps* durchgeführt. Überschreiten sie die Atemstoppkapazität des Patienten, werden mehrere Atemzyklen gemittelt oder die Messung zusätzlich auf die Atemposition synchronisiert. Dies kann durch einen *Atemgurt* oder – sehr viel genauer – durch *Navigatoren* erfolgen, bei denen mit einer sehr kurzen Messung die aktuelle Position des Zwerchfells bestimmt wird.

Spezielle Methoden sind „myokardiales Tagging“, bei dem der Herzmuskel

Tab. 7 Anwendungsgebiete der CMR

Angeborene Herzfehler
Primäre Beurteilung und Folgeuntersuchungen bei Erwachsenen mit angeborenen Herzfehlern
Beurteilung von Shunt-Größen (auch Aorta-Pulmonalarterie etc.) und postoperativer Verlauf
Anomalien des viszerotriatrialen Situs
Vorhofseptumdefekt
Anomalien des venösen Rückflusses
Postoperative Beurteilung bei Patienten mit komplexen Vitien
Ventrikelseptumdefekt in Kombination mit anderen Anomalien
Ventrikelaneyrismata und -divertikel
Quantitative Erfassung der links- und rechtsventrikulären Volumina
Valvuläre und supra- und subvalvuläre Pulmonalstenose und Pulmonalklappeninsuffizienz
Valvuläre und supra- und subvalvuläre Aortenstenose und Aortenklappeninsuffizienz
Pulmonalinsuffizienz
Darstellung von Conduits vom rechten Ventrikel zu den Pulmonalarterien
Evaluation der Vorhoftunnels nach Mustard-, Senning- oder Fontanoperation
Malposition der großen Gefäße
Sinus-Valsalva-Aneurysma
Aortenisthmusstenose und andere Aortenanomalien
Gefäßringe und andere Fehlbildungen intrathorakaler Gefäße (z. B. A. Lusoria, doppelter Aortenbogen)
Fehlverläufe, Stenosen bzw. Aneurysmen der proximalen Koronararterien (z. B. Kawasaki-Syndrom, postarterielle Switch-OP)
Beurteilung myokardialer Perfusion und Vitalität
Erworbene Gefäßerkrankungen
Aortenaneurysma (einschließlich Marfan-Syndrom)
Diagnose und Planung einer Stentimplantation bei abdominellem Aneurysma
Aortendissektion
Intramurales Hämatom der Aorta
Aortenulzerationen
Pulmonalarterienanatomie und -fluss
Beurteilung der großen thorakalen Venen
Beurteilung der Pulmonalvenen
Erworbene koronare Herzerkrankung
Globale links- und rechtsventrikuläre Funktion und Muskelmasse (bei spezifischer Indikation)
Erfassung einer stressinduzierten Wandbewegungsstörung (Dobutamin-Stress-MR)
Erfassung eines stressinduzierten Perfusionsdefekts (Adenosinperfusion)
Detektion und Beurteilung eines akuten oder chronischen Myokardinfarkts
Detektion von vitalem Myokard
Erkennung eines ventrikulären Thrombus
Erkrankungen des Perikards, Tumoren, Kardiomyopathien/Myokarditis
Konstriktive Perikarditis
Erfassung und Charakterisierung kardialer und perikardialer Tumoren
Hypertrophe Kardiomyopathie
Dilatative Kardiomyopathie zur Differenzialdiagnose gegenüber der ischämischen Kardiomyopathie
Myokarditis
Arrhythmogene rechtsventrikuläre Kardiomyopathie
Restriktive Kardiomyopathie
Eisenspeichererkrankung mit kardialer Beteiligung (z. B. Thalassämie)
Klappenerkrankungen
Morphologie der Aortenklappe
Ventrikelanatomie und -funktion
Quantifizierung einer Regurgitation

mit einem Gittermuster markiert wird, das sich mit dem Myokard bewegt, und Messungen der Flussgeschwindigkeit („Phasen-Kontrast“), bei der zusätzlich zum anatomischen Bild ein geschwindigkeitskodierte Bild erstellt wird. Diese Kodierung kann senkrecht oder parallel zur Bildebene erfolgen.

Bisher haben sich keine kurz- oder längerfristigen schädlichen Wirkungen der Magnetresonanztomographie gezeigt. Klaustrophobie kann bei ca. 2% der Patienten ein Problem sein, lässt sich aber üblicherweise mit einer milden Anxiolyse beheben. Der wichtigste Sicherheitsaspekt bei der CMR ist, keine ferromagnetischen Gegenstände in den Scanneraum zu bringen, da sie durch das starke Magnetfeld angezogen werden und eine sehr hohe Geschwindigkeit und Energie entwickeln können. Metallische Implantate wie Hüftprothesen, künstliche Herzklappen, Koronarstents und Sternaldrähte sind nicht gefährlich, da sie nicht aus ferromagnetischem Material bestehen. Allerdings können in der Nähe der Implantate Artefakte auftreten. Bei Patienten mit zerebrovaskulären Klammern ist Vorsicht geboten, weil einige Coil-Arten magnetisch sind (<http://www.imrser.org/PDF/3.T.AJNR.Aneurysm.Clips.pdf>). Patienten mit Herzschrittmachern, implantierten Kardiodefibrillatoren (ICD), zurückbehaltenen permanenten Herzschrittmacherkabeln sowie anderen elektronischen Implantaten werden derzeit nicht mit der CMR untersucht, da Rhythmusstörungen induziert, Elektrodenerwärmung möglich und ein Anstieg der Reizschwelle sowie Troponinerhöhungen beobachtet wurden [3]. Aktuelle Informationen finden sich auch unter <http://www.mri-safety.com>. Hier gibt es auch neue Daten zu bereits untersuchten Implantaten bei 3 Tesla.

Die für die CMR verwendeten Kontrastmittel auf Gadoliniumbasis haben ähnliche pharmakokinetische Eigenschaften wie nichtionische Röntgenkontrastmittel, können aber in den üblichen Dosierungen ohne Risiko auch bei Patienten mit eingeschränkter Nierenfunktion gegeben werden. Auch allergische Reaktionen sind äußerst selten.

Danksagung. Die Arbeitsgruppe ist der intensiven Unterstützung durch Jörg

Barkhausen und Ingo Paetsch besonders verpflichtet.

Anhang 2: Technischer Leitfaden für wichtige CMR-Untersuchungen

Hier sollen in tabellarischer Form für wichtige CMR-Untersuchungen Empfehlungen bzgl. technischen Voraussetzungen, Parametereinstellungen und Auswerteverfahren dargestellt werden. Dies ist als Hilfestellung und nicht als feste Vorgabe gedacht (■ Tab. 1, 2).

Untersuchung unter pharmakologischer Belastung

Die pharmakologische Belastung dient zum Nachweis einer Perfusionsstörung bzw. einer potenziellen Ischämie oder zum Vitalitätsnachweis. Für die Detektion einer Perfusionsstörung wird Adenosin (seltener Dipyridamol) als Vasodilatator verwendet. Ischämie und Vitalität können mittels positiv inotroper Substanzen (Dobutamin) entsprechend der mechanischen Ischämiekaskade nachgewiesen werden. Patientenmanagement, Überwachung und Kontraindikationen entsprechen denen der pharmakologischen Stressechokardiographie (■ Tab. 3).

Perfusion

Die Untersuchung der myokardialen Perfusion erfolgt mit der First-pass-Perfusionsmessung, d. h. der Analyse der ersten Passage eines Kontrastmittelbolus durch das Myokard. Hierfür ist die periphere Injektion eines Kontrastmittelbolus in eine z. B. antekubitale Vene meist ausreichend. Haupteinsatzgebiet der First-pass-Perfusion ist die Detektion einer hämodynamisch relevanten koronaren Herzerkrankung durch den Nachweis einer Minderperfusion v. a. nach pharmakologischer Belastung (■ Tab. 4).

Flussmessungen

Das Prinzip der Flussmessung beruht darauf, dass sich bewegende Spins durch zusätzliche Schaltung von Magnetfeldgradienten eine Phasenverschiebung erfahren, die ihrer Flussgeschwindigkeit proportional ist. Die Phase und damit die

Geschwindigkeit können gemessen, und darüber der Fluss in einem Gefäß bestimmt werden. Wichtig ist die Wahl des geeigneten Geschwindigkeitsbereiches („venc“=“velocity encoding“). Ist er zu gering, kommt es zu „Einfaltungen“ (Aliasing). Ist er zu groß, werden langsame Flüsse unterschätzt (■ Tab. 5).

Koronarangiographie

(Siehe ■ Tab. 6)

Anhang 3: Klinische Indikationen zur Durchführung der CMR

Die ■ Tab. 7 listet die Anwendungsgebiete auf, die nach dem Stand der Technik und der wissenschaftlichen Datenlage [1] sowie Expertenmeinung [2] für den Einsatz der CMR derzeit angemessen sind. Auf die Darstellung von Anwendungsgebieten mit unklarer Relevanz (mangelnde Datenlage, technische Unzuverlässigkeit) wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet.

Literatur

1. Pennell DJ, Sechtem UP, Higgins CB et al. (2004) Clinical indications for cardiovascular magnetic resonance (CMR): Consensus Panel report. *Eur Heart J* 25: 1940–1965
2. Hendel RC, Patel MR, Kramer CM et al. (2006) ACCF/ACR/SCCT/SCMR/ASNC/NASCI/SCAI/SIR Appropriateness Criteria for Cardiac Computed Tomography and Cardiac Magnetic Resonance Imaging. *J Am Coll Cardiol* 48
3. Faris OP, Shein M (2006) Food and drug administration perspective: magnetic resonance imaging of pacemaker and implantable cardioverter-defibrillator patients. *Circulation* 114: 1232–1233
4. Dong J, Vasamreddy CR, Jayam V et al. (2005) Incidence and predictors of pulmonary vein stenosis following catheter ablation of atrial fibrillation using the anatomic pulmonary vein ablation approach: results from paired magnetic resonance imaging. *J Cardiovasc Electrophysiol* 16: 845–852
5. Oberholzer K, Kreitner KF, Kalden P et al. (2000) [Contrast-enhanced MR angiography of abdominal vessels using a 1.0 T system]. *Röfo* 172: 134–138
6. Herborn CU, Goyen M, Quick HH et al. (2004) Whole-body 3D MR angiography of patients with peripheral arterial occlusive disease. *AJR Am J Roentgenol* 182: 1427–1434
7. Grothues F, Moon JC, Bellenger NG et al. (2004) Interstudy reproducibility of right ventricular volumes, function, and mass with cardiovascular magnetic resonance. *Am Heart J* 147: 218–223

8. Wahl A, Paetsch I, Roethemeyer S et al. (2004) High-dose dobutamine-atropine stress cardiovascular MR imaging after coronary revascularization in patients with wall motion abnormalities at rest. *Radiology* 233: 210–216
9. Jahnke C, Paetsch I, Achenbach S et al. (2006) Coronary MR imaging: breath-hold capability and patterns, coronary artery rest periods, and beta-blocker use. *Radiology* 239: 71–78
10. Hundley WG, Morgan TM, Neagle CM et al. (2002) Magnetic resonance imaging determination of cardiac prognosis. *Circulation* 106: 2328–2333
11. Wahl A, Paetsch I, Gollesch A et al. (2004) Safety and feasibility of high-dose dobutamine-atropine stress cardiovascular magnetic resonance for diagnosis of myocardial ischaemia: experience in 1000 consecutive cases. *Eur Heart J* 25: 1230–1236
12. Klem I, Heitner JF, Shah DJ et al. (2006) Improved detection of coronary artery disease by stress perfusion cardiovascular magnetic resonance with the use of delayed enhancement infarction imaging. *J Am Coll Cardiol* 47: 1630–1638
13. Giang TH, Nanz D, Coulden R et al. (2004) Detection of coronary artery disease by magnetic resonance myocardial perfusion imaging with various contrast medium doses: first European multicentre experience. *Eur Heart J* 25: 1657–1665
14. Wolff SD, Schwitter J, Coulden R et al. (2004) Myocardial first-pass perfusion magnetic resonance imaging: a multicenter dose-ranging study. *Circulation* 110: 732–737
15. Schwitter J, Bauer W, Rossum A van et al. (2005) MR-IMPACT: Comparison of myocardial perfusion imaging with single photon emission computed tomography in known or suspected coronary artery disease: A multicentre, multivendor dose finding study. *Eur Heart J*; *Clinical Trial Update*; Abstract
16. Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA et al. (2003) Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study. *Lancet* 361: 374–379
17. Gerber BL, Garot J, Bluemke DA et al. (2002) Accuracy of contrast-enhanced magnetic resonance imaging in predicting improvement of regional myocardial function in patients after acute myocardial infarction. *Circulation* 106: 1083–1089
18. Mollet NR, Dymarkowski S, Volders W et al. (2002) Visualization of ventricular thrombi with contrast-enhanced magnetic resonance imaging in patients with ischemic heart disease. *Circulation* 106: 2873–2876
19. Kwong RY, Schussheim AE, Rehrhraj S et al. (2003) Detecting acute coronary syndrome in the emergency department with cardiac magnetic resonance imaging. *Circulation* 107: 531–537
20. Ingkanisorn WP, Kwong RY, Bohme NS et al. (2006) Prognosis of negative adenosine stress magnetic resonance in patients presenting to an emergency department with chest pain. *J Am Coll Cardiol* 47: 1427–1432
21. Choi KM, Kim RJ, Gubernikoff G et al. (2001) Transmural extent of acute myocardial infarction predicts long-term improvement in contractile function. *Circulation* 104: 1101–1107
22. Abdel-Aty H, Zagrosek A, Schulz-Menger J et al. (2004) Delayed enhancement and T2-weighted cardiovascular magnetic resonance imaging differentiate acute from chronic myocardial infarction. *Circulation* 109: 2411–2416
23. Rickers C, Wilke NM, Jerosch-Herold M et al. (2005) Utility of cardiac magnetic resonance imaging in the diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 112: 855–861
24. Moon JC, McKenna WJ, McCrohon JA et al. (2003) Toward clinical risk assessment in hypertrophic cardiomyopathy with gadolinium cardiovascular magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol* 41: 1561–1567
25. Schulz-Menger J, Strohm O, Dietz R, Friedrich MG (2000) Visualization of cardiac involvement in patients with systemic sarcoidosis applying contrast-enhanced magnetic resonance imaging. *Magma* 11: 82–83
26. Petersen SE, Selvanayagam JB, Wiesmann F et al. (2005) Left ventricular non-compaction: insights from cardiovascular magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 46: 101–105
27. McCrohon JA, Moon JC, Prasad SK et al. (2003) Differentiation of heart failure related to dilated cardiomyopathy and coronary artery disease using gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 108: 54–59; Epub 2003 Jun 23. Write to the Help Desk NCBI | NLM | NIH Department of Health & Human Services Privacy Statement | Freedom of Information Act | Disclaimer Jun 21 6 12: 14: 26
28. Bluemke DA, Krupinski EA, Ovitt T et al. (2003) MR Imaging of arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy: morphologic findings and interobserver reliability. *Cardiology* 99: 153–162
29. Maceira AM, Joshi J, Prasad SK et al. (2005) Cardiovascular magnetic resonance in cardiac amyloidosis. *Circulation*. 111: 186–193
30. Anderson LJ, Holden S, Davis B et al. (2001) Cardiovascular T2-star (T2*) magnetic resonance for the early diagnosis of myocardial iron overload. *Eur Heart J* 22: 2171–2179
31. Smedema JP, Snoep G, Kroonenburgh MP van et al. (2005) Evaluation of the accuracy of gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance in the diagnosis of cardiac sarcoidosis. *J Am Coll Cardiol* 45: 1683–1690
32. Mahrholdt H, Goedecke C, Wagner A et al. (2004) Cardiovascular magnetic resonance assessment of human myocarditis: a comparison to histology and molecular pathology. *Circulation* 109: 1250–1258
33. Abdel-Aty H, Boye P, Zagrosek A et al. (2005) Diagnostic performance of cardiovascular magnetic resonance in patients with suspected acute myocarditis: comparison of different approaches. *J Am Coll Cardiol* 45: 1815–1822
34. Mahrholdt H, Wagner A, Deluigi CC et al. (2006) Presentation, patterns of myocardial damage, and clinical course of viral myocarditis. *Circulation* 114: 1581–1590
35. Kaminaga T, Takeshita T, Kimura I (2003) Role of magnetic resonance imaging for evaluation of tumors in the cardiac region. *Eur Radiol (Suppl)* 13: L1–L10
36. Krombach GA, Spuentrup E, Buecker A et al. (2005) [Heart tumors: magnetic resonance imaging and multislice spiral CT]. *Röfo* 177: 1205–1218
37. John AS, Dill T, Brandt RR et al. (2003) Magnetic resonance to assess the aortic valve area in aortic stenosis: how does it compare to current diagnostic standards? *J Am Coll Cardiol* 42: 519–526
38. Caruthers SD, Lin SJ, Brown P et al. (2003) Practical value of cardiac magnetic resonance imaging for clinical quantification of aortic valve stenosis: comparison with echocardiography. *Circulation* 108: 2236–2243

Untersuchungsmethoden zur Herzfunktion: Computertomographie erweist sich als exaktes Verfahren

Die Computertomographie (CT) erweist sich als genaueste Methode zur Untersuchung der Funktion der linken Herzkammer, wie die jüngsten Ergebnisse einer vergleichenden Studie der Charité – Universitätsmedizin Berlin belegen (M. Dewey, M. Müller, S. Eddicks et al. (2006) Evaluation of Global and Regional Left Ventricular Function with 16-Slice Computed Tomography, Biplane Cineventriculography and Two-Dimensional Transthoracic Echocardiography, Comparison with Magnetic Resonance Imaging; *J Am Coll Cardiol* 48:2034-2044)

Als Referenzstandard für die Studie wurde die Magnetresonanztomographie (MRT) des Herzens bei insgesamt 88 Patienten durchgeführt und die CT mit der Echokardiographie und der Herzkatheterbasierten Methode verglichen.

Die CT erbrachte dabei die genauesten Daten und zuverlässigsten Ergebnisse. Anders als bisher angenommen steht sie der MRT mit ihren Resultaten in nichts nach und liefert exaktere Daten als die Echokardiographie und der Herzkatheter.

Bereits in früheren Untersuchungen bewährte sich die CT bei der Diagnose von verengten Herzkranzgefäßen und zeigte, dass diese nicht-invasive Untersuchung die höchste Genauigkeit bei der Erkennung von bedeutenden Verengungen aufweist.

Somit können mit der CT in einer einzigen Untersuchung zuverlässig Daten sowohl über die Herzkranzgefäße als auch die Funktion der linken Herzkammer erhoben werden. Trotz Kontrastmittelgabe und Strahlenexposition rechtfertigt die hohe Aussagekraft der CT ihren Gebrauch bei bestimmten Patienten.

Quelle: Charité-Universitätsmedizin Berlin