

Journal für Kardiologie

Austrian Journal of Cardiology

Österreichische Zeitschrift für Herz-Kreislauserkrankungen

Neueste Entwicklungen in der bildgebenden kardialen Diagnostik

Grebe O, Hombach V

Journal für Kardiologie - Austrian

Journal of Cardiology 2003; 10

(9), 369-374

Homepage:

www.kup.at/kardiologie

Online-Datenbank
mit Autoren-
und Stichwortsuche



Offizielles
Partnerjournal der ÖKG



Member of the ESC-Editor's Club



Offizielles Organ des
Österreichischen Herzfonds



ACVC
Association for
Acute CardioVascular Care

In Kooperation
mit der ACVC

Indexed in ESCI
part of Web of Science

Indexed in EMBASE

Veranstaltungskalender

Hybrid-Veranstaltungen der Herausgeber des **Journals für Kardiologie**

Finden Sie alle laufend aktualisierten Termine
auf einem Blick unter

www.kup.at/images/ads/kongress.pdf

Neueste Entwicklungen in der bildgebenden kardialen Diagnostik

O. Grebe, V. Hombach

Kurzfassung: Neben der Weiterentwicklung im Ultraschallbereich (Gewebedoppler, Kontrast- und 3D-Echokardiographie) und der ultraschnellen Mehrschicht-Spiralcomputertomographie (Kalk-Scoring, Herz- und Koronarmorphologie) ist sicherlich die kardiale Magnetresonanztomographie (MRT) als ein komplett nichtinvasives Diagnostikum eine der vielversprechendsten Neuentwicklungen der letzten Jahre, da diese die herausragende Möglichkeit bietet, mehrere pathophysiologische Vorgänge in einem Untersuchungsgang anatomisch und funktionell zu erfassen. An immer mehr Zentren stehen MR-Tomographen der neuesten Generation zur Verfügung, welche die Hard- und Soft-

warevoraussetzung (Oberflächenspule, schnelles Gradientensystem, Auswerte-Tools und schnelle EKG-getriggerte Bildsequenzen) erfüllen oder die Möglichkeit einer Aufrüstung zur Durchführung kardiovaskulärer Untersuchungen bieten. In diesem Artikel wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung in den zwei zuerst genannten Verfahren gegeben und die kardiovaskuläre MRT als komplementäres wie auch innovatives Verfahren in der Kardiologie besprochen.

Abstract: Recent Developments in Cardiac Imaging. In addition to the progress in ultrasound imaging (tissue Doppler, contrast- and 3D-echocardiography)

and multislice computed tomography (calcium scoring, morphology of the heart and coronaries), cardiac magnetic resonance tomography (MRI) as a completely non-invasive method appears to be the most promising development in the last years. Many centers have new-generation scanners with hard- and software ready for cardiovascular examinations (phased-array surface coils, fast gradients, post-processing tools and fast cardiosynchronized imaging sequences), or the option of an upgrade. The paper summarizes the progress in the two first mentioned methods and discusses cardiovascular MRI as a complementary and innovative method in cardiology. **J Kardiol 2003; 10: 369–74.**

■ Ultraschall

Die Echokardiographie stellt das diagnostische Standardverfahren in der Kardiologie dar. Sie bietet die sofort und nahezu überall einsetzbare funktionelle Beurteilung der Herzhöhlen und -klappen. Eine Limitation ist die deutliche Patientenabhängigkeit der Schallqualität bei der transthorakalen Echokardiographie, die bei einem nicht unerheblichen Anteil die Beurteilung aller Segmente sowie insbesondere auch von Teilen des rechten Herzens erschwert und unter Umständen unmöglich macht. Ursachen sind z. B. Adipositas, Thoraxdeformitäten, Lungenemphysem, besonders schmale Abstände zwischen den Rippen oder extreme Herzlagen. Die nicht immer erzielbare exakte Einstellung der Standardschnittebenen ist eine Quelle für Fehlinterpretationen. Eine genaue Bestimmung kardialer Volumina ist aufwendig und nicht in jedem Fall möglich sowie für den rechten Ventrikel nicht praktikabel. Alle Weiterentwicklungen, wie z. B. „Second Harmonic Imaging“, können das Problem eines eingeschränkten Schallfensters nicht vollständig lösen. Es gibt jedoch neue Perspektiven für eine geringere Untersucherabhängigkeit und höhere Reproduzierbarkeit der Methode.

Eine interessante neue Technik ist die 3D-Echokardiographie. Diese war zunächst durch einen hohen Zeitaufwand in der Datenakquisition und -auswertung gekennzeichnet, doch gibt es hier deutliche Fortschritte, insbesondere in der Bildnachverarbeitung. Als grundsätzliche Verfahren stehen die Echtzeit-3D-Echokardiographie, welche zur Bilderzeugung Matrixschallköpfe verwendet, und die dynamische 3D-Echokardiographie zur Verfügung. Letztere basiert auf der standardisierten Akquisition von herkömmlichen 2D-Schnittbildern, welche unter Zuhilfenahme einer automatischen Ortsbestimmung der Schallsonde offline zu 3D-Bildern rekonstruiert werden. Zur Zeit kommt dieses Verfahren mittels transösophagealer Sonden zur besseren Beurteilung der Mitralklappe

(z. B. vor operativer Rekonstruktion) und des Vorhofseptums zur Anwendung.

Für die Kontrastechokardiographie stehen Rechtsherzkontrastmittel (Echovist® oder agitierte Lösung, z. B. Gela-tine) und lungenkapillargängige linksventrikuläre Kontrastmittel zur Verfügung (Optison®, Levovist®, SonoVue™). Die nicht lungenkapillargängigen Kontrastmittel bieten die Möglichkeit einer qualitativen Shunt-Diagnostik sowie den Nachweis eines persistierend offenen Foramen ovale. Die neueren linksventrikulären Echokontrastmittel erlauben eine Verbesserung der Schallqualität für die Endokardabgrenzung, insbesondere für Streßuntersuchungen [1, 2] wie auch bei Doppleruntersuchungen von Klappen [3, 4].

Eine neue Anwendung ist die der myokardialen Perfusionsuntersuchung. Mit den ersten kontrastspezifischen Verfahren (Harmonic B Mode, Puls Inversion und Harmonic Power Doppler) konnte eine diagnostisch verwertbare Kontrastdarstellung nur bei intermittierender Beschallung erzielt werden [5]. Mit den neuesten Techniken des „Harmonic Imaging“ (Power Puls Inversion, Power Modulation und Coherent Imaging) kann die Myokardperfusion nun auch in Echtzeit zusammen mit der linksventrikulären Wandbewegung untersucht werden. Eine Minderperfusion läßt sich im akuten Koronarsyndrom gut darstellen [6]. Vor der Anwendbarkeit dieser Technik in der klinischen Routine zur Ischämiediagnostik sind jedoch noch größere Studien erforderlich.

Mit dem Gewebedoppler steht eine neue Untersuchungsmodalität zur Verfügung. Hier werden analog dem zweidimensionalen Farbdoppler und Farb-M-Mode die systolischen und diastolischen Myokardgeschwindigkeiten dargestellt und quantifiziert. Neben Anwendungen im wissenschaftlichen Bereich scheint sich diese Methode besonders zur besseren Charakterisierung der diastolischen Funktion zu eignen [7].

Der intravaskuläre Ultraschall bietet neben der In-Stent-Diagnostik gute Möglichkeiten zur intrakoronaren Plaquediagnostik [8–11], stellt allerdings auch die maximalinvasive und kostenintensivste Variante des Ultraschalls dar. Als neue Methode mit verbesserter Auflösung ist hier die aus der Ophthalmologie stammende optische Kohärenztomographie zu nennen. Diese basiert im Gegensatz zum Ultraschall auf der Reflexion von Infrarotlicht, erzeugt jedoch ähnliche Bilder wie IVUS mit besserer Ortsauflösung [12–14].

Aus der Abteilung für Innere Medizin II – Kardiologie, Angiologie, Nephrologie, Pulmologie, Sportmedizin und Rehabilitationsmedizin der Universität Ulm, Deutschland
Korrespondenzadresse: Dr. med. Olaf Grebe, Universität Ulm, Abt. Innere Medizin II, Robert-Koch-Straße 8, D-89081 Ulm; E-Mail: olaf.grebe@medizin.uni-ulm.de

■ Herz-CT, EBT

Die Elektronenstrahltomographie (EBT) wurde vor etwa 25 Jahren an der Mayo-Klinik entwickelt und bot sich zum damaligen Zeitpunkt schon für Herzuntersuchungen an [15]. Aufgrund des Ersatzes einer rotierenden Röntgenröhre durch einen elektromagnetisch abgelenkten Elektronenstrahl ist eine zeitliche Auflösung von 50 ms möglich, zur Anwendung kommen in der Regel jedoch 100 ms. Aufgenommen wird eine Schicht pro Herzschlag mittels prospektiver Triggerung. Mit der EBT waren somit zum ersten Mal eine radiologische Schnittbilddarstellung der Herzkranzgefäße und eine Quantifizierung von Koronarkalk möglich. Mit der Vorstellung der 4- und 16-zeiligen Mehrschicht-Computertomographen (MSCT) erreicht nun die viel weiter verbreitete und auch für die komplette radiologische Routine nutzbare konventionelle Computertomographie (CT) vergleichbare theoretische zeitliche Auflösungen im Bereich von unter 100 ms, zur Anwendung kommen in der Regel jedoch noch 250 ms (4-Zeiler) bzw. 210 ms (16-Zeiler). Auch hiermit ist eine Kalkquantifizierung möglich [16], die zeitliche Auflösung ist jedoch für eine diagnostisch verwertbare Darstellung der Koronararterien (außer bei sehr niedrigen Herzfrequenzen) noch zu gering. Dementsprechend fallen auch die Sensitivität und Spezifität zur Erkennung der Lokalisation von Koronarstenosen aus. So ist bei Verwendung eines 4-Zeiler-Gerätes bei ca. $\frac{1}{3}$ der großen Koronargefäße die Darstellung nicht diagnostisch, und bei $\frac{2}{3}$ der Patienten sind eine oder mehrere Koronararterien nicht darstellbar [17]. Ob die neuen Geräte, welche die Akquisition von 16 Schichten pro Rotation ermöglichen, hier einen Vorteil bringen, ist zu vermuten [18], jedoch noch nicht durch größere Studien bewiesen. Die Atemanhaltezeit (zur Zeit bis zu 40 s) für einen kompletten Herz-Scan verkürzt sich zumindest deutlich.

Für eine reine Kalkquantifizierung ist kein Kontrastmittel notwendig. Koronarkalk weist zwar eine Korrelation zum Vorliegen einer koronaren Herzkrankheit auf, jedoch nicht zur Stenoselokalisierung oder zum Stenosegrad [19, 20]. Koro-

narkalk hat einen hohen negativen prädiktiven Wert für kardiale Ereignisse (Tod, Myokardinfarkt, Revaskularisation), jedoch einen sehr geringen positiven Vorhersagewert [21]. Das bedeutet, daß nur das Fehlen von Koronarkalk prognostisch relevant verwertbar ist. Unter Lipidsenkung scheint die Kalkprogression abzunehmen [22]. Der Kalkscore wird derzeit nicht von der AHA und dem ACC als Screening-Untersuchung für Atherosklerose empfohlen [23, 24]. Die hohe Strahlenbelastung (bei Geräten der neuesten Generation ist eine Reduktion der effektiven Strahlendosis durch einen gepulsten Röhrenstrom auf ca. 4–5 mSv möglich) und die Menge an benötigtem Röntgenkontrastmittel für eine Koronariendarstellung (ca. 100 ml), im Ausmaß mindestens dem einer konventionellen Herzkatheteruntersuchung entsprechend, sollte bei der Bewertung der Methode zum Screening berücksichtigt werden. Eine koronare Plaquecharakterisierung wird zur Zeit ebenfalls untersucht [25], hierzu erscheint die CT aufgrund des geringen Weichteilkontrastes jedoch primär weniger geeignet.

■ Kardiale Magnetresonanztomographie

Darstellungen des gesamten Gefäßsystems mit Magnetresonanztomographie (MRT) sind schon seit einigen Jahren mit venöser Kontrastmittelgabe bei immer besserer zeitlicher und örtlicher Auflösung möglich (Abb. 1). Hier hat die MRT vielerorts die invasive Angiographie bei der Darstellung der peripheren und zentralen Gefäße als Standardverfahren abgelöst. Seit Vorstellung der Cine-MRT-Technik [26, 27] Mitte der 1980er Jahre ist es möglich, die Herzbewegung mit der MRT in jeder beliebigen Ebene darzustellen. Die damals noch sehr langwierigen und artefaktanfälligen Untersuchungsgänge wurden durch Fortentwicklung der Technik in den letzten Jahren auch für die klinische Routine attraktiv. In der kardiologischen Funktionsdiagnostik bietet die MRT den besonderen Vorteil, mehrere pathophysiologische Aspekte simultan zu erfassen. Dies könnte zukünftig neben einer Verbesserung der Diagnostik auch eine wesentliche Minderung der Patientenbelastung im Sinne einer weniger invasiven Diagnostik bedeuten. Die verschiedenen mit der MRT möglichen Methoden umfassen neben der rein anatomischen Darstellung des kardiovaskulären Systems die quantitative Flußmessung in Gefäßen, die dynamische Volumenbestimmung der Herzhöhlen, die Wandbewegungsanalyse sowie die Myokardperfusion in Ruhe und unter Belastung. Weitere Anwendungen sind das Tagging (Auswertung von Bewegungsstrukturmustern) und die Infarktnarbendarstellung in Late-Enhancement-Technik (kontrastmittelverstärkte Spätaufnahmen) zur Vitalitätsdiagnostik sowie die Darstellung der proximalen Anteile der Herzkranzgefäße. Jüngste Forschungen widmen sich der Plaquedarstellung und -charakterisierung in großen Gefäßen und den Koronararterien.

Geräte für die Herzuntersuchung benötigen die Möglichkeit der Kardiosynchronisation (Triggerung oder Gating), eine Phased-Array-Oberflächenspule und, für die Echtzeitbildgebung (Myokardperfusion), ein schnelles Gradientensystem. Für die Cine-Aufnahmen ist momentan die SSFP-Technik (balanced FFE, true FISP, FIESTA) mit einem nahezu flußunabhängigen intrinsischen Myokard-Blut-Kontrast älteren Gradientenechotechniken vorzuziehen [28, 29]. Die Darstel-

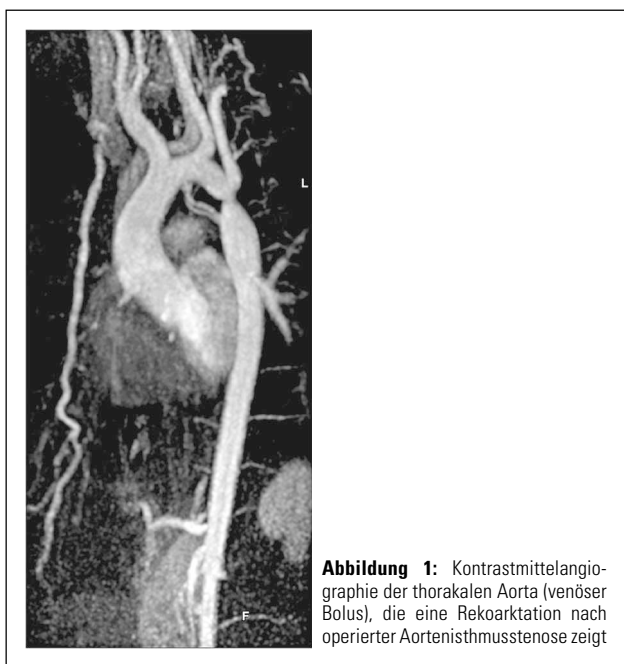


Abbildung 1: Kontrastmittelangiographie der thorakalen Aorta (venöser Bolus), die eine Rekoarktion nach operierter Aortenisthmusstenose zeigt

lung der Koronararterien und insbesondere der Wand der Herzkranzgefäße erfordert ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis und somit mindestens ein 1,5T-Gerät. Die Durchführung der Untersuchungen setzt insbesondere für die quantitative Auswertung Kenntnis und Erfahrung mit der Methode sowie Verständnis für den individuellen klinischen Hintergrund des kardiologischen Patienten voraus.

Die Untersuchung der Herzanatomie und -funktion mittels MRT gilt als Klasse-I-Indikation, wenn die Echokardiographie nicht aussagekräftig ist, sowie als Ersatz für eine Herzkatheteruntersuchung, wenn Druckmessungen nicht die entscheidende klinische Fragestellung sind [30]. Da der komplette rechte und linke Ventrikel in Kurzachsen darstellbar sind (Abb. 2), lassen sich Parameter wie Herzminutenvolumen und Ejektionsfraktion sowie Ventrikelvolumina während des gesamten Herzzyklus mit hervorragender Reproduzierbarkeit und Genauigkeit bestimmen [31, 32]. Es besteht eine gute Korrelation zu einer unter Optimalbedingungen durchgeführten Linksherz-Katheteruntersuchung [33]. In der Kombination mit quantitativer Flußbestimmung in den großen Gefäßen sind eine genaue Shunt-Diagnostik und die Bestimmung von Insuffizienzen aller Klappen über die Regurgitationsfraktion verfügbar. Das MRT kann hierfür als Goldstandard angesehen werden. Insbesondere in der Kinderkardiologie bietet die Quantifizierung der rechtsventrikulären und pulmonalvalvulären Funktion und Morphologie wertvolle Informationen mit einer nichtinvasiven Methode. Auch zur besseren Quantifizierung der diastolischen Funktion gibt es schon Ansätze [34–36], die Zeit-Volumen-Relationen untersuchen.

Für die Quantifizierung von Klappenstenosen stehen prinzipiell die Planimetrie [37] und Flußmessungen (Gorlin-Formel) zur Verfügung. Hier kann die MRT als Ausweichmethode dienen, die Quantifizierung von Klappenstenosen ist in der klinischen Routine jedoch sicher eine Domäne der Echokardiographie und des Herzkatheters. Bei Klappenabszessen kann die MRT allerdings wichtige Informationen

liefern, falls eine transösophageale Echokardiographie nicht durchgeführt werden kann.

Bei kardialen Raumforderungen bietet die MRT mit der Möglichkeit der gleichzeitigen Darstellung extrakardialer Strukturen einen klaren Vorteil. Eine Charakterisierung ist über Spinechosequenzen mit unterschiedlicher Kontrastgebung (Protonendichte, T1-, T2-Wichtung) sowie über eine Kontrastmittelaufnahme oftmals weiter möglich. Auch das Perikard kann so untersucht werden, um Hinweise auf eine Perikarditis zu erhalten. Zur Planung von kardialen Interventionen, wie z. B. PFO- oder ASD-Verschluß, liefert die MRT mit der Möglichkeit der beliebigen und reproduzierbaren Planung von Schnittebenen wichtige Zusatzinformationen [38].

Mit Belastungsuntersuchungen unter Verwendung von Dobutamin oder Adenosin ist eine Ischämiediagnostik durch Wandbewegungsanalyse [39, 40] oder durch die Messung der regionalen myokardialen Perfusion [41–43] möglich. Dies läßt sich auch in einem Untersuchungsprotokoll kombinieren. Ebenso ist eine Belastung mit einem speziellen Fahrradergometer prinzipiell möglich, jedoch noch nicht für die klinische Routine verfügbar. Für eine Streßuntersuchung muß die Möglichkeit einer kontinuierlichen Blutdruck-, EKG- und Puls-oxymetrie gegeben sein. Die Untersuchung der myokardialen First-Pass-Perfusion nach Bolusinjektion von Kontrastmittel (in der Regel mit Gadoliniumverbindungen wie Gd-DTPA oder Gd-BOPTA) läßt sich unter Adenosinbelastung unkompliziert und sicher durchführen. Die Beurteilung kann (mit geringen Einbußen bei der Sensitivität) rein visuell erfolgen. Abbildung 3 zeigt einen belastungsinduzierten Perfusionsdefekt anterolateral. Durch eine – etwas aufwendigere – semi-quantitative Auswertung unter Berücksichtigung der maximalen Signalanstiegssteilheit in Ruhe und unter Belastung kann die Perfusionsreserve für verschiedene Myokardsegmente bestimmt werden.

Mit Hilfe von kontrastmittelverstärkten Spätaufnahmen unter Verwendung einer „Inversion-Recovery-Technik“ [44]

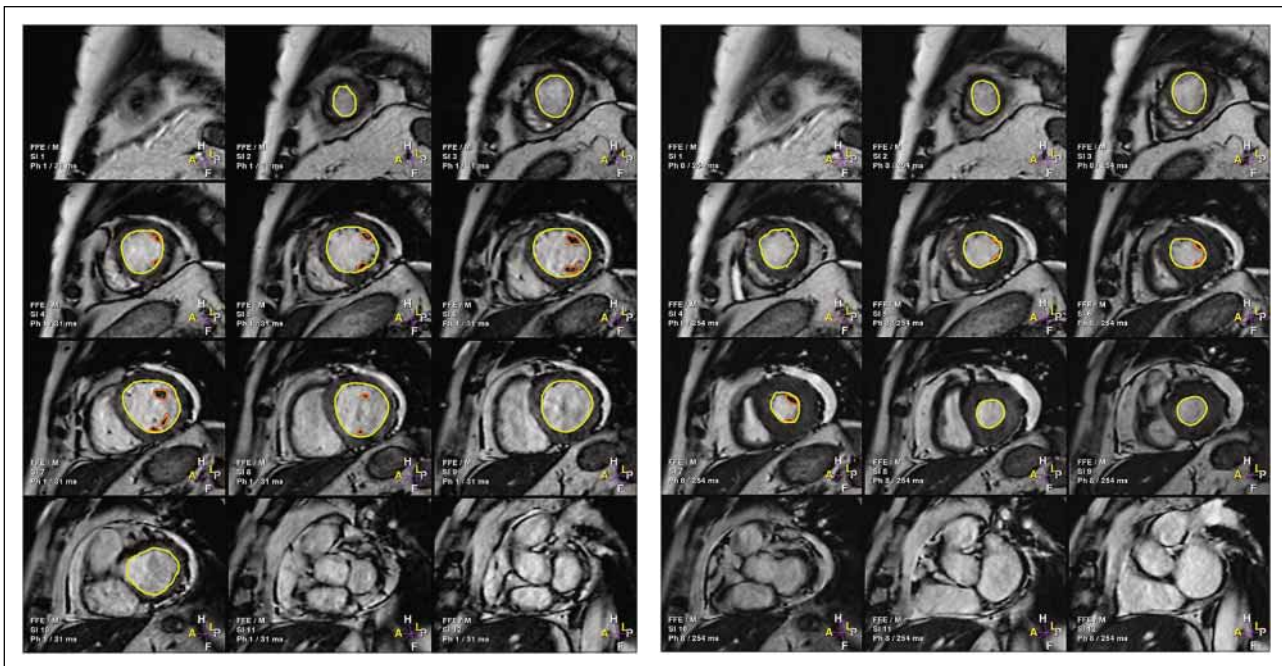


Abbildung 2: Systolische und diastolische Kurzachsenschnitte zur volumetrischen Funktionsbestimmung des linken Ventrikels mit endokardialen Konturen; dies ist analog auch rechtsventrikulär und mit epikardialen Konturen zur Bestimmung der Muskelmasse durchführbar.

gelingt die zuverlässige direkte Darstellung von Infarktmarken mit einer bislang nicht verfügbaren Ortsauflösung. Somit besteht die Möglichkeit der Vitalitätsdiagnostik durch eine Ruheuntersuchung und die Erkennung subendokardialer

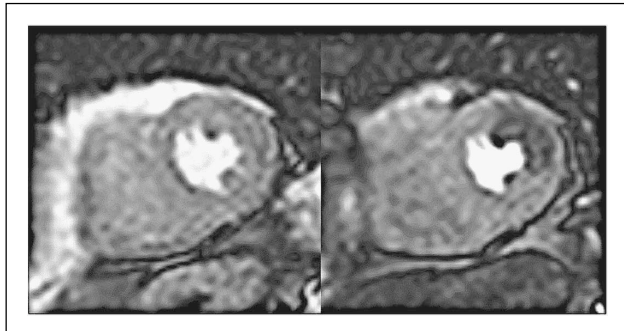


Abbildung 3: Belastungsinduzierter Perfusionsdefekt anterolateral (rechts) bei einer 90%igen Marginalaststenose in der First-Pass-Perfusion; **links:** Ruheuntersuchung, **rechts:** Adenosinbelastung; SSFP-Gradientenechosequenz mit schichtselektivem Vorpus

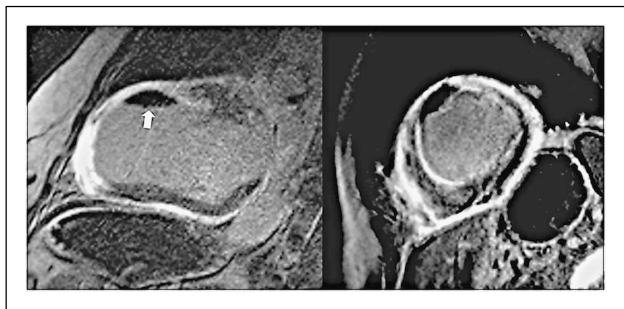


Abbildung 4: Kontrastmittelverstärkte Spätaufnahmen (Late Enhancement) im Zweikammerblick (**links**) und in einem medialen Kurzachsenschnitt (**rechts**) bei einer Patientin mit Dressler-Syndrom nach akutem Vorderwandinfarkt (signalintense Myokardareale); es sind eine deutliche zirkuläre Kontrastmittelaufnahme des Perikards sowie ein Thrombus an der medialen Vorderwand (Pfeil) erkennbar.

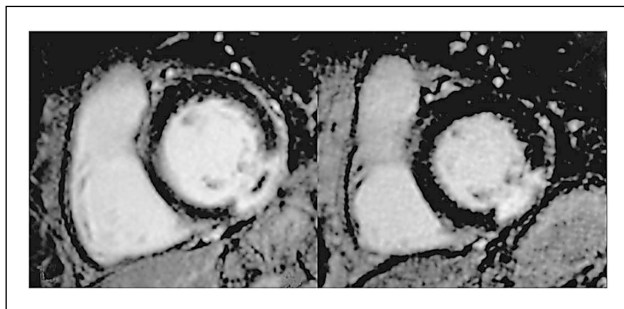


Abbildung 5: Kontrastmittelverstärkte Spätaufnahmen (Late Enhancement) in einem medialen Kurzachsenschnitt im Akutstadium (**links**) und 3 Monate später (**rechts**); im akuten Infarkt läßt sich mikrovaskuläre Obstruktion (dunkle, nicht perfundierte Bezirke innerhalb der Kontrastmittelaufnahme) nachweisen.

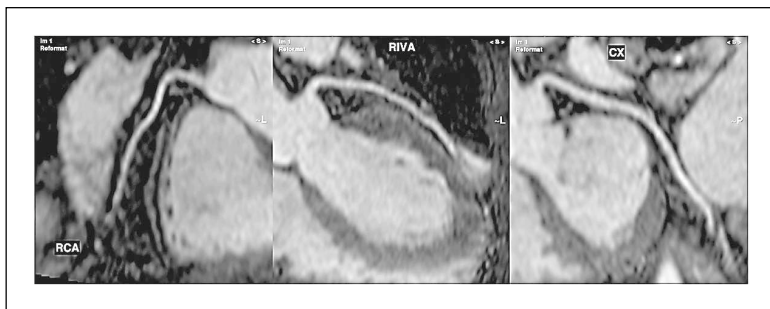


Abbildung 6: Multiplanare Reformatierungen eines 3D-SSFP-MR-Koronarangiographie-Datensatzes mit guter Darstellbarkeit der proximalen Koronarhauptäste

Infarktmarken. Die Methode beruht auf einem höheren Verteilungsvolumen für Gd-DTPA in akuten Infarktgebieten (Ödem und Zellschaden) sowie in chronischen Infarktmarken (größere interstitielle Matrix von Narbengewebe) und ist hervorragend tierexperimentell belegt [45–48]. Die Transmuralität einer Infarktmarken kann als Prädiktor für eine spätere Erholung der Kontraktilität nach Revaskularisation verwendet werden [49].

Infarktkomplikationen wie intraventrikuläre Thromben, rechtsventrikuläre Beteiligung, Perikarderguß oder Perikarditis (Abb. 4) und Aneurysmabildung lassen sich in demselben Untersuchungsgang mit hoher Genauigkeit erfassen. Abbildung 5 zeigt einen akuten Posterolateralinfarkt mit mikrovaskulärer Obstruktion innerhalb des Kontrastmittel-Enhancements sowie den Befund nach 3 Monaten. Erstere ist mit einer schlechteren Prognose des Patienten vergesellschaftet [50].

Der Stellenwert der MRT in der Myokarditisdiagnostik ist noch unklar. Es wird hier eine erhöhte Signalintensität in einer T2-Wichtung (Ödem) und Kontrastmittelaufnahme diskutiert [51–53]. Kardiomyopathien lassen sich morphologisch charakterisieren, ein fehlender Infarktmarkennachweis in den kontrastmittelverstärkten Spätaufnahmen macht eine z. B. ischämische Genese einer Kardiomyopathie unwahrscheinlich. Die Diagnose der arrhythmogenen rechtsventrikulären Kardiomyopathie läßt sich nicht allein mit der MRT stellen, sie bietet jedoch wertvolle Hinweise [54, 55]. So sind rechtsventrikuläre Dilatation, Wandausdünnung und insbesondere Mikroaneurysmen als sehr spezifisch anzusehen. Eine myokardiale Fetteinlagerung als klassischer Befund ist in Anbetracht einer dünnen rechtsventrikulären Wand oft schwierig nachzuweisen bzw. von epikardialen Fettgewebe zu differenzieren und nicht immer zu finden.

Die direkte Darstellung der proximalen Anteile der Koronararterien (MRCA) ist mit der MRT ohne Kontrastmitteldarstellung möglich [56–60]. Abbildung 6 zeigt einen Normalbefund. Im Vergleich zum MSCT ist mit der MRT durch segmentierte Aufnahmetechniken eine hohe zeitliche Auflösung von 50–80 ms realisierbar. Hierzu ist eine automatische Korrektur für die Atembewegung („Navigator“) notwendig, da sich mit der momentanen Technik in einer Atemanhaltung keine komplette Akquisition eines hochauflösenden Datensatzes mit einer hohen zeitlichen Auflösung realisieren läßt. Dies führt momentan noch zu relativ langen Untersuchungszeiten von ca. 6–10 Min. pro Koronarsystem. Sensitivität und Spezifität für die Erkennung einer Dreifäßerkrankung oder Hauptstammabeteiligung liegen relativ hoch, für einzelne Gefäße und die Peripherie ist diese Methode jedoch noch nicht in der klinischen Routine anwendbar [61]. Probleme bereiten auch

Patienten mit starken Herzrhythmusstörungen. Hier bieten neue Methoden wie die retrospektive Herzsynchronisation möglicherweise Verbesserungen. Potential für eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses, welches in eine höhere Auflösung oder kürzere Untersuchungszeit investiert werden kann, liegt in der Verwendung von 3T-Geräten [62] oder intravaskulären Kontrastmitteln [63–65]. Als eine klinische Indikation für eine MRCA kann die Klärung eines anomalen Koronararterienverlaufes (Abb. 7) oder die Diagnose von koronaren Aneurysmata bei Kawasaki [66] angesehen

werden. Die Darstellung des Verlaufes und der Offenheit von koronaren Bypässen gelingt im Vergleich zu nativen Koronargefäßen zuverlässiger, hier sind auch direkte Flußmessungen möglich [67–70].

Eine sehr vielversprechende Perspektive ist die koronare Plaquecharakterisierung [71], welche sich momentan noch im experimentellen Stadium befindet [72]. Hier bietet die MRT die Möglichkeit der Nutzung verschiedener Bildgebungssequenzen, die zu unterschiedlichem Gewebekontrast führen

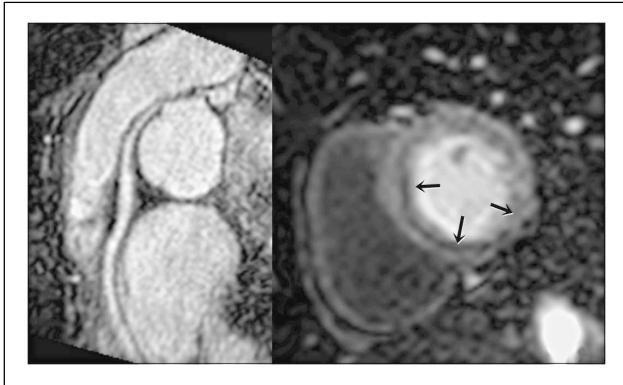


Abbildung 7: Koronaranomalie mit Abgang der rechten Kranzarterie aus dem linken Sinus valsalvae mit Verlauf zwischen Aorta und Pulmonalishauptstamm (links). Durch die Kompression kommt es zu einem unter Belastung verstärkten Perforationsdefekt im Versorgungsbereich (Pfeile)

und somit eine Plaquecharakterisierung erlauben. Diese wurde schon für die Karotiden gezeigt [73]. In Zukunft können möglicherweise auch an spezifische Antikörper gebundene Kontrastmittel zum Einsatz kommen [74].

Bezüglich einer Bewertung der Kosteneffizienz dieser relativ aufwendigen Methode muß in Betracht gezogen werden, daß in Zukunft immer mehr Komponenten der kardiologischen Funktionsdiagnostik in einen MRT-Untersuchungsgang zusammengeführt werden können [75]. Mit Platzangst ist bei entsprechender Patientenvorbereitung bei unter 3 % der Fälle zu rechnen. Hier bieten offene Magnetenkonzepte möglicherweise noch eine Verbesserung, auch im Hinblick auf mögliche interventionelle Anwendungen. Eine Limitation, die noch überwunden werden muß, ist die fehlende Untersuchungsmöglichkeit von Patienten mit Schrittmachern oder Defibrillatoren, die in weiterer Zukunft vor allem durch die Schrittmacher-/ICD-Gerätehersteller gelöst werden sollte.

■ Schlußfolgerung

Zusammenfassend ist die kardiale Magnetresonanztomographie aufgrund ihres nichtinvasiven Charakters, ihrer hohen Ortsauflösung und der Möglichkeit der Darstellung von Nachbarstrukturen als das vielversprechendste kardiologische bildgebende Verfahren der Zukunft anzusehen.

Literatur

- Dolan MS, Riad K, El Shafei A, Puri S, Tamirisa K, Bierig M, St Vrain J, McKinney L, Havens E, Habermehl K, Pyatt L, Kern M, Labovitz AJ. Effect of intravenous contrast for left ventricular opacification and border definition on sensitivity and specificity of dobutamine stress echocardiography compared with coronary angiography in technically difficult patients. *Am Heart J* 2001; 142: 908–15.
- Thanigaraj S, Nease RF Jr, Schechtman KB, Wade RL, Loslo S, Perez JE. Use of contrast for image enhancement during stress echo-cardiography is cost-effective and reduces additional diagnostic testing. *Am J Cardiol* 2002; 89: 1430–2.
- Lambertz H, Schuhmacher U, Tries HP, Stein T. Signal improvement of pulmonary venous Doppler flow profile after intravenous injection of levovist. *Z Kardiol* 1997; 86: 839–47.
- Ellahham S, Hausnerova E, Gottdiener J. Intravenous Optison (FS069) enhances pulmonary vein flow velocity signals: a multicenter study. *Clin Cardiol* 2000; 23: 91–5.
- Becher H. Contrast echocardiography: clinical applications and future prospects. *Herz* 2002; 27: 201–16.
- Ward RP, Lang RM. Myocardial contrast echocardiography in acute coronary syndromes. *Curr Opin Cardiol* 2002; 17: 455–63.
- Waggoner AD, Bierig SM. Tissue Doppler imaging: a useful echocardiographic method for the cardiac sonographer to assess systolic and diastolic ventricular function. *J Am Soc Echocardiogr* 2001; 14: 1143–52.
- Nair A, Kuban BD, Tuzcu EM, Schoenhagen P, Nissen SE, Vince DG. Coronary plaque classification with intravascular ultrasound radiofrequency data analysis. *Circulation* 2002; 106: 2200–6.
- Maehara A, Mintz GS, Bui AB, Walter OR, Castagna MT, Canos D, Pichard AD, Satler LF, Waksman R, Suddath WO, Laird JR Jr, Kent KM, Weissman NJ. Morphologic and angiographic features of coronary plaque rupture detected by intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2002; 40: 904–10.
- de Korte CL, Sierevogel MJ, Mastik F, Strijder C, Schaar JA, Velema E, Pasterkamp G, Serruys PW, van der Steen AF. Identification of atherosclerotic plaque components with intravascular ultrasound elastography in vivo: a Yucatan pig study. *Circulation* 2002; 105: 1627–30.
- Okura H, Hayase M, Shimodono S, Bonneau HN, Yock PG, Fitzgerald PJ. Impact of pre-interventional arterial remodeling on subsequent vessel behavior after balloon angioplasty: a serial intravascular ultrasound study. *J Am Coll Cardiol* 2001; 38: 2001–5.
- Grube E, Gerckens U, Buellfeld L, Fitzgerald PJ. Images in cardiovascular medicine. Intracoronary imaging with optical coherence tomography: a new high-resolution technology providing striking visualization in the coronary artery. *Circulation* 2002; 106: 2409–10.
- Jang IK, Bouma BE, Kang DH, Park SJ, Park SW, Seung KB, Choi KB, Shishkov M, Schlendorf K, Pomerantsev E, Houser SL, Aretz HT, Tearney GJ. Visualization of coronary atherosclerotic plaques in patients using optical coherence tomography: comparison with intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2002; 39: 604–9.
- Jang IK, Tearney G, Bouma B. Visualization of tissue prolapse between coronary stent struts by optical coherence tomography: comparison with intravascular ultrasound. *Circulation* 2001; 104: 2754.
- Lipton MJ, Higgins CB, Farmer D, Boyd DP. Cardiac imaging with a high-speed Cine-CT Scanner: preliminary results. *Radiology* 1984; 152: 579–82.
- Becker CR, Kleff T, Crispin A, Knez A, Young J, Schoepf UJ, Haberl R, Reiser MF. Coronary artery calcium measurement: agreement of multirow detector and electron beam CT. *Am J Roentgenol* 2001; 176: 1295–8.
- Achenbach S, Giesler T, Ropers D, Ulzheimer S, Derlien H, Schulte C, Wenkel E, Moshage W, Bautz W, Daniel WG, Kalender WA, Baum U. Detection of coronary artery stenoses by contrast-enhanced, retrospectively electrocardiographically-gated, multislice spiral computed tomography. *Circulation* 2001; 103: 2535–8.
- Heuschmid M, Kuttner A, Flohr T, Wildberger JE, Leil M, Kopp AF, Schroder S, Baum U, Schaller S, Hartung A, Ohnesorge B, Claussen CD. Visualization of coronary arteries in CT as assessed by a new 16 slice technology and reduced gantry rotation time: first experiences. *Rof Fortschr Geb Röntgenstr Neuen Bildgeb Verfahr* 2002; 174: 721–4.
- Budoff MJ, Georgiou D, Brody A, Agatston AS, Kennedy J, Wolfkiel C, Stanford W, Shields P, Lewis RJ, Janowitz WR, Rich S, Brundage BH. Ultrafast computed tomography as a diagnostic modality in the detection of coronary artery disease: a multicenter study. *Circulation* 1996; 93: 898–904.
- Budoff MJ, Diamond GA, Raggi P, Arad Y, Guerci AD, Callister TQ, Berman D. Continuous probabilistic prediction of angiographically significant coronary artery disease using electron beam tomography. *Circulation* 2002; 105: 1791–6.
- Arad Y, Spadaro LA, Goodman K, Newstein D, Guerci AD. Prediction of coronary events with electron beam computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2000; 36: 1253–60.
- Achenbach S, Ropers D, Pohle K, Leber A, Thilo C, Knez A, Menendez T, Maefert R, Kusus M, Regenfus M, Bickel A, Haberl R, Steinbeck G, Moshage W, Daniel WG. Influence of lipid-lowering therapy on the progression of coronary artery calcification: a prospective evaluation. *Circulation* 2002; 106: 1077–82.
- O'Rourke RA, Brundage BH, Froelicher VF, Greenland P, Grundy SM, Hachamovitch R, Pohost GM, Shaw LJ, Weintraub WS, Winters WL Jr, Forrester JS, Douglas PS, Faxon DP, Fisher JD, Gregoratos G, Hochman JS, Hutter AM Jr, Kaul S, Wolk MJ. American College of Cardiology/American Heart Association Expert Consensus document on electron-beam computed tomography for the diagnosis and prognosis of coronary artery disease. *Circulation* 2000; 102: 126–40.
- Greenland P, Abrams J, Aurigemma GP, Bond MG, Clark LT, Criqui MH, Crouse JR III, Friedman L, Fuster V, Herrington DM, Kuller LH, Ridker PM, Roberts WC, Stanford W, Stone N, Swan HJ, Taubert KA, Wexler L. Prevention Conference V: Beyond secondary prevention: identifying the high-risk patient for primary prevention: noninvasive tests of atherosclerotic burden: Writing Group III. *Circulation* 2000; 101: E16–E22.
- Kopp AF, Schroeder S, Baumbach A, Kuettner A, Georg C, Ohnesorge B, Heuschmid M, Kuzo R, Claussen CD. Non-invasive characterisation of coronary lesion morphology and composition by multislice CT: first results in comparison with intracoronary ultrasound. *Eur Radiol* 2001; 11: 1607–11.
- Waterton JC, Jenkins JP, Zhu XP, Love HG, Isherwood I, Rowlands DJ. Magnetic resonance (MR) cine imaging of the human heart. *Br J Radiol* 1985; 58: 711–6.
- Sechtem U, Pflugfelder PW, White RD, Gould RG, Holt W, Lipton MJ, Higgins CB. Cine MR imaging: potential for the evaluation of cardiovascular function. *Am J Roentgenol* 1987; 148: 239–46.
- Barkhausen J, Ruehm SG, Goyen M, Buck T, Laub G, Debatin JF. MR evaluation of ventricular function: true fast imaging with steady-state precession versus fast low-angle shot cine MR imaging: feasibility study. *Radiology* 2001; 219: 264–9.
- Thiele H, Nagel E, Paetsch I, Schnackenburg B, Bornstedt A, Kouwenhoven M, Wahl A, Schuler G, Fleck E. Functional cardiac MR imaging with steady-state free precession (SSFP) significantly improves endocardial border delineation without contrast agents. *J Magn Reson Imaging* 2001; 14: 362–7.
- Task Force of the European Society of Cardiology. The clinical role of magnetic resonance in cardiovascular disease. *Eur Heart J* 1998; 19: 19–39.
- Mogelvang J, Lindvig K, Sondergaard L, Saunamäki K, Henriksen O. Reproducibility of cardiac volume measurements including left ventricular mass determined by MRI. *Clin Physiol* 1993; 13: 587–97.
- Bellenger NG, Davies LC, Francis JM, Coats AJ, Pennell DJ. Reduction in sample size for studies of remodeling in heart failure by the use of cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson* 2000; 2: 271–8.
- Grebe O, Kestler HA, Merkle N, Wöhrle J, Kuchs M, Höher M, Hombach V. Assessment of left ventricular function with steady-state-free-precession magnetic resonance imaging: reference values and a comparison to left ventriculography. *Am J Cardiol* 2003; Submitted.
- Grebe O, Höher M, Neumann H, Wöhrle J, Palm G, Hombach V, Kestler HA. New markers for diastolic function by cardiac magnetic resonance imaging. *IEEE Comput Cardiol* 2001; 28: 625–8.

35. Grebe O, Lehn M, Neumann H, Schwenker F, Wöhrle J, Höher M, Hombach V, Kestler HA. Parameters for characterizing diastolic function with cardiac magnetic resonance imaging. *IEEE Comput Cardiol* 2002; 29: 185–8.
36. Paelinck BP, Lamb HJ, Bax JJ, van der Wall EE, de Roos A. Assessment of diastolic function by cardiovascular magnetic resonance. *Am Heart J* 2002; 144: 198–205.
37. Friedrich MG, Schulz-Menger J, Poetsch T, Pilz B, Uhlich F, Dietz R. Quantification of valvular aortic stenosis by magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 2002; 144: 329–34.
38. Grebe O, Giesler M, Kestler HA, Hombach V, Hoher M. Magnetic resonance imaging after percutaneous closure of a patent foramen ovale. *Circulation* 2001; 104: E117–E118.
39. Nagel E, Lehmkuhl HB, Bocksch W, Klein C, Vogel U, Frantz E, Elmer A, Dreyse S, Fleck E. Noninvasive diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high-dose dobutamine stress MRI: comparison with dobutamine stress echocardiography. *Circulation* 1999; 99: 763–70.
40. Hundley WG, Hamilton CA, Thomas MS, Herrington DM, Salido TB, Kitzman DW, Little WC, Link KM. Utility of fast cine magnetic resonance imaging and display for the detection of myocardial ischemia in patients not well suited for second harmonic stress echocardiography. *Circulation* 1999; 100: 1697–702.
41. Al Saadi N, Nagel E, Gross M, Bornstedt A, Schnackenburg B, Klein C, Klimek W, Oswald H, Fleck E. Noninvasive detection of myocardial ischemia from perfusion reserve based on cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2000; 101: 1379–83.
42. Schwittler J, Nanz D, Kneifel S, Bertschinger K, Buchi M, Knusel PR, Marincek B, Luscher TF, von Schulthess GK. Assessment of myocardial perfusion in coronary artery disease by magnetic resonance: a comparison with positron emission tomography and coronary angiography. *Circulation* 2001; 103: 2230–5.
43. Wilke NM, Jerosch-Herold M, Zenovich A, Stillman AE. Magnetic resonance first-pass myocardial perfusion imaging: clinical validation and future applications. *J Magn Reson Imaging* 1999; 10: 676–85.
44. Simonetti OP, Kim RJ, Fieno DS, Hillenbrand HB, Wu E, Bundy JM, Finn JP, Judd RM. An improved MR imaging technique for the visualization of myocardial infarction. *Radiology* 2001; 218: 215–23.
45. Judd RM, Lugo-Olivieri CH, Arai M, Kondo T, Croisille P, Lima JA, Mohan V, Becker LC, Zerhouni EA. Physiological basis of myocardial contrast enhancement in fast magnetic resonance images of 2-day-old reperfused canine infarcts. *Circulation* 1995; 92: 1902–10.
46. Wu KC, Zerhouni EA, Judd RM, Lugo-Olivieri CH, Barouch LA, Schulman SP, Blumenthal RS, Lima JA. Prognostic significance of microvascular obstruction by magnetic resonance imaging in patients with acute myocardial infarction. *Circulation* 1998; 97: 765–72.
47. Kim RJ, Fieno DS, Parrish TB, Harris K, Chen EL, Simonetti O, Bundy J, Finn JP, Klocke FJ, Judd RM. Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. *Circulation* 1999; 100: 1992–2002.
48. Kim RJ, Wu E, Rafael A, Chen EL, Parker MA, Simonetti O, Klocke FJ, Bonow RO, Judd RM. The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *N Engl J Med* 2000; 343: 1445–53.
49. Kim RJ, Hillenbrand HB, Judd RM. Evaluation of myocardial viability by MRI. *Herz* 2000; 25: 417–30.
50. Wu KC, Kim RJ, Bluemke DA, Rochitte CE, Zerhouni EA, Becker LC, Lima JA. Quantification and time course of microvascular obstruction by contrast-enhanced echocardiography and magnetic resonance imaging following acute myocardial infarction and reperfusion. *J Am Coll Cardiol* 1998; 32: 1756–64.
51. Friedrich MG, Strohm O, Schulz-Menger J, Marciniak H, Luft FC, Dietz R. Contrast media-enhanced magnetic resonance imaging visualizes myocardial changes in the course of viral myocarditis. *Circulation* 1998; 97: 1802–9.
52. Roditi GH, Hartnell GG, Cohen MC. MRI changes in myocarditis-evaluation with spin echo, cine MR angiography and contrast enhanced spin echo imaging. *Clin Radiol* 2000; 55: 752–8.
53. Gagliardi MG, Polletta B, Di Renzi P. MRI for the diagnosis and follow-up of myocarditis. *Circulation* 1999; 99: 458–9.
54. Kayser HW, van der Wall EE, Sivananthan MU, Plein S, Bloomer TN, de Roos A. Diagnosis of arrhythmogenic right ventricular dysplasia: a review. *Radiographics* 2002; 22: 639–48.
55. Midiri M, Finazzo M. MR imaging of arrhythmogenic right ventricular dysplasia. *Int J Card Imaging* 2001; 17: 297–304.
56. Manning WJ, Stuber M, Danias PG, Botnar RM, Yeon SB, Aepfelbacher FC. Coronary magnetic resonance imaging: Current status. *Curr Probl Cardiol* 2002; 27: 275–333.
57. Stuber M, Botnar RM, Kissinger KV, Manning WJ. Free-breathing black-blood coronary MR angiography: initial results. *Radiology* 2001; 219: 278–83.
58. Botnar RM, Stuber M, Danias PG, Kissinger KV, Manning WJ. A fast 3D approach for coronary MRA. *J Magn Reson Imaging* 1999; 10: 821–5.
59. Botnar RM, Stuber M, Danias PG, Kissinger KV, Manning WJ. Improved coronary artery definition with T2-weighted, free-breathing, three-dimensional coronary MRA. *Circulation* 1999; 99: 3139–48.
60. Spuentrup E, Bornert P, Botnar RM, Groen JP, Manning WJ, Stuber M. Navigator-gated free-breathing three-dimensional balanced fast field echo (TrueFISP) coronary magnetic resonance angiography. *Invest Radiol* 2002; 37: 637–42.
61. Kim WS, Yeon KM, Kim I, Han MC, Chi JG. Radiological evaluation of pulmonary vein obstruction including two examinations by magnetic resonance imaging. *Pediatr Radiol* 1993; 23: 6–11.
62. Stuber M, Botnar RM, Fischer SE, Lamerichs R, Smink J, Harvey P, Manning WJ. Preliminary report on in vivo coronary MRA at 3 Tesla in humans. *Magn Reson Med* 2002; 48: 425–9.
63. Klein C, Nagel E, Schnackenburg B, Bornstedt A, Schalla S, Hoffmann V, Lehning A, Fleck E. The intravascular contrast agent Clariscan (NC 100150 injection) for 3D MR coronary angiography in patients with coronary artery disease. *MAGMA* 2000; 11: 65–7.
64. Sandstede JJ, Pabst T, Wacker C, Wiesmann F, Hoffmann V, Beer M, Kenn W, Bauer W, Hahn D. Breath-hold 3D MR coronary angiography with a new intravascular contrast agent (feruglose) – first clinical experiences. *Magn Reson Imaging* 2001; 19: 201–5.
65. Stuber M, Botnar RM, Danias PG, McConnell MV, Kissinger KV, Yucel EK, Manning WJ. Contrast agent-enhanced, free-breathing, three-dimensional coronary magnetic resonance angiography. *J Magn Reson Imaging* 1999; 10: 790–9.
66. Greil GF, Stuber M, Botnar RM, Kissinger KV, Geva T, Newburger JW, Manning WJ, Powell AJ. Coronary magnetic resonance angiography in adolescents and young adults with Kawasaki disease. *Circulation* 2002; 105: 908–11.
67. Langerak SE, Kunz P, Vliegen HW, Jukema JW, Zwinderman AH, Steendijk P, Lamb HJ, van der Wall EE, de Roos A. MR flow mapping in coronary artery bypass grafts: a validation study with Doppler flow measurements. *Radiology* 2002; 222: 127–35.
68. Langerak SE, Vliegen HW, de Roos A, Zwinderman AH, Jukema JW, Kunz P, Lamb HJ, Der Wall EE. Detection of vein graft disease using high-resolution magnetic resonance angiography. *Circulation* 2002; 105: 328–33.
69. Ishida N, Sakuma H, Cruz BP, Shimono T, Tokui T, Yada I, Takeda K, Higgins CB. MR flow measurement in the internal mammary artery-to-coronary artery bypass graft: comparison with graft stenosis at radiographic angiography. *Radiology* 2001; 220: 441–7.
70. Voigtlander T, Kreitner KF, Wittlinger T, Petersen S, Horstick G, Kalden P, Meyer J. MR angiography and flow measurement in coronary arteries and coronary bypass grafts. *Z Kardiol* 2001; 90: 929–38.
71. Fayad ZA, Fuster V, Nikolaou K, Becker C. Computed tomography and magnetic resonance imaging for noninvasive coronary angiography and plaque imaging: current and potential future concepts. *Circulation* 2002; 106: 2026–34.
72. Botnar RM, Stuber M, Kissinger KV, Kim WY, Spuentrup E, Manning WJ. Noninvasive coronary vessel wall and plaque imaging with magnetic resonance imaging. *Circulation* 2000; 102: 2582–7.
73. Cai JM, Hatsukami TS, Ferguson MS, Small R, Polissar NL, Yuan C. Classification of human carotid atherosclerotic lesions with in vivo multicontrast magnetic resonance imaging. *Circulation* 2002; 106: 1368–73.
74. Johnstone MT, Botnar RM, Perez AS, Stewart R, Quist WC, Hamilton JA, Manning WJ. In vivo magnetic resonance imaging of experimental thrombosis in a rabbit model. *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 2001; 21: 1556–60.
75. Plein S, Ridgway JP, Jones TR, Bloomer TN, Sivananthan MU. Coronary artery disease: assessment with a comprehensive MR imaging protocol-initial results. *Radiology* 2002; 225: 300–7.

Mitteilungen aus der Redaktion

Besuchen Sie unsere Rubrik

☒ Medizintechnik-Produkte



Neues CRT-D Implantat
Intica 7 HF-T QP von Biotronik



Artis pheno
Siemens Healthcare Diagnostics GmbH



Philips Azurion:
Innovative Bildgebungslösung

Aspirator 3
Labotect GmbH



InControl 1050
Labotect GmbH

e-Journal-Abo

Beziehen Sie die elektronischen Ausgaben dieser Zeitschrift hier.

Die Lieferung umfasst 4–5 Ausgaben pro Jahr zzgl. allfälliger Sonderhefte.

Unsere e-Journale stehen als PDF-Datei zur Verfügung und sind auf den meisten der marktüblichen e-Book-Readern, Tablets sowie auf iPad funktionsfähig.

☒ Bestellung e-Journal-Abo

Haftungsausschluss

Die in unseren Webseiten publizierten Informationen richten sich **ausschließlich an geprüfte und autorisierte medizinische Berufsgruppen** und entbinden nicht von der ärztlichen Sorgfaltspflicht sowie von einer ausführlichen Patientenaufklärung über therapeutische Optionen und deren Wirkungen bzw. Nebenwirkungen. Die entsprechenden Angaben werden von den Autoren mit der größten Sorgfalt recherchiert und zusammengestellt. Die angegebenen Dosierungen sind im Einzelfall anhand der Fachinformationen zu überprüfen. Weder die Autoren, noch die tragenden Gesellschaften noch der Verlag übernehmen irgendwelche Haftungsansprüche.

Bitte beachten Sie auch diese Seiten:

[Impressum](#)

[Disclaimers & Copyright](#)

[Datenschutzerklärung](#)