

Magnetresonanztomographie (MRT): Stellenwert in der kardialen Diagnostik

W. R. Bauer

Kardiologie, Radiologie

Schlüsselwörter

- ▶ Magnetresonanztomographie
- ▶ koronare Herzkrankheit
- ▶ Stress-MRT
- ▶ Myokard-Perfusion

Key words

- ▶ magnetic resonance tomography
- ▶ coronary heart disease
- ▶ stress MRT
- ▶ myocardial perfusion

eingereicht 19.12.2007

akzeptiert 1.2.2008

Institut

Medizinische Klinik und Poliklinik I der Universität Würzburg

Bibliografie

DOI 10.1055/s-2008-1067302
Dtsch Med Wochenschr 2008; 133: 654–657 · © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York · ISSN 0012-0472

Korrespondenz

Prof. Dr. med. Dr. rer. nat.

Wolfgang Rudolf Bauer

Medizinische Klinik und Poliklinik I der Universität Würzburg
Josef-Schneider-Str. 2
97080 Würzburg
Tel. 0931/201-36327
Fax 0931/201-36291
eMail bauer_w@klinik.uni-wuerzburg.de

Einleitung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) darf heute und vor allem für die Zukunft als eines der wichtigsten Bildgebungsverfahren angesehen werden: Zum einen sind nach dem derzeitigen Wissensstand bei Beachtung der Kontraindikationen keine Nebenwirkungen zu erwarten, zum anderen erhält man – wie bei keinem anderen Bildgebungsverfahren – sowohl morphologische als auch funktionelle Informationen. Diese Vorteile spiegeln sich auch in den exponentiell steigenden Untersuchungszahlen wider. Auch in der Kardiologie hat die MRT ihren Stellenwert erobert, was in einem kürzlich erschienenen Positionspapier der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz und Kreislaufforschung [13] berücksichtigt wurde. Allerdings fehlen große randomisierte Studien und Metaanalysen, wobei hier sicherlich deren längerfristig angelegter Charakter und der rasante technische Fortschritt kollidieren. Der Mangel an Evidenz wurde berücksichtigt, indem die diagnostische Wertigkeit wie folgt beurteilt wurde:

1. Vorliegen einer robusten und reproduzierbaren Technik,
2. relevante klinische Ergebnisse in der wissenschaftlichen Literatur,
3. Autorenkonsens unter Berücksichtigung der Indikationswertung des *American College of Cardiology Foundation* und des *American College of Radiology* [4].

Analyse von Morphologie und Funktion

Die Stärke der MRT ist sicherlich die qualitative und vor allem quantitative Analyse der Morphologie und Funktion (▶ **Abb. 1**). Dies kommt nicht nur dem einzelnen Patienten zugute, sondern erweist sich auch als enormer Vorteil in der Durchführung von Studien. So liegt nach Metaanalysen bei der myokardialen Masse die Intraobservervariabilität bei weniger als 4,8 g; die Interobservervariabilität ist geringer als 9 g [12]. Will man z. B. im Rahmen einer medikamentösen Studie mit Zielparame- ter Myokardmasse eine Massendifferenz von 10 g bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% als signifikant erfassen, dann benötigt man mit dem MRT lediglich 23, mit dem 2D Echo jedoch 136 Patienten. Auch bei angeborenen Herzerkrankungen ist die MRT das Verfahren der Wahl zur Beurteilung von Fehlbildungen und deren funktionellen Auswirkungen (Shunts, Flüsse). Allerdings ist im Kindesalter immer auch die Anforderungen an eine optimale Überwachung, z. B. bei Sedation, zu berücksichtigen.

kurzgefasst

Die kardiale MRT ist heute der Goldstandard bei der Beurteilung der Morphologie und Funktion des Herzens.

Ischämische Herzerkrankung

Aufgrund ihrer Häufigkeit ist die ischämische Herzerkrankung für die Bewertung aller kardiologisch-diagnostischer Verfahren die größte Herausforderung. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die invasive Koronarangiographie eigentlich keine Ischämieinformation enthält, sind hier die nicht-invasiven Verfahren gefordert.

Stress-MRT

Die MRT kann ähnlich wie ein Stressecho eingesetzt werden [15]. Unter Stress (meist Dobutamin-induziert) treten entsprechend der Ischämiekaskade regionale Wandbewegungsstörungen in ischämischen Arealen vor den EKG-Veränderungen bzw. vor einer Angina pectoris auf (▶ **Abb. 2**). Der Vorteil gegenüber dem Echo ist die deutlich besser Bildqualität, was sich in einer besseren Sensitivität (86 vs. 74%) und Spezifität (86 vs. 70%) zeigt [14]. Ein Nachteil des MRT ist, dass aufgrund des hydromagnetischen Effektes die ST-Strecke verändert sein kann, was die Beurteilung potentieller Ischämien erschwert.

First-pass-Perfusionmessung

Eine andere in der klinischen MRT verwendete Methode, um potentiell ischämische Areale nachzuweisen, beurteilt die Myokardperfusion [3]: Nach Applikation eines MR-Kontrastmittels wird dessen Anfluten („first pass“) im linksventrikulären Myokard semiquantitativ mit der Perfusion in Beziehung gesetzt. Messungen werden unter Ruhebedingung und Vasodilatation (heute meist Adenosin) durchgeführt. Minderperfundierte Areale zeigen ein verzögertes Anfluten des Kontrastmittels, erscheinen also auf den Bildern dunkel (▶ **Abb. 2**). Ein Vergleich der semiquantitativen MR-Perfusionsmessung mit dem Goldstandard Positronen-Emissionstomographie zeigte eine sehr gute Übereinstimmung beider Verfahren [16].

MR-Koronarangiographie

Die Koronarangiographie mittels MRT ist aufgrund des technischen Fortschritts in den letzten Jahren deutlich besser geworden, und auch kleinere Äste können beurteilt werden (▶ **Abb. 3**). Navigator-Techniken erlauben dem Patienten sogar, frei zu atmen.

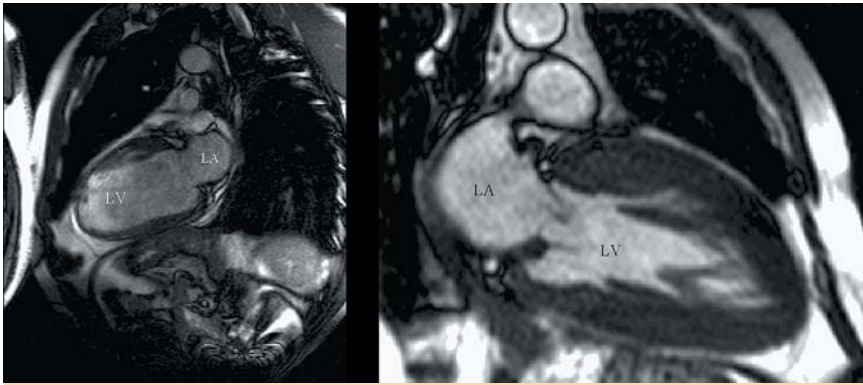


Abb. 1 Dilatative (links) und hypertrophe (rechts) Kardiomyopathie. LV: linker Ventrikel, LA: linker Vorhof.

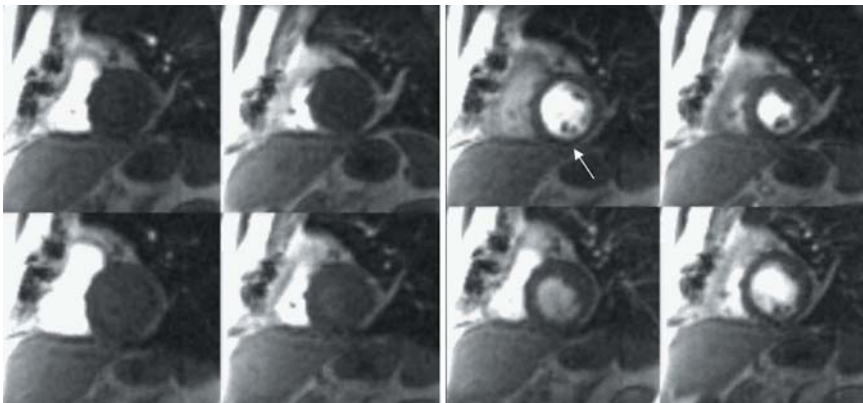


Abb. 2 First-pass-Perfusionsmessung in vier Kurzachsenschnitten. Links ist das Anfluten (hell) des MR Kontrastmittels im rechten Ventrikel zu sehen, rechts ist es bereits im linken Ventrikel bzw. Myokard angekommen. Posterior erscheint das Myokard aufgrund eines verzögerten Anflutens dunkler (Pfeil), was mit dem angiographischen Befund einer Engstelle der rechten Kranzarterie übereinstimmt.

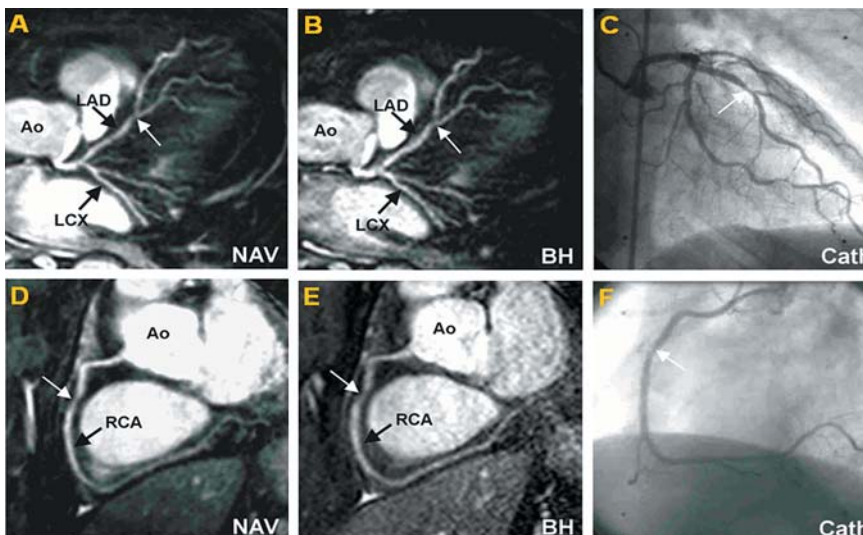


Abb. 3 MR-Koronarangiographie der linken (oben) und rechten (unten) Kranzarterie. Die linken MR-Angiogramme (A, D) sind bei freier Atmung mittels Navigator-Techniken erstellt worden und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Aufnahmen unter Anhalten der Atmung (B, E). Ein Vergleich mit konventionellen Röntgenangiogrammen (C, F) zeigt einerseits wie hoch auflösend die MR-Bilder sind, zum anderen sind die auch hier eher moderaten Verengungen der Kranzgefäße (weiße Pfeile) zu erkennen (nach [6]).

Allerdings ist die MR-Koronarangiographie noch lange nicht in der Lage, die invasive konventionelle Angiographie abzulösen. Der positive prädiktive Wert liegt bei 42%

[7], d.h. häufig wird eine vermeintliche Engstelle gesehen, die aber keine ist. Sieht man keine Engstelle, dann liegt aufgrund des hohen negativen prädiktiven Werts

von 93% [7] wahrscheinlich auch keine vor. Wichtig ist, dass das 16-Zeilen-CT in einem direkten Vergleich auch nicht wesentlich bessere Werte erbrachte [7]. Obwohl das 64-Zeilen-CT bessere Ergebnisse als das 16-Zeilen-CT liefert [10], sind die Vergleiche MR versus CT bei der Koronarangiographie problematisch, da auf beiden Seiten die Technologie rasant voranschreitet und die Durchführung einer Studie in der **high-end**-Geräte beider Verfahren verglichen werden, extrem erschwert ist.

Vitalitätsdiagnostik

Entscheidend bei einer ischämischen Herzkrankung ist, ob schlecht kontrahierendes Gewebe, das von verengten Kranzgefäßen versorgt wird, überhaupt noch vital ist, also aus Muskelgewebe besteht, oder ob nur noch Narbengewebe vorliegt. Nur im ersten Fall würde man eine Intervention oder Revaskularisation anstreben, um die Leistungsfähigkeit des Herzens zu verbessern. Vor der MRT hatte man nur nuklearmedizinische Verfahren zur Verfügung, die einerseits eine geringe räumliche Auflösung hatten, andererseits wie die Positronen-Emissionstomographie teilweise über-sensitiv waren. Grundlage für die Vitalitätsbildung mittels MRT ist die unterschiedliche Gewebetextur von Muskel und Narbe [9, 18]. Letztere besitzt im Vergleich zum Herzmuskel einen viel größeren Extrazellulärraum. Dieser ist aber genau das Verteilungsvolumen der üblichen MR-Kontrastmittel, z.B. Gd-Chelate. Appliziert man Kontrastmittel, dann verteilt sich dieses im Extrazellulärraum. Da dieser im Muskelgewebe klein ist, wird es wieder schnell ausgewaschen, wohingegen es im Narbengewebe verbleibt. Es resultiert das sogenannte „late enhancement“, d.h. Narbengewebe stellt sich im Vergleich zum Muskelgewebe signalreich dar (▶ Abb. 4).

Seine hohe klinische Implikation konnte das „late enhancement“ in einer Studie von Kim et al. [8] demonstrieren. Hier wurde die mechanische Erholung von schlecht kontrahierendem Herzgewebe in Beziehung zum Ausmaß des „late enhancement“ gesetzt. Es zeigte sich, dass sich bei einem „late enhancement“-Anteil von mehr als 50% der Herzwand, 90% der Segmente nach Revaskularisation nicht mehr erholten (▶ Abb. 5), d.h. man hat einen guten Schwellwert für die Entscheidung zur Intervention/Operation.

In ▶ Abb. 6 (Vorschlag für ein Untersuchungsprotokoll) und Tab. 1 sind einige dieser Aspekte zusammengefasst.

Tab. 1 Stellenwert der MRT bei der ischämischen Herzerkrankung im Vergleich zu anderen Untersuchungsmodalitäten. Entscheidend ist, dass das MRT eine Vielzahl von Informationen in guter bis sehr guter Qualität in einem Untersuchungsgang enthält.

| | MRT | Echokardiographie* | KardioCT | Nuklearmedizin | Herzkatheter |
|----------------------|-----|-----------------------|----------|----------------|---------------------|
| Morphologie | ++ | + | +/0 | +/0 | + |
| mechanische Funktion | ++ | ++ | +/0 | +/0 | + |
| Durchblutung | + | noch in der Erprobung | 0 | + bis ++ | 0 |
| Vitalität | ++ | + | 0 | + bis ++ | 0 |
| Koronarstatus | + | 0 | + bis ++ | 0 | ++, ** Goldstandard |
| Strahlenbelastung | 0 | 0 | + | + | + |

*Voraussetzung: gute Schallbarkeit. ** Es besteht die Möglichkeit zur therapeutischen Intervention

kurzgefasst

Die ischämische Herzerkrankung ist ein gutes Beispiel für die Fülle an relevanten Informationen, die man über die MRT erhalten kann. Dies reicht von der Ischämiediagnostik über die Darstellung der Kranzgefäße bis zum Vitalitätsnachweis.

siert, sondern eher fleckförmig oder ringförmig in der Mitte der linksventrikulären Wand zu finden (▶ Abb. 7). Bei ischämischen Kardiomyopathien geht das „late enhancement“ immer von der endokardialen Seite aus, so dass die MRT sehr gut geeignet ist, bei systolischer Herzinsuffizienz eine ischämische von einer nicht-ischämischen Genese zu differenzieren.

Grundsätzlich kann es auch bei anderen strukturellen Herzerkrankungen zur regionalen Kontrastmittelanreicherung im Sinne eines „late enhancement“ kommen, sofern sich aufgrund von Fibrosen oder entzündlichen Veränderungen der relative Anteil des Extrazellularraums vergrößert. Beispiele sind die hypertrophe Kardiomyopathie, die Sarkoidose und Myokarditis [1, 18] (▶ Abb. 8). Auch hier ist aber die Lokalisation meist nicht endokardial, so dass eine Differenzierung von der ischämischen Kardiomyopathie möglich ist.

Ausblick

Auch die Schwächen der Methodik, z.B. in der MR-Koronarangiographie, müssen erwähnt werden. So ist zu berücksichtigen, dass das MR nicht die gleiche Verfügbarkeit hat wie z.B. die Echokardiographie und der zeitliche Aufwand und die Logistik komplexer sind, was den Einsatz bei Notfällen erschwert. Die Forschung konzentriert sich unter anderem darauf, die zeitliche und räumliche Auflösung zu verbessern. Inwieweit höhere Magnetfelder hier einen Fortschritt bringen, bleibt abzuwarten. Zumindest kann bei 3 Tesla über ein höheres Signal-zu-Rauschverhältnis eine bessere räumliche Auflösung erreicht werden [2]. Andererseits treten hier aber auch Suszeptibilitätsartefakte stärker in den Vordergrund.

Ein anderes Ziel ist die kardiologische Intervention im MR-Tomographen, bei der man die räumliche Auflösung und die Gewebecharakterisierung (Infarktödem, Nekrose) ausnutzen will. Herausforderungen in diesem Bereich sind vor allem

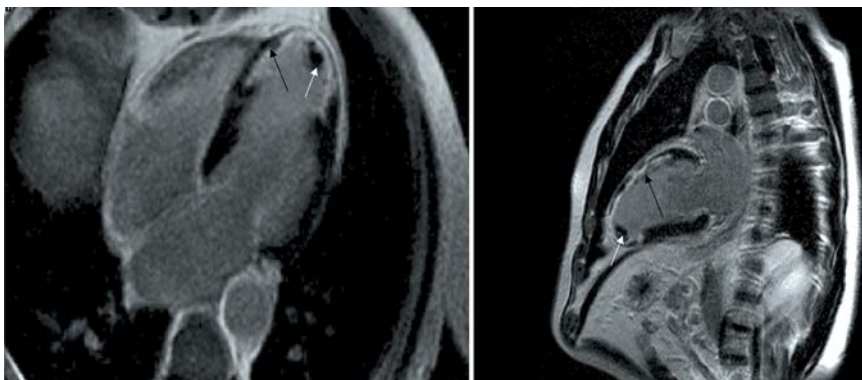


Abb. 4 „Late enhancement“ nach großem Vorderwandinfarkt. Deutlich ist der helle Signalbereich (Narbenewebe, schwarzer Pfeil) zu erkennen. Auch findet sich hier ein Ventrikelthrombus (weißer Pfeil).

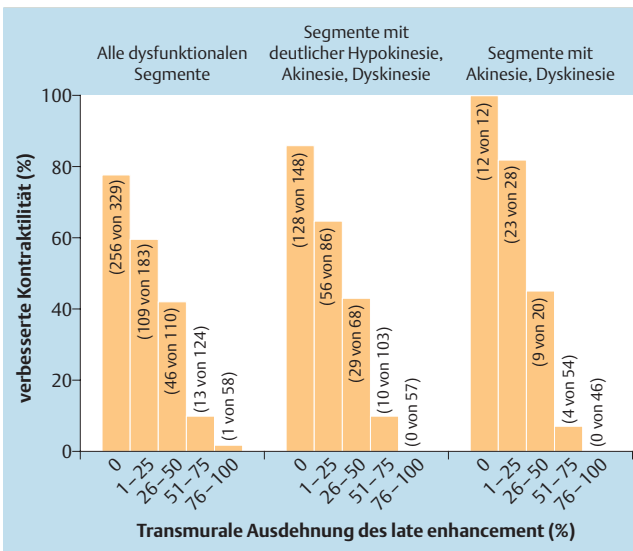


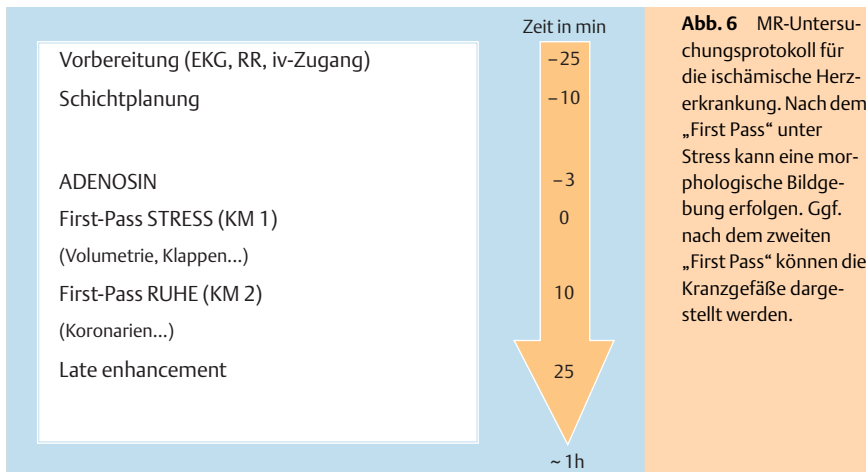
Abb. 5 Verbesserung der Kontraktilität nach Revaskularisation in Abhängigkeit vom Ausmaß des „late enhancement“ (modifiziert nach [8]).

Differenzierung der systolischen Herzinsuffizienz

Seine hohe morphologische und funktionelle Aussagekraft macht das MR zum idealen Instrument, systolische Funktionsstörungen des Herzens zu quantifizieren und im Verlauf zu beurteilen. Da es die Gewebetextur charakterisiert, sollte auch die Ursache einer systolischen Herzinsuffizienz damit abzuklären sein. Ist z.B. die Herzinsuffizienz im Rahmen ei-

nes Remodelling nach Infarkt entstanden, dann würde man mittels „late enhancement“ Narbenareale finden. Allerdings finden sich auch bei dilatativen Kardiomyopathien, also bei nicht-ischämischer Genese der systolischen Herzinsuffizienz in ~ 40% der Fälle Areale, die ein „late enhancement“ [11] aufweisen.

Das „late enhancement“ bei dilatativen Kardiomyopathien ist in 90% der Fälle nicht von endokardial ausgehend lokali-

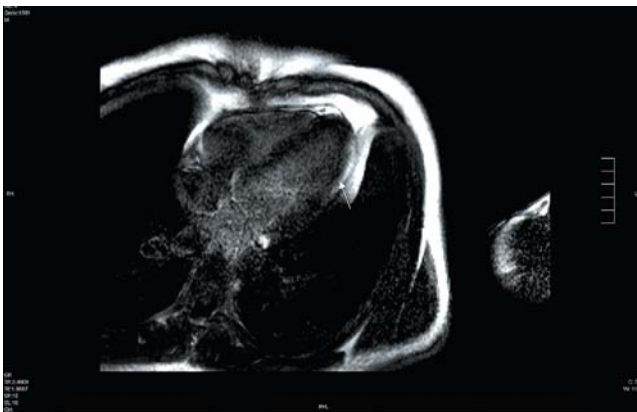
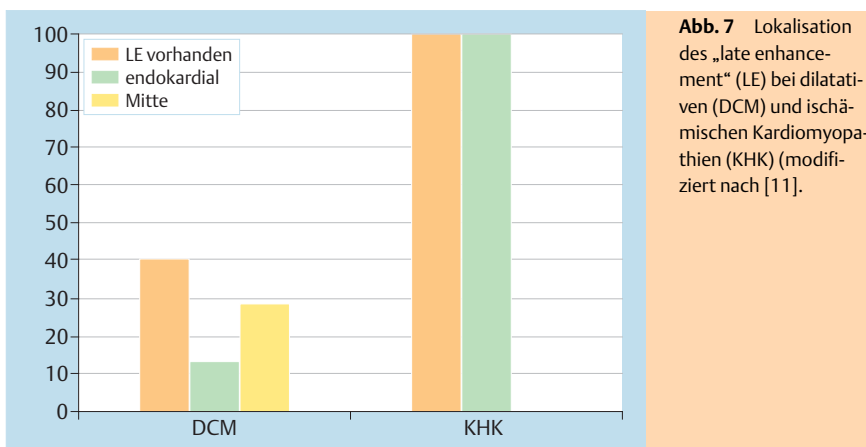


Konsequenz für Klinik und Praxis

- ▶ Die Magnetresonanztomographie ist der Goldstandard, wenn die Morphologie des kardiovaskulären Systems beurteilt werden soll.
- ▶ Sie kann z.B. bei der ischämischen Herzkrankheit in einem Untersuchungsgang therapierelevante Informationen liefern, für die sonst mehrere Untersuchungsschritte nötig sind.

Literatur

- 1 Abdel-Aty H *et al.* Diagnostic performance of cardiovascular magnetic resonance in patients with suspected acute myocarditis. *J Am Coll Cardiol* 2005; 45: 1815–1822
- 2 Fenchel M *et al.* Cardiac magnetic resonance imaging at 3.0 T. *Top Magn Reson Imaging* 2007; 18: 95–104
- 3 Gebker R *et al.* How we perform myocardial perfusion with cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson* 2007; 9: 539–547
- 4 Hendel RC *et al.* ACCF/ACR/SCCT/SCMR/ASNC/NASCI/SCAI/SIR 2006 appropriateness criteria for cardiac computed tomography and cardiac magnetic resonance imaging. *J Amer Coll Cardiol* 2006; 48: 1475–1497
- 5 Hiller KH *et al.* Assessment of cardiovascular apoptosis in the isolated rat heart by magnetic resonance molecular imaging. *Mol Imaging* 2006; 5: 115–121
- 6 Jahnke C *et al.* Coronary MR angiography with steady-state free precession. *Radiology* 2004; 232: 669–676
- 7 Kefer J *et al.* Head-to-head comparison of three-dimensional navigator-gated magnetic resonance imaging and 16-slice computed tomography to detect coronary artery stenosis in patients. *J Amer Coll Cardiol* 2005; 46: 92–100
- 8 Kim RJ *et al.* The use of contrast-enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. *New Engl J Med* 2000; 343: 1445–1453
- 9 Mahrholdt H, Klem I, Sechtem U. Cardiovascular MRI for detection of myocardial viability and ischaemia. *Heart* 2007; 93: 122–129
- 10 Maintz D *et al.* Whole-heart coronary magnetic resonance angiography. *Acta Radiol* 2007; 48: 967–973
- 11 McCrohon J *et al.* Differentiation of heart failure related to dilated cardiomyopathy and coronary artery disease using gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance. *Circulation* 2003; 108: 54–59
- 12 Myerson SG *et al.* Assessment of left ventricular mass by cardiovascular magnetic resonance. *Hypertension* 2002; 39: 750–755
- 13 Nagel E *et al.* Klinische Indikation für die kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie. *Clin Res Cardiol* 2007; 2: 77–96
- 14 Nagel E *et al.* Noninvasive diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high-dose dobutamine stress MRI. *Circulation* 1999; 99: 763–770
- 15 Nandalur KR *et al.* Diagnostic performance of stress cardiac magnetic resonance imaging in the detection of coronary artery disease. *J Amer Coll Cardiol* 2007; 50: 1343–1353
- 16 Schwitler J *et al.* Assessment of myocardial perfusion in coronary artery disease by magnetic resonance. *Circulation* 2001; 103: 2230–2235
- 17 Sosnovik DE *et al.* Magnetic resonance imaging of cardiomyocyte apoptosis with a novel magneto-optical nanoparticle. *Magn Reson Med* 2005; 54: 718–724
- 18 Vohringer M, Mahrholdt H, Yilmaz A, Sechtem U. Significance of late gadolinium enhancement in cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR). *Herz* 2007; 32: 129–137



kurzgefasst

Narben und Fibrosen lassen sich im MRT aufgrund von verzögerter Kontrastmittelanreicherung („late enhancement“) darstellen. Typischerweise ist dies bei einem Zustand nach Myokardinfarkt endokardial lokalisiert. Bei anderen Störungen der systolischen Pumpleistung, wie dilatativen Kardiomyopathien, können auch Fibrosen vorhanden sein, die aber meist nicht endokardial lokalisiert sind.

die MR-Sicherheit der Instrumente (keine Erhitzung im Hochfrequenzfeld) sowie ihre MR-Kompatibilität (Instrumente dürfen die Bildgebung nicht stören).

Eine Zielrichtung der Grundlagenforschung ist die molekulare/zelluläre MR-Bildgebung. So ist es z.B. im Tierexperiment möglich, apoptotische Zellen mit MR-Kontrastmitteln sichtbar zu machen [5, 17]. Die Apoptose, also der programmierte Zelltod, spielt eine bedeutende Rolle sowohl beim Myokardinfarkt als auch bei der Entwicklung einer Herzinsuffizienz, so dass Strategien, diesen Prozess zu modulieren, von hohem Interesse sind.