

Sonderdruck aus:
Hör/Krause/Tillmanns
Kardiologische Nuklearmedizin
© ecomed verlagsgesellschaft AG & Co. KG

S. Silber

Grundzüge der

Kernspintomographie

in der Kardiologie

ecommed

Grundzüge der Kernspintomographie in der Kardiologie

S. Silber

Die Kernspintomographie (Nuclear Magnetic Resonance, NMR oder MR) wird als bildgebendes Verfahren (NMRI, Imaging oder MRI) zunehmend in der medizinischen Diagnostik eingesetzt. Sie ist nichtinvasiv, inhärent dreidimensional und liefert ohne ionisierende Strahlung eine ausgezeichnete anatomische Bildauflösung. Zusätzlich wird der Bildkontrast durch NMR-spezifische Faktoren, wie unterschiedliche Gewebsrelaxationszeiten und den Einfluß verschiedener Blutströmungsgeschwindigkeiten, verstärkt. Während heute NMR in der zerebrospinalen Diagnostik weitgehend als Standardmethode gilt und sich bei zahlreichen anderen Organsystemen klinisch relevante Indikationen herauskristallisieren, befindet sich die NMR in der Kardiologie im wesentlichen noch in der Forschungsphase. Die Gründe für diese im Vergleich zur Anwendung bei anderen Organsystemen relativ langsame Entwicklung liegen einerseits in der Methode selbst (Artefakterzeugung durch Bewegung, ungenügender intrinsischer Relaxationskontrast ischämischen Myokards, Kleinheit und Schlingelung der Koronararterien), andererseits aber in der zunehmenden Bedeutung konkurrierender Verfahren, wie Nuklearkardiologie (SPECT mit ^{99m}Tc -Isonitrilen), Echokardiographie (Doppler, transösophageal) und Electron Beam CT. Die folgende Übersicht soll Grundzüge der Bildgebung mittels NMR in der Kardiologie zusammenfassen.

Grundlagen

In der NMR werden die geeigneten Atomkerne in einem großen Magnetfeld („Röhre“, Feldstärke meist zwischen 0,5 und 1,5 Tesla) ausgerichtet, intermittierend durch eine elektromagnetische Welle (RF, Radiofrequenz, z. B. 64 MHz für Wasserstoff bei 1,5 Tesla) zur Resonanz gebracht und abgelenkt (meist zwischen 30° und 90°). Bei Rückstellung in

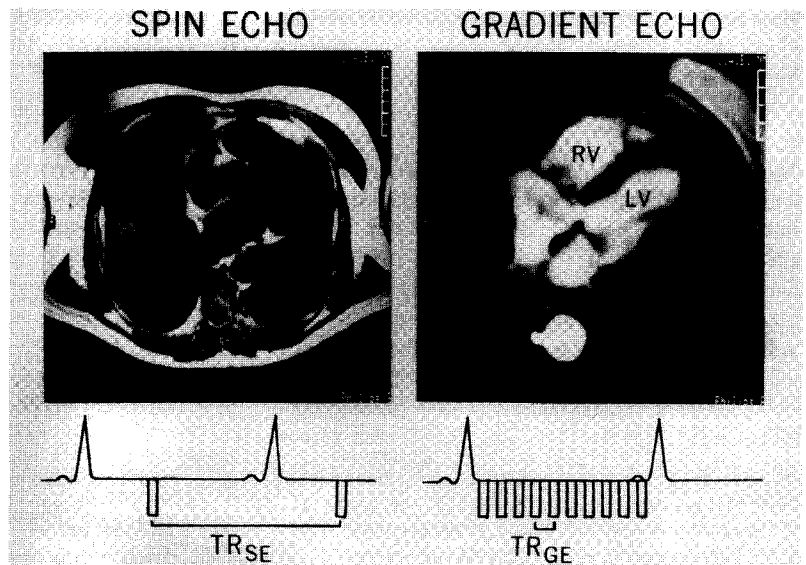
die Ausgangsposition emittieren die Nuclei eine entsprechende Frequenz, die mit speziellen Antennen (Ganzkörperspulen, Oberflächenspulen) registriert wird. Die T_1 -Zeit („spin lattice“) charakterisiert die longitudinale Relaxation (Wiederausrichtung im Magneteten), die T_2 -Zeit („spin spin“) die horizontale Dephasierung. T_1 und T_2 beschreiben zwei grundsätzlich verschiedene Phänomene. T_2 ist kleiner als T_1 . Das Zeitintervall zwischen den Ablenkungen ist die Repetitionszeit (TR), das zurückkommende Signal (Echo) wird in Abhängigkeit von der gewählten Echozeit (TE) registriert.

Medizinisch relevante, NMR-geeignete Elemente (bzw. Atomkerne) sind Wasserstoff (Proton, ^1H), Phosphor (^{31}P), Natrium (^{23}Na), Kohlenstoff (^{13}C) und Fluor (^{19}F). Klinisch hat bislang nur die Protonen-Bildgebung Bedeutung erlangt. Der Bildkontrast wird von der Protonendichte, den Relaxationszeiten (T_1 und T_2) sowie der Bewegung dargestellter Strukturen bestimmt. Die jeweils verwendete Pulssequenz entscheidet, welcher dieser Parameter in erster Linie für den Bildkontrast verantwortlich ist. Dementsprechend können Bilder gewonnen werden, die überwiegend die Protonendichte, den T_1 -Kontrast, den T_2 -Kontrast oder den Blutfluß in bestimmter Richtung und Stärke darstellen.

Klinisch werden vor allem zwei unterschiedliche Standardsequenzen eingesetzt: Bei der (älteren) Spin-Echo (SE)-Technik wird das Echosignal durch einen zusätzlichen 180° -Impuls induziert, TR (meist das RR-Intervall oder ein Vielfaches) und TE (meist um 30 ms) sind relativ lang (Abb. 1). Die neuere Gradienten-Echo (GE)-Technik („Cine-NMR“) induziert das Echo mit den Gradientenspulen. Die Repetitionszeit (um 50 ms) und Echozeit (7 bis 13 ms) sind wesentlich kürzer als die der SE-Technik (Abb. 1).

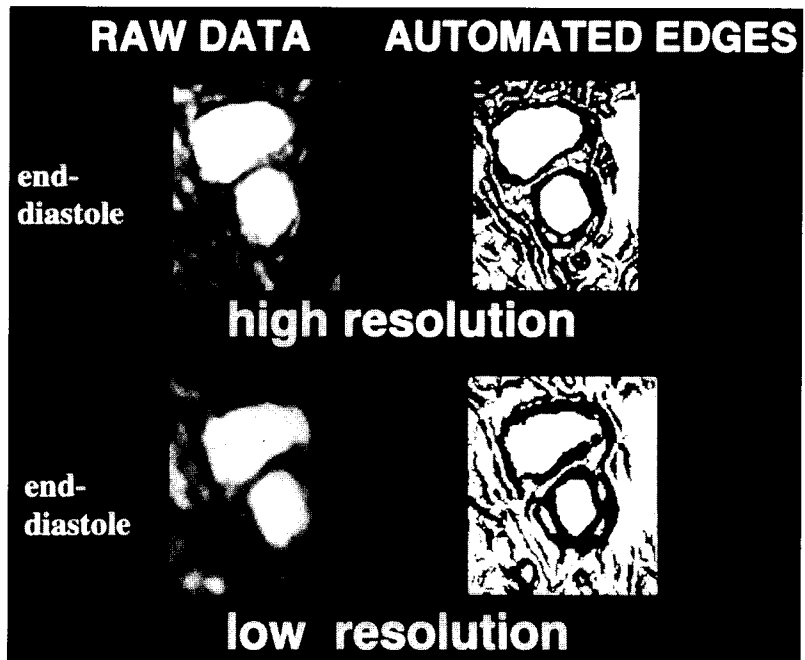
In der Kardiologie wird die SE-Technik überwiegend zur Erfassung der Morphologie, die GE-Technik überwiegend zur Beurteilung von Funktion und

Abb. 1: Repräsentatives Beispiel eines SE- (links) und eines GE- (rechts) Bildes. Während das fließende Blut in SE-Bildern das Signal reduziert („dunkle Herzkammern“), profitiert das GE-Bild von den „auffrischenden“ Spins des neu in die Bildebene einströmenden Bluts („helle Herzkammern“, RV = rechter Ventrikel, LV = linker Ventrikel). Im dargestellten Beispiel ist die Repetitionszeit (TR) der SE-Sequenz gleich dem RR-Intervall, während die kurze Repetitionszeit der GE-Technik die Aufnahme mehrerer Herzphasen pro Herzzyklus ermöglicht. Daher liegt die Aufnahmezeit für einen vollständigen



Herzzyklus in z. B. vier Schnittebenen in GE-Technik mit ca. 10 Minuten deutlich unter der in SE-Technik (ca. 40 Minuten für die gleiche räumliche und zeitliche Auflösung). Für die meisten funktionellen kardialen Fragestellungen ist daher die GE-Technik als Methode der Wahl anzusehen (Cine-NMR).

Abb. 2a: Vergleich von Standard-Cine-NMR (high resolution) und Cine-NMR-Bildern mit 1 Minute Aufnahmezeit (low resolution) am Beispiel eines Herzgesunden in enddiastolischen Schnitten der kurzen Achse. Die Standard-Cine-NMR-Bilder wurden mit zwei Exzitationen in einer 128 x 128-Matrix aufgenommen und zu 256 x 256 interpoliert. Der Aufnahmezeit von 1 Minute (eine Exzitation, 64 x 64) folgte ebenfalls die Interpolation zu 256 x 256. Die Bilder wurden zur Weiterverarbeitung in einen 32 bit-Minicomputer (Macintosh II, 256 Graustufen) transferiert. Die vollautomatische Wandgrenzenerkennung („Image“, Wayne Rasband, NIH, Bethesda) liefert binäre Bilder, deren linksventrikuläre Konturen eine gute Übereinstimmung zwischen Standard- und 1-minütiger Aufnahmezeit aufweisen (s. Abb. 2b).



Fluß angewendet. Oft ergänzen sich beide Methoden. Das Herz wird als Serie von Tomogrammen (meist 5 mm bis 10 mm pro Schnitt) dargestellt.

Im Gegensatz zum Röntgen-CT kann die NMR in beliebigen, doppelangulierten Projektionen durchgeführt werden, so daß die Schnitte exakt zur langen und kurzen Achse des Herzens angeordnet sind (Abb. 2). Die einzelnen Herzphasen werden anhand einer „Endlosschleife“ (in Analogie zu Kontrastmittel-, Radionuklid- oder Echoventrikulogrammen) visuell und quantitativ beurteilt.

Die im Vergleich zur SE-Technik kürzeren Aufnahmezeiten der GE-Technik von ca. 6 bis 10 Minuten sind für viele kardiologische Fragestellungen ausreichend, für die Erfassung transienter, provozierter Wandbewegungsstörungen aber immer noch zu lang.

Bis zur weitverbreiteten Verfügbarkeit ultraschneller Aufnahmetechniken (s. unten) muß versucht werden, die Aufnahmezeit der Standard-GE-Technik weiter zu reduzieren. Durch Reduktion der Matrix von 128 x 128 auf 64 x 64 und der Anzahl der Exzitationen (Ablenkungen) von zwei auf eine gelingt es, einen vollständigen Herzzyklus in meh-

rerer Ebenen in ca. 1 Minute aufzunehmen. Wie wir gesehen haben, kann der Verlust an Bildqualität durch aufwendige, aber vollautomatische Programme zur Wandgrenzenerkennung zuverlässig kompensiert werden (Abb. 2) [140]. Somit ist es bei Kombination von Cine-NMR und computerisierter Bildweiterverarbeitung (Postprocessing) möglich, die durch ergometrische Belastung [162] oder Pharmaka (z. B. Dobutamin oder Adenosin) induzierten Wandbewegungsstörungen mit hoher zeitlicher Auflösung zu diagnostizieren.

Morphologische Diagnostik

NMR bildet mit hoher Auflösung die Anatomie des Herzens und der großen Gefäße ab (Abb. 1-4, 7, 8). Während die Größe der Herzkammern, ihre anatomische Beziehung zueinander und die Wanddicken exakt bestimmt werden können, sind die Herzklappen nicht immer sichtbar. Das Perikard ist als dünne Linie niedriger Signalintensität zwischen dem helleren Epikard und dem hellen perikardialen Fett sichtbar.

Angeborene Herzfehler, Klappenerkrankungen

Zahlreiche angeborene Anomalien des Herzens und der großen Gefäße wurden erfolgreich mittels SE- und GE-Technik dargestellt [4, 36, 65, 87, 99, 115, 147, 161, 167, 168]. Dennoch bleibt die klinische Rolle von NMR in Anbetracht der Verfügbarkeit von Echokardiographie und konventioneller Angiographie umstritten. Besonders bei Kindern ist die Echokardiographie aufgrund ihrer exakten Erfassung kardialer Strukturen führend. Allerdings ist die echokardiographische Beurteilung der zentralen Lungenarterien und des systemischen bzw. pulmonalen Rückflusses schwieriger, so daß häufig eine Röntgenangiographie erforderlich wird.

In mehreren Untersuchungen wurden die klassischen bildgebenden Verfahren mit NMR verglichen [21, 22, 45, 81, 122]. Bei über 80 % der Patienten konnte NMR relevante Informationen liefern, so daß die Kombination NMR plus Echokardiographie evtl. die Katheterdiagnostik ersetzen könnte [21, 22]. Auch in der Verlaufsdiagnostik nach Bal-

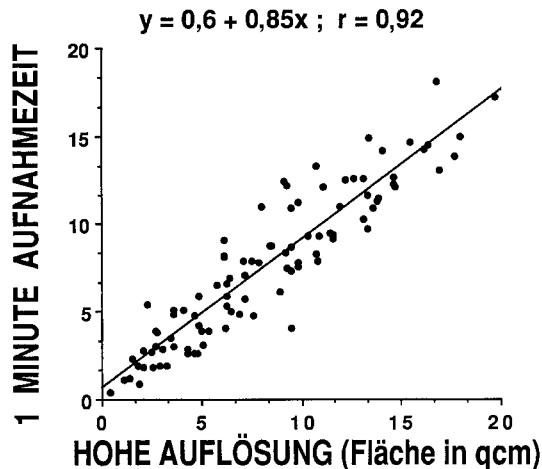


Abb. 2b: Korrelation zwischen Cine-NMR hoher Auflösung (Abszisse) und Cine-NMR mit einer Aufnahmezeit von 1 Minute (Ordinate). Dargestellt sind die vollautomatisch bestimmten Flächen der linken Ventrikel in Enddiastole und Endsystole. Die gute Korrelation gestattet bei Verwendung validierter Wanderkennungsprogramme kurze Aufnahmezeiten zur Erfassung transienter, induzierter Wandbewegungsstörungen.

londilatation einer Aortenisthmusstenose (Abb. 3) hat sich NMR als wertvoll erwiesen.

Die Echokardiographie hat sich mit ihren zahlreichen Dopplermethoden in der nichtinvasiven Diagnostik von Klappenerkrankungen etabliert. Die Messung der transvalvulären Gradienten und die qualitative Abschätzung des Regurgitationsausmaßes korrelieren gut mit Herzkatheterdaten. Mittels NMR können bei Vorliegen einer Insuffizienz von nur einer Herzklappe sowohl aus den SE- als auch aus den GE-Bildern Regurgitationsfraktionen bzw. -volumina in guter Übereinstimmung zu Herzkatheterdaten berechnet werden [155]. Die Herzklappen selbst kommen in SE-Bildern nur selten gut zur Darstellung, während die Klappenbewegung in GE-Bildern gut verfolgt werden kann – allerdings ist die Auflösung im Klappenbereich nicht so gut wie die der Echokardiographie. Bei Vorliegen von Klappenstenosen führt die Turbulenz im Blutstrom zu einem in den GE-Bildern gut erkennbaren Signalverlust, dessen diagnostischer Stellenwert allerdings noch nicht gesichert ist.

Auch eine Regurgitation ist in GE-Bildern gut als Signalverlust erkennbar. So sieht man bei Aorteninsuffizienz während der Diastole eine langgestreckte, dunkle Zone im linken Ventrikel (Abb. 4) und bei Mitralinsuffizienz während der Systole eine Region verminderter Intensität im linken Vorhof. Die Planimetrierung dieser „schwarzen Flächen“ ergab eine gute Übereinstimmung zur Farbdoppler-Echokardiographie [68]. Die Sensitivität von Cine-NMR zur Erkennung einer Aorten- oder Mitralinsuffizienz ist ausgezeichnet, allerdings muß die Zuverlässigkeit in der Berechnung von Regurgitationsvolumina noch weiter belegt werden [156]. Die gute Korrelation zwischen NMR-bestimmten rechts- und linksventrikulären Schlagvolumina zeichnet Möglichkeiten ab, Regurgitationsvolumina und Shunts zu berechnen.

Die NMR-Quantifizierung des Blutflusses in größeren Gefäßen ist eine vielversprechende Modifikation der GE-Technik (Abb. 5 und 6). Hierbei können die Signale in der proximalen Aorta und Pulmonalarterie zur Bestimmung der rechts- und linksventrikulären Schlagvolumina, Regurgitationsvolumina und zur Shuntbestimmung herangezogen werden [42]. Zum jetzigen Zeitpunkt bleibt die klinische Bedeutung von NMR in der Diagnostik von Klappenerkrankungen und Shunts auf Patienten

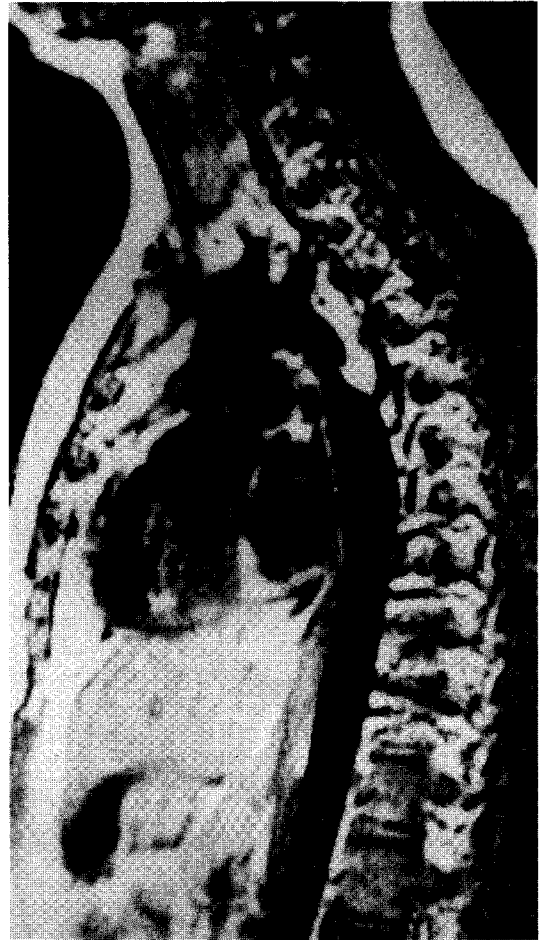


Abb. 3: SE-Bild einer Aortenisthmusstenose im proximalen Bereich der Aorta descendens, linksschräge Projektion.

mit echokardiographisch eingeschränkter oder mangelhafter Darstellbarkeit beschränkt.

Kardiale Thromben und Tumoren

Die Echokardiographie ist die Methode der Wahl zur Erkennung kardialer Thromben. Manchmal kann aber im rechten Ventrikel die Abgrenzung zu normalen Strukturen (Moderator-Band) oder die Beurteilung der exakten Ausdehnung von Thromben und Tumoren schwierig sein. Auch die Unterscheidung zwischen Thromben und Tumoren ist manchmal unsicher.

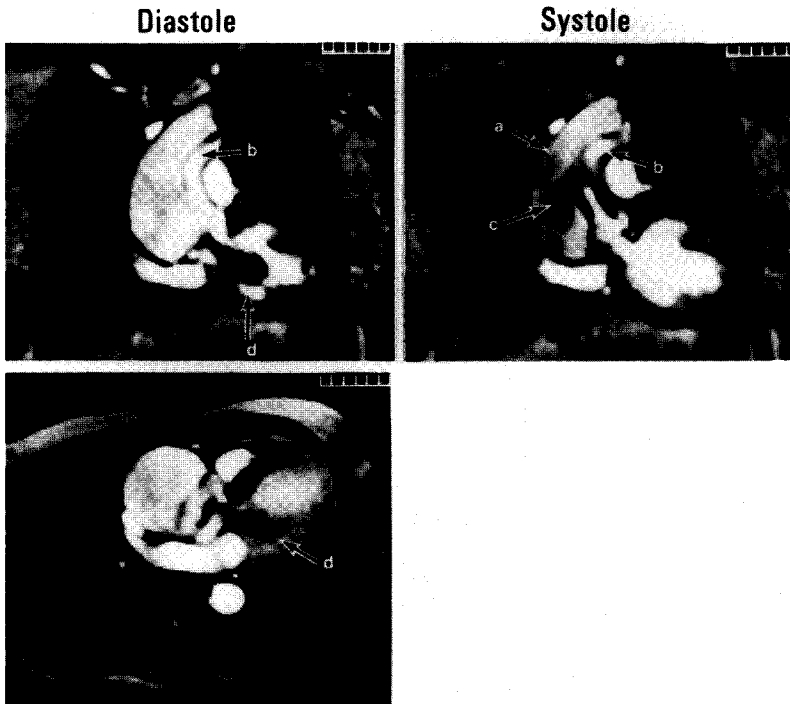
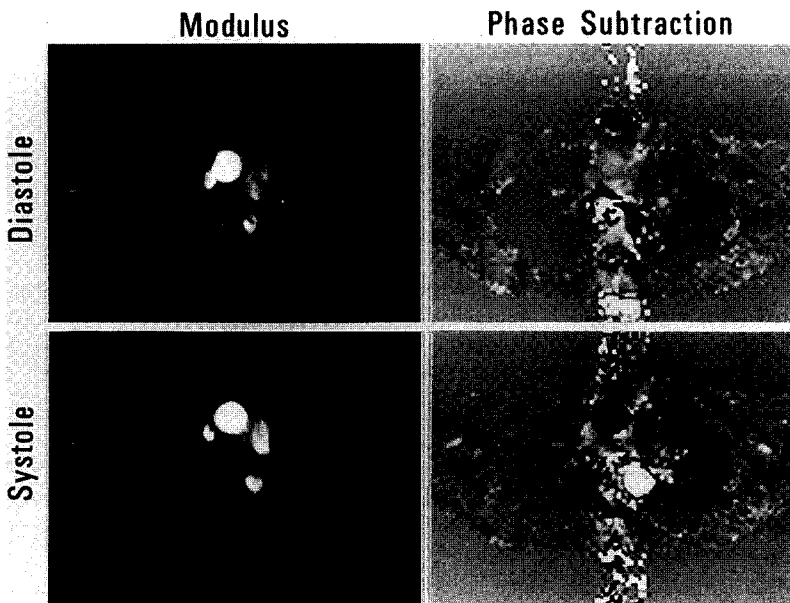


Abb. 4: Cine-NMR-Bilder eines Patienten mit Aorteninsuffizienz bei Dissektion der Aorta ascendens. Deutlich erkennbar ist das falsche Lumen (a), das echte Lumen (b), der flußbedingte Signalverlust in der Verbindungsstelle (c) und der „schwarze diastolische Jet“ (d) im linken Ventrikel als Ausdruck der Aorteninsuffizienz.



NMR Flow Quantitation

Abb. 5: Die Flußquantifizierung erfolgt aus den Phasen-Subtraktionsbildern (rechts), einer speziellen GE-Technik mit wählbarer Sensitivität für Flußgeschwindigkeit und -richtung. Zur anatomischen Orientierung sind die entsprechenden nicht-parametrischen GE-Bilder („Modulus“) links abgebildet. Zwar sind in den (transversalen) Modulus-Bildern die Aorta ascendens und descendens gut erkennbar (beide weiß), ihre gegenläufige Flußrichtung wird aber erst in den Phasen-Subtraktionsbildern sichtbar: Die kraniale Flußrichtung in der Aorta ascendens ist schwarz, die kaudale Flußrichtung in der Aorta descendens weiß abgebildet. Niedriger oder fehlender Fluß kommt in Grautönen zur Darstellung.

Da die Röntgenangiographie diese Strukturen nicht direkt, sondern nur indirekt über Füllungsdefekte sichtbar machen kann, ist die hohe Rate an falsch-negativen Befunden nicht unerwartet [148].

Die Erfassung kardialer Thromben und Tumoren mittels NMR ist durch zahlreiche Berichte [6, 10, 27, 50, 51, 53, 91, 110, 119, 121, 142, 170] auch im Vergleich zur Echokardiographie [54] belegt. Der klinische Stellenwert von NMR im Vergleich zur Echokardiographie ist allerdings noch zu untersuchen [13, 55, 102, 106, 107, 111, 124, 137].

Perikarderkrankungen

Die Echokardiographie ist die Methode der Wahl in der nichtinvasiven Diagnostik eines Perikardergusses. Allerdings kann die Interpretation bei Vorliegen eines gekammerten Ergusses oder eines retrokardialen Pleuraergusses problematisch sein. Auch die Messung der Perikarddicke unterliegt Limitationen, so daß die Unterscheidung zwischen restriktiver Kardiomyopathie und konstriktiver Perikarditis schwierig sein kann.

Das Röntgen-CT bestimmt zuverlässig Perikarddicke und Perikardverkalkungen, so daß es in der Diagnostik einer Perikardkonstriktion als klinisch wertvoll eingestuft werden kann [35].

Die NMR-Diagnostik von Perikarderkrankungen ist auf wenige Studien beschränkt, ohne daß ein systematischer Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren vorliegt [25, 31, 47, 48, 59, 61, 79, 97, 138, 168]. Ein Perikarderguß kann erkannt und möglicherweise im SE-Bild auch quantifiziert werden.

Ein durch Herzinsuffizienz bedingter Perikarderguß weist meist eine niedrige Signalintensität auf, während ein urämischer oder tuberkulöser Perikarderguß häufig durch eine hohe Signalintensität charakterisiert ist.

Das angeborene Fehlen von Perikard oder vorhandene Perikardzysten konnten zuverlässig durch NMR nachgewiesen werden [57].

NMR wurde auch zur Differenzierung zwischen konstriktiver Perikarditis und restriktiver Kardiomyopathie herangezogen. Eine Verkalkung des Perikards kann nicht im NMR-Bild gesehen werden. Der gegenwärtige klinische Stellenwert von NMR in der Diagnostik von Perikarderkrankungen ist nicht klar,

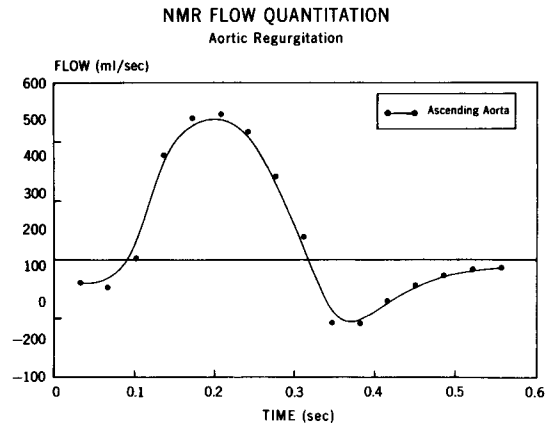


Abb. 6: Flußquantifizierung in der Aorta ascendens eines Patienten mit Aorteninsuffizienz. Die Erstellung der entsprechenden Phasen-Subtraktions- bzw. Phasen-Differenzbilder (s. oben) erfolgte senkrecht zur Aorta. Die zeitliche Auflösung beträgt 16 Bilder pro Herzzyklus. Man erkennt deutlich den Rückfluß in der Aorta während der frühen Diastole.

die Echokardiographie bleibt sicher die Methode der Wahl bei der Fragestellung „Perikarderguß“.

Herzinfarkt

Bei Herzinfarkt läßt die morphologische Diagnostik ausgedehnter Aneurysmen eine Verdünnung der Ventrikelwand erkennen [3]. Die in SE-Bildern beobachtete erhöhte Signalintensität ist häufig Ausdruck der erniedrigten Blutströmungsgeschwindigkeit in infarktnahen Arealen und wurde als indirektes Zeichen für das Vorliegen einer Wandbewegungsstörung gewertet. Die Spezifität dieses Zeichens ist allerdings umstritten [41]. NMR bietet darüber hinaus die Möglichkeit, eine evtl. zusätzlich komplizierende Mitralsuffizienz (Papillarmuskeldysfunktion oder -abriß) bzw. eine Ruptur des Ventrikelseptums darzustellen. Die meisten in Betracht kommenden Patienten sind jedoch zu instabil, um in die NMR-Abteilung transportiert werden zu können. Somit bleiben bei Patienten mit akutem Infarkt die Echokardiographie und die Herzkatheterisation die diagnostischen Verfahren der Wahl [26, 67, 75-77, 94, 101, 112, 128, 129, 133, 135, 151, 171, 172].

Koronararterien

Obwohl einzelne Segmente von Koronararterien in SE-Bildern sichtbar waren [93, 117], ist mit der gegenwärtig verfügbaren Technologie der gesamte Verlauf normaler oder stenosierter Koronargefäße schwer darstellbar. Etwas einfacher scheint die Diagnostik bei Bypass-Transplantaten zu sein. Berichte über eine zuverlässige Erfassung der Durchgängigkeit von Bypass-Transplantaten liegen vor [127, 169]. Unter praktisch-klinischen Gesichtspunkten ist aber die invasive Angiographie unverändert die exakteste Methode zur Beurteilung von Koronar- und Bypass-Anatomie [8, 12, 18, 23, 29, 66, 71, 89, 98, 118, 145, 158].

Erkrankungen der Aorta

Die bildliche Darstellung der thorakalen und abdominalen Aorta mittels NMR war Gegenstand zahlreicher Studien, in denen meist die SE-Technik angewendet wurde [5, 34, 44, 49, 52, 85, 86, 92, 130] (Abb. 4 und 7).

NMR ist eine sensitive und spezifische Methode für die Diagnostik der *Aortendissektion* [85] und nach Meinung einiger Autoren sogar der Ultra-

schalldiagnostik und dem Röntgen-CT überlegen [34]. Der häufig spiralförmig verlaufende Intimalappen wird am besten in axialen Serienschnitten als helle Linie zwischen zwei Lumina niedrigerer Signalintensität sichtbar. Besonders bei Magneten höherer Feldstärke muß auf die Möglichkeit von Bildartefakten (chemische Verschiebung des umliegenden Fettgewebes) geachtet werden [95].

Die zusätzliche Anwendung der GE-Technik kann die Sichtbarmachung der Ein- und Austrittsstellen erleichtern (Abb. 4) und bei der im SE-Bild schwierigen Unterscheidung zwischen langsamem Fluß und Thrombus hilfreich sein.

Die Röntgenangiographie kann thrombosierte falsche Lumina übersehen. Hier zeichnet sich eine praktisch-klinische Relevanz für die NMR ab, da sie auch bei diesen Patienten das falsche Lumen sichtbar macht. Eine systematische Studie hierzu steht allerdings noch aus.

Während eine NMR-Diagnostik der akuten Aortendissektion aufgrund der räumlichen Trennung von Intensivstation und NMR-Geräten, der eingeschränkten Überwachungsmöglichkeiten und der potentiellen Gefährdung durch Klaustrophobie praktisch nicht stattfindet, ist die Anwendung von NMR bei chronischer Dissektion vielversprechend.



Abb. 7: SE-Bild eines Patienten mit sacculärem Aneurysma im Bereich der Aorta descendens. Das Aneurysma kommt in der Vergrößerung (rechts) deutlich zur Darstellung.

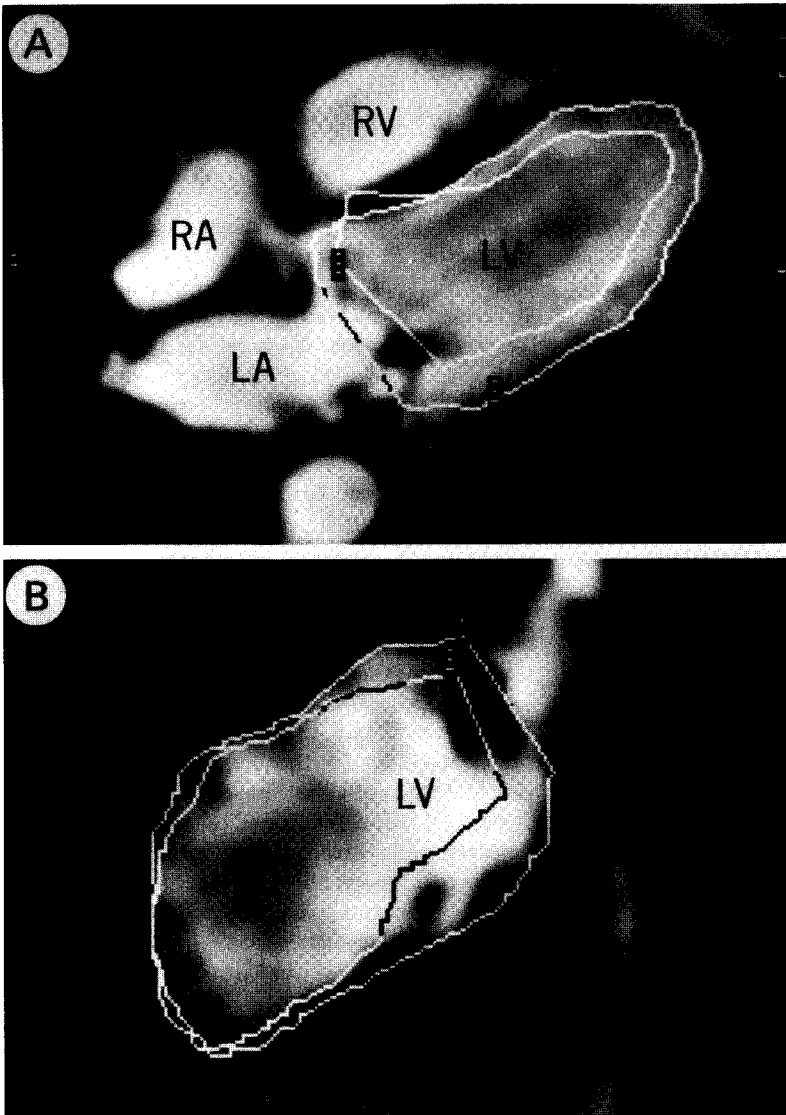


Abb. 8: Cine-NMR-Bilder im Vier-Kammerblick eines Herzgesunden (A) und im Zwei-Kammerblick (RAO-Äquivalent) eines Patienten mit ausgedehntem Vorderwandinfarkt (B). In A sind die vier Herzhöhlen (RV = rechter Ventrikel, RA = rechter Vorhof, LA = linker Vorhof, LV = linker Ventrikel) gut abgrenzbar. Die Überlagerungsprojektion der endsystolischen und enddiastolischen Endokardkonturen zeigt eine normale Wandbewegung. In B ist die ausgedehnte anteriore, apikale und z. T. inferiore Akinésie erkennbar.

Die Ausdehnung von *Aortenaneurysmen* kann mit NMR zuverlässig erkannt werden (Abb. 7) [34, 52]. Die Messung des Aortendurchmessers stimmt gut mit echokardiographischen und Röntgen-CT-Werten überein [34]. Häufig kann bei dieser Fragestellung die NMR-Diagnostik den Röntgenverfahren (Verzicht auf Kontrastmittel) vorgezogen werden, wenn Informationen über die Koronaranatomie nicht erforderlich sind [9, 19, 20, 28, 37, 62,

70, 72, 78, 87, 90, 100, 103, 108, 113, 146, 150, 152].

Funktionsdiagnostik

Die Achsen der klassischen horizontalen (= transaxialen, axialen), sagittalen und koronaren Schnittebenen stimmen nicht mit den herzeigenen Achsen

überein. Oft werden kardiale Strukturen schräg angeschnitten, so daß eine Quantifizierung von Dimensionen (enddiastolisches und endsystolisches Volumen, Wanddicken) problematisch ist. Die sorgfältige Positionierung des Patienten und die Wahl geeigneter, doppelangulierter Schnittebenen ermöglicht die exakte Messung von Volumina und Wanddicken ohne Partialvolumeneffekt (Abb. 2 und 8) [82].

Durch Übertragung der im Herzkatheterlabor standardmäßig angewendeten Formeln (Sandler-Dodge oder vorzugsweise Simpson's rule) lassen sich Myokardmasse [80, 83], rechts- und linksventrikuläre Volumina, Schlagvolumina und linksventrikuläre Auswurffraktion aus SE- und GE-Bildern in guter Übereinstimmung mit invasiv und echokardiographisch gewonnenen Daten berechnen [24, 38, 159].

Im Gegensatz zum linken Ventrikel gibt es für die Beurteilung der rechtsventrikulären Funktion keinen „Gold-Standard“, da die kontrastmittel-ventrikulographisch oder echokardiographisch bestimmten Volumina aufgrund der Kompliziertheit der rechtsventrikulären Geometrie ungenau sind. Zwar kann die rechtsventrikuläre Auswurffraktion durch die geometrieunabhängige Bolus-Radionuklidventrikulographie gut abgeschätzt werden, jedoch ist der Mangel an anatomischer Auflösung miteinzubeziehen. Immerhin stimmt das anhand von NMR bestimmte rechtsventrikuläre Schlagvolumen gut mit dem des linken Ventrikels überein.

In der Funktionsdiagnostik sollte die schichtenweise Erfassung des Herzens in der kurzen Achse bevorzugt werden (Abb. 2), da sie gleichzeitig auch die exakte Beurteilung der regionalen systolischen Wanddickenzunahme ermöglicht – eine zur regionalen Wandbewegung zusätzliche Information [3, 134, 154].

Da die qualitative und quantitative Beurteilung der regionalen Wandbewegung des linken Ventrikels mittels NMR gut mit den Befunden der Kontrastmittel-, der Radionuklidventrikulographie und der Echokardiographie übereinstimmt, ist fraglich, ob diese Verfahren zusätzliche Informationen erbringen. Allerdings werden uns neuere, innovative Pulssequenzen (z. B. RF-Markierung von Myokardsegmenten) einen bislang ungeahnten Einblick in das transmurale Kontraktionsmuster liefern [7, 88, 101, 123, 160, 167, 173].

Gewebscharakterisierung durch Relaxationskontrast

Einzigartig für die NMR ist, daß sie nicht nur die Dichteverteilung bestimmter Strukturen abbildet, sondern die verschiedenen Relaxationszeiten unterschiedlicher Gewebe in die Bildinformation kontrollierbar miteinbezieht [6, 50, 60, 76, 131, 132, 143, 157, 163]. T_2 -gewichtete Bilder sind bei der Differenzierung zwischen langsamem Blutfluß und Thrombus hilfreich. Auch bei der Diagnostik von Fibromen (kurze T_2 -Zeit) und Lipomen (kurze T_1 -Zeit) kommen diese Tumoren bei entsprechenden Aufnahmesequenzen deutlich zur Darstellung.

Herzinfarkt und Myokardischämie

Experimentelle Untersuchungen haben den Anstieg von T_1 und T_2 im infarzierten Myokard sowie seine lineare Beziehung zum Wassergehalt des Gewebes (Ödembildung) nachgewiesen. Die Anwesenheit von natürlichen paramagnetischen Substanzen im Infarktgebiet (z. B. Sauerstoffradikale), zelluläre Infiltrate, die Kompartimentierung des Gewebswassers und eine Anreicherung von Lipiden gehen als zusätzliche Faktoren mit ein [16, 64]. In zahlreichen experimentellen Studien konnte gezeigt werden, daß sowohl T_1 -gewichtete SE- oder „inversion recovery“-Sequenzen als auch T_2 -gewichtete SE-Bilder über einen ausreichenden Gewebskontrast zur Infarktdarstellung verfügen (Abb. 9) [2, 120, 126].

Am Menschen ist die „inversion recovery“-Methode aber zahlreichen Limitationen unterworfen. Dagegen liegen für T_2 -gewichtete Bilder bei Patienten mit abgelaufenem Infarkt im Subakutstadium Berichte über eine erhöhte Signalintensität vor [74], während in Narbengebieten die T_2 -Zeit erniedrigt ist [105]. Die Spezifität einer erhöhten Signalintensität in T_2 -gewichteten SE-Bildern muß allerdings in Frage gestellt werden, da einerseits auch bei Normalpersonen die Möglichkeit einer erhöhten Signalintensität gegeben ist [32, 41], andererseits aufgrund experimenteller Daten die kontrastreichen Zonen nicht unbedingt mit der Infarkthistologie korrelieren [15].

Eine Quantifizierung der Relaxationszeiten wurde auch an Patienten durchgeführt und der er-



Abb. 9: Ex-vivo-Bilder eines infarzierten Hundeherzens (Verschluß des R. circumflexus). Die SE-Bilder wurden mit einer Echozeit von 34 ms (links) und 68 ms (rechts) aufgenommen. Man erkennt deutlich die Kontrastanhebung im T_2 -gewichteten Bild (rechts) mit heller Darstellung des Lateralwandinfarktes.

wartete T_1 - und T_2 -Anstieg nachgewiesen [105]. Allerdings ist die Messung der Relaxationszeiten unter klinischen Bedingungen problematisch, da T_1 und T_2 von der Herzbewegung beeinflusst werden und die erforderliche Mindestanzahl von Einzelmessungen bei Patienten meist nicht eingehalten werden kann, so daß z.B. logarithmische Funktionen aus nur zwei Punkten konstruiert werden müssen.

Alternativ wurde versucht, mittels synthetischer paramagnetischer Substanzen den Kontrast weiter anzuheben. So führte die intravenöse Injektion von Gadolinium (Gd)-DTPA in T_1 -gewichteten Bildern zum Anstieg der Signalintensität im Infarktareal [165]. Die Pharmakokinetik und -dynamik von Gd-DTPA nach Herzinfarkt ist kompliziert. Seine Aufnahme im Infarktgebiet hängt von der regionalen Durchblutung, der Ischämiedauer und dem Zeitpunkt der Reperfusion (sofern vorhanden) ab, so daß es im Infarktgebiet vermindert (sehr niedriger Blutfluß, keine Reperfusion) oder vermehrt (Ödembildung nach Reperfusion) angereichert werden kann. Die zusätzliche Beeinflussung des Signals bei hämorrhagischem Infarkt (späte Reperfusion) mit Verminderung der T_2 -Zeit, die Abhängigkeit des registrierten Signals von der Wahl der Pulssequenz und des verwendeten Kontrastmittels machen die NMR-Bildgebung beim akuten Infarkt zu einem äußerst komplexen Geschehen. Dies erklärt wohl die unterschiedlichen Befunde in der NMR-Bildgebung mit Gd-DTPA nach Herzinfarkt [39, 136]. Auch muß offen bleiben, ob nicht schon T_2 -gewichteten Bildern allein eine mindestens gleichgroße oder sogar größere Aussagekraft zukommt (Abb. 9).

Im Gegensatz zum Myokardinfarkt beeinflussen *kurzdauernde ischämische Episoden* die Relaxati-

onszeiten nur geringfügig, so daß der native Gewebekontrast nicht ausreicht, um transiente, aus diagnostischen Gründen induzierte Ischämien zu erfassen. Gerade hier zeichnet sich eine praktisch wichtige Anwendung von paramagnetischen Kontrastmitteln in der Kardiologie ab. Das einzige zugelassene paramagnetische Kontrastmittel (Gd-DTPA) ist aber auch durch seine kurze myokardiale Halbwertszeit limitiert, so daß eine Anwendung mit den üblichen NMR-Systemen wertlos erscheint.

Ultraschnelle (echo-planare) Aufnahmeverfahren wären hierzu sicher besser geeignet, da sie die Aufnahme eines einzigen (!) Bildes in ca. 30 ms ermöglichen [144]. Diese „single shot“-Echtzeit-NMR-Techniken erfordern spezielle, rasch schaltende Gradientengeneratoren und -spulen. Allerdings sind sie durch eine im Vergleich zu den Standard-NMR-Verfahren geringere räumliche Auflösung limitiert.

Als Kompromiß bietet sich die „Snapshot-flash“-Pulssequenz an, eine weitere Verbesserung der GE-Technik. Bei extrem kurzen Repetitionszeiten von 5 ms und Echozeiten von ca. 3 ms kann während der Diastole eines einzigen Schlasses ein vollständiges Bild erzeugt werden. Mit dieser für die Kardiologie vielversprechenden Technologie konnte am Menschen der zu erwartende transiente, flußabhängige Anstieg der myokardialen Bildintensität nach Bolusinjektion von Gd-DTPA registriert werden. Der Stellenwert dieser vielversprechenden „NMR first pass“-Technik bleibt Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Für die klassischen Pulssequenzen der NMR-Bildgebung müssen neue myokardaffine Liganden für das Gadolinium synthetisiert werden, um eine dem Isonitrit der Nuklearkardiologie analoge NMR-Untersuchung einzuführen.

Herztransplantation

Die rapide Zunahme der Herztransplantationen und die vor allem durch Cyclosporin verbesserte Überlebensrate machen die Notwendigkeit nichtinvasiver Methoden zur rechtzeitigen Erkennung einer akuten oder chronischen Abstoßungsreaktion noch dringlicher. Die Möglichkeit der Gewebscharakterisierung durch unterschiedliche Relaxationszeiten gab zu zahlreichen experimentellen Arbeiten Anlaß.

Wie aus diesen Untersuchungen hervorgeht, nehmen bei akuter Abstoßung im Rahmen der zellulären Infiltration und Ödembildung T_1 und T_2 zu [1, 69, 114, 153]. Die erste klinische Studie stimmte optimistisch, Folgeuntersuchungen anderer Arbeitsgruppen konnten aber diesen Stellenwert der die Relaxationszeiten beurteilenden NMR-Diagnostik nicht bestätigen [96].

Die Gabe von Gd-DTPA führte in einer experimentellen Studie in T_1 -gewichteten Bildern zur sicheren Erkennung einer akuten Abstoßungsreaktion. Klinische Daten über die Anwendung von Gd-DTPA zur Früherkennung einer Abstoßungsreaktion sind noch nicht gesichert.

Gegenwärtig ist die Myokardbiopsie die einzige zuverlässige Methode, eine akute Abstoßungsreaktion frühzeitig zu erfassen. Vielleicht werden spektroskopische NMR-Verfahren in Zukunft die Notwendigkeit der häufigen Myokardbiopsien reduzieren [14, 17, 40, 46, 56, 84, 104, 109, 116, 125, 164].

Zusammenfassung

Die klinische Anwendung der NMR-Technologie in der Kardiologie ist noch limitiert. Die NMR-Bildgebung liefert häufig Informationen, die von der Echokardiographie und Radionuklidventrikulographie schneller und kostengünstiger zu erhalten sind. Die relativ langen Aufnahmezeiten, die geringe Verfügbarkeit und fehlende „Portabilität“ haben den klinischen Einsatz der NMR-Bildgebung in der Kardiologie weitgehend zurückgehalten. NMR hat die Standardverfahren der Bildgebung in der Diagnostik kardiovaskulärer Erkrankungen nicht ersetzen können. Zum heutigen Zeitpunkt sind ihre klinischen Indikationen in der Beurteilung angeborener Herzfehler, der Abgrenzung kardialer (perikardialer) Tumoren und Thromben, vor allem aber

Tabelle 1: Gegenwärtige klinische Anwendung der NMR-Bildgebung, insbesondere bei nicht möglicher oder eingeschränkter Darstellbarkeit im Echokardiogramm. Während die genannten Kontraindikationen streng zu beachten sind, ist die Durchführung bei bekannter Klaustrophobie und instabilen Patienten nicht ratsam.

Klinische Anwendung:

Aortendissektion
Aortenaneurysma
Angeborene Herzfehler
Kardiale und parakardiale Tumoren
Kardiale Thromben
Perikarderkrankungen
Rechtsventrikuläre Funktionsbeurteilung

Kontraindikationen:

Ferromagnetische zerebrale Clips
Herzschrillmacher

Nicht ratsam bei:

Bekannter Klaustrophobie
Akutkranken, instabilen Patienten

in der Diagnostik pathologischer Prozesse der großen Gefäße zu sehen (Tab. 1).

Weitere technologische Fortschritte, insbesondere auf dem Gebiet der ultraschnellen Aufnahmetechniken („real time“-NMR) und kürzere Datenverarbeitungszeiten (vor allem die Verfügbarkeit schnellerer dreidimensionaler Rekonstruktionen) sind erforderlich, um der NMR einen Platz in der klinischen Kardiologie zu sichern. Die Entwicklung neuer, myokardaffiner, nichttoxischer paramagnetischer Kontrastmittel sowie der Einsatz der am Herzen schwierigen In-vivo-Proton- und Phosphor-Spektroskopie werden letztlich entscheiden, ob die NMR-Technologie klinisch relevante Zusatzinformationen für kardiologische Fragestellungen liefern kann [139].

Literatur

- [1] AHERE T, TSCHOLAKOFF D, FINKBEINER W, SECHTEM U, DERUGIN N, YEE E, HIGGINS C. Magnetic resonance imaging of cardiac transplants: The evaluation of rejection of cardiac allografts with and without immunosuppression. *Circulation* 74: 145-156 (1986).
- [2] AISEN AM, BUDA AJ, ZOTZ RJ, BUCKWALTER K. Visualization of myocardial infarction and subsequent coronary reperfusion with MRI using a dog model. *Magn Reson Imaging* 5: 399-404 (1987).

- [3] AKINS EW, HILL JA, SIEVERS K, CONTI R. Assessment of left ventricular wall thickness in healed myocardial infarction by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 59: 24-28 (1987).
- [4] AL-ALI F, HIGGINS CB, GOODING CA. MRI of tracheal and esophageal compression following surgery for congenital heart disease. *J Comput Assist Tomogr* 18: 39-42 (1994).
- [5] AMPARO EG, HIGGINS CB, HODDICK W. Magnetic resonance imaging of aortic disease: Preliminary results. *Am J Radiol* 143: 1203-1209 (1984).
- [6] APPELGATE PM, TAJIK AJ, EHMAN RL, JULSRUD P, MILLER F. Two dimensional echocardiographic and magnetic resonance imaging observations in massive lipomatous hypertrophy of the atrial septum. *Am J Cardiol* 59: 489-491 (1987).
- [7] AUFFERMANN W, WAGNER S, HOLT WW, BUSER PT, KIRCHER B, SCHILLER NB, LIM TH, WOLFE CL, HIGGINS CB. Noninvasive determination of left ventricular output and wall stress in volume overload and in myocardial disease by cine magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 121: 1750-1758 (1991).
- [8] BAER FM, SMOLARZ K, JUNGHEULSING M, THEISSEN P, SECHTEM U, SCHICHA H, HILGER HH. Feasibility of high-dose dipyrindamole-magnetic resonance imaging for detection of coronary artery disease and comparison with coronary angiography. *Am J Cardiol* 69: 51-56 (1992).
- [9] BANKI JH, MEINERS LC, BARENTSZ JO, WITKAMP TD. Detection of aortic dissection by magnetic resonance imaging in adults with Marfan's syndrome. *Int J Card Imaging* 8: 249-254 (1992).
- [10] BECKER RC, HOBBS RE, RATLIFF NB. Cardiac rhabdomyosarcoma: Case report with review of clinical and pathologic features. *Cleveland Clin Q* 51: 83-88 (1984).
- [11] BISSET GS, STRIFE JL, KIRKS DR, BAILEY WW. Vascular rings - MR imaging. *Am J Radiol* 149: 251-256 (1987).
- [12] BLACKWELL GG, POHOST GM. The evolving role of MRI in the assessment of coronary artery disease. *Am J Cardiol* 75: 74D-78D (1995).
- [13] BOGAERT J, DE MAN F, RADEMAKERS F, WEEMAES K, VERSCHAKELLEN JA, DE GEEST H, BAERT AL. Right atrial tumor arising on an atrial septal aneurysm. Assessment by MR imaging. *Clin Imaging* 19: 172-175 (1995).
- [14] BOTTOMLEY PA, WEISS RG, HARDY CJ, BAUMGARTNER WA. Myocardial high-energy phosphate metabolism and allograft rejection in patients with heart transplants. *Radiology* 181: 67-75 (1991).
- [15] BOUCHARD A, REEVES RC, CRANNEY G, SILBER S, BOURGE R, BISHOP SP, POHOST GM. Strategy for accurate quantitation of myocardial infarct size using proton NMR imaging. *Circulation* 76(Suppl IV): 294 (1987).
- [16] BROWN JJ, HIGGINS CB, GERBER KH, PECK W, STRICH G, SLUTSKY R. Nuclear magnetic resonance analysis of acute and chronic myocardial infarction in dogs. Alterations in spin lattice relaxation times. *Am Heart J* 108: 1292-1297 (1984).
- [17] BRUNOTTE F, PEIFFERT B, EXCANYE JM, PINELLI G, ZAMORANO J, WALKER PM, ROBERT J, VILLEMOT JP. Nuclear magnetic resonance spectroscopy of excised human hearts. *Br Heart J* 68: 272-275 (1992).
- [18] BUONOCORE MH. Estimation of total coronary artery flow using measurements of flow in the ascending aorta. *Magn Reson Med* 32: 602-611 (1994).
- [19] BURROWS PE, BENSON LN, BABYN P, MACDONALD C. Magnetic resonance imaging of the iliofemoral arteries after balloon dilation angioplasty of aortic arch obstructions in children. *Circulation* 90: 915-920 (1994).
- [20] BURROWS PE, MACDONALD CE. Magnetic resonance imaging of the pediatric thoracic aorta. *Semin Ultrasound CT MR* 14: 129-144 (1993).
- [21] CAMPBELL R, MOREAU GA, JOHNS JA, KULKARMI M. Detection of caval obstruction by magnetic resonance imaging after intraatrial repair of transposition of the great arteries. *Am J Cardiol* 60: 688-691 (1987).
- [22] CHUNG KJ, SIMPSON IA, NEWMAN R, SAHN D, SHERMAN F, HESSELINK J. Cinemagnetic resonance imaging for evaluation of congenital heart disease: Role in pediatric cardiology compared with echocardiography and angiography. *J Pediatr* 113: 1028-1035 (1988).
- [23] CLARKE GD, ECKELS R, CHANEY C, SMITH D, DITTRICH J, HUNDLEY WG, NESS AIVER M, LI HF, PARKEY RW, PESHOCK RM. Measurement of absolute epicardial coronary artery flow and flow reserve with breath-hold cine phase-contrast magnetic resonance imaging. *Circulation* 91: 2627-2634 (1995).
- [24] CRANNEY GB, LOTAN CS, DEAN L, BAXLEY W, BOUCHARD A, POHOST G. Left ventricular volume estimation using intrinsic axis cine NMR-validation by calibrated ventricular angiography. *Circulation* 78: 1717 (1988).
- [25] D'SILVA SA, NALLADARU ZM, DALVI BV, KALE PA, TENDOLKAR AG. MRI as guide to surgical approach in tuberculous pericardial abscess. Case report. *Scand J Thorac Cardiovasc Surg* 26: 229-231 (1992).
- [26] DENDALE PA, FRANKEN PR, WALDMAN GJ, DE MOOR DG, TOMBEUR DA, BLOCK PF, DE ROOS A. Low-dose dobutamine magnetic resonance imaging as an alternative to echocardiography in the detection of viable myocardium after acute infarction. *Am Heart J* 130: 134-140 (1995).
- [27] DESNOS M, BROCHET E, CRISTOFINI P, COSNARD G, KEDDARI M, MOSTEFAI M, GAY J. Polyvisceral echinococcosis with cardiac involvement imaged by two-dimensional echocardiography, computed tomography and nuclear magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 59: 383-384 (1987).
- [28] DI CESARE E, DI RENZI P, PAVONE P, MARSILI L, CASTALDO F, PASSARIELLO R. Postsurgical follow-up

- of aortic dissections by MRI. *Eur J Radiol* 13: 27-30 (1991).
- [29] DI RENZI P, FEDELE F, DI CESARE E, PAVONE P, FABIETTI F, SCIOMER S, VIZZA DC, DAGIANTI A, PASSARIELLO R. Identification of coronary artery bypass grafts: reliability of MRI in clinical practice. *Int J Card Imaging* 8: 85-94 (1992).
- [30] DIDIER D, HIGGINS CB, FISHER MR, OSAKI L, SILVERMAN N, CHEITLIN M. Congenital heart disease: gated MR imaging in 72 patients. *Radiology* 158: 227-235 (1986).
- [31] DIDIER D, TERRIER F, GROSSHOLZ M. Darstellung des Perikards mit Magnetresonanztomographie. *Radiologe* 33: 87-94 (1993).
- [32] DILWORTH LR, AISEN AM, MANCINI GBJ, BUDA A. Serial nuclear magnetic resonance imaging in acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 59: 1203-1205 (1987).
- [33] DINSMORE RE, WISMER GL, GUYER GL, THOMPSON R, TIU P, STRATEMEIER E, MILLER S, OKADA R, BRADY T. Magnetic resonance imaging of the interatrial septum and atrial septal defects. *Am J Radiol* 145: 697-703 (1985).
- [34] DINSMORE RE, LIBERTHSON RR, WISMER GL, TIU P, THOMPSON R, MCLLOUD TC, MARSHALL G, SAIMI S, STRATEMEIER E, OKADA R, BRADY TJ. Magnetic resonance imaging of thoracic aortic aneurysms: Comparison with other imaging methods. *Am J Radiol* 146: 309-314 (1986).
- [35] DOPPMAN JL, RIENMÜLLER R, LISSNER J, CYRAN J, BOLTE HD, STRAUER BE, HELLWIG H. Computed tomography in constrictive pericardial disease. *J Comput Assist Tomogr* 5: 1-11 (1981).
- [36] DUERINCKX AJ, WEXLER L, BANERJEE A, HIGGINS SS, HARDY CE, HELTON G, RHEE J, MAHBOUBI S, HIGGINS CB. Postoperative evaluation of pulmonary arteries in congenital heart surgery by magnetic resonance imaging: comparison with echocardiography. *Am Heart J* 128: 1139-1146 (1994).
- [37] DURHAM JR, HACKWORTH CA, TOBER JC, BOVA JG, BENNETT WF, SCHMALBROCK P, VAN AMAN ME, HOROWITZ JD, WRIGHT JG, SMEAD WL. Magnetic resonance angiography in the preoperative evaluation of abdominal aneurysms. *Am J Surg* 166: 173-177 (1993).
- [38] EDELMANN RR, THOMPSON R, KANTOR H, BRADY T, LEART M, DINSMORE R. Cardiac function: Evaluation with fast-echo MR imaging. *Radiology* 162: 611-615 (1987).
- [39] EICHSTÄDT HW, FELIX R, DOUGHERTY FC, LANGER M, RUTSCH W, SCHMUTZLER H. Magnetic resonance imaging (MRI) in different stages of myocardial infarction using the contrast agent gadolinium-DTPA. *Clin Cardiol* 9: 527-535 (1986).
- [40] EUGENE M, LE MOYEC L, DE CERTAINES J, DESRUENES M, LE RUMEUR E, FRAYSSE JB, CABROL C. Lipoproteins in heart transplantation: proton magnetic resonance spectroscopy of plasma. *Magn Reson Med* 18: 93-101 (1991).
- [41] FILIPCHUK NG, PESCHOCK RM, MALLOY GR, JANSEN D, REDISH GR, GABLIANI G, PEKWE RW, WILLERSON J. Detection and localization of recent myocardial infarction by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 58: 214-219 (1986).
- [42] FIRMIN DN, NAYLER GL, KLIPSTEIN RH, UNDERWOOD SR, REES RSO, LONGMORE DB. In vivo validation of MR velocity imaging. *J Comput Assist Tomogr* 11: 751-756 (1987).
- [43] FISHER MR, HRICAK H, HIGGINS CB. Magnetic resonance imaging of developmental venous anomalies. *Am J Radiol* 145: 705-709 (1985).
- [44] FLAK B, LI DKB, HO BYB, KNICKERBOCKER WJ, FACHE S, MAYO J, CHUNG W. Magnetic resonance imaging of aneurysms of the abdominal aorta. *Am J Radiol* 144: 991-996 (1985).
- [45] FLETCHER DB, JACOBSTEIN MD. MRI of congenital abnormalities of the great arteries. *Am J Radiol* 146: 941-948 (1986).
- [46] FRIST WH, LORENZ CH, WALKER ES, LOYD JE, STEWART JR, GRAHAM JR. TP, PEARLSTEIN DP, KEY SP, MERRILL WH. MRI complements standard assessment of right ventricular function after lung transplantation. *Ann Thorac Surg* 60: 268-271 (1995).
- [47] FURBER A, PEZARD P, JEUNE JJ, GESLIN P, TADEI A, JALLET P. Radionuclide angiography and magnetic resonance imaging: complementary non-invasive methods in the diagnosis of constrictive pericarditis. *Eur J Nucl Med* 22: 1292-1298 (1995).
- [48] GASSNER I, JUDMAIER W, FINK C, LENER M, WALDENBERGER F, SCHARFETTER H, HAMMERER I. Diagnosis of congenital pericardial defects, including a pathognomic sign for dangerous apical ventricular herniation, on magnetic resonance imaging. *Br Heart J* 74: 60-66 (1995).
- [49] GEISINGER MA, RISIUS B, O'DONNELL JA, ZELCH M, MOSDIE D, GRAVES R, GEORGE C. Thoracic aortic dissections: Magnetic resonance imaging. *Radiology* 155: 407-412 (1985).
- [50] GINDEA AJ, STEELE P, RUMANCIK WM, GENTIN B, CULUBET M, FEINER H, SANGER J, KRONZON I. Biventricular cavity obliteration by metastatic malignant melanoma: Role of magnetic resonance imaging in the diagnosis. *Am Heart J* 114: 1249-1253 (1987).
- [51] GINDEA AJ, GENTIN B, NAIDICH DP, FREEDBURG R, MCCAWLEY D, KRONZON I. Unusual cardiac metastasis in hypernephroma: The complementary role of echocardiography and magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 116: 1359-1361 (1988).
- [52] GLAZER HS, GUTIERREZ FR, LEVITT RG, LEE J, MURPHY W. The thoracic aorta studied by MR imaging. *Radiology* 157: 149-155 (1985).
- [53] GOESSINGER HD, SLOSTRZONEK P, ZANGENEH M, NEWHOLD A, HEROLD C, SCHMOLIVER R, LACZKO-

- vics A, TSCHOLAKOFF D, MOSSLACHER H. Magnetic resonance imaging findings in a patient with pericardial mesothelioma. *Am Heart J* 115: 1321-1322 (1988).
- [54] GOMES AS, LOIS JF, CHILD JS, BROWN K, BATRA P. Cardiac tumors and thrombus: Evaluation with MR imaging. *Am J Radiol* 149: 895-899 (1987).
- [55] GUHL L, GRAWUNDER HJ, ARLART IP. Kernspintomographische Befunde bei kardialen Tumoren. *Radio-*logie** 33: 153-158 (1993).
- [56] GUSTAVSSON ML, GANNEDAHL G, BACKER AE, LARSON G, OLLING A, TUFVESON G, SAMUELSSON BE. Anti-carbohydrate antibodies associated with hyperacute rejection in a vascularized mouse heart-to-rat xenotransplantation model. *Transplantation* 61: 957-963 (1996).
- [57] GUTIERREZ FR, SHACKELFORD GD, MCKNIGHT RC, LEVITT RG, HARTMANN A. Diagnosis of congenital absence of left pericardium by MR imaging. *J Comput Assist Tomogr* 9: 551-553 (1985).
- [58] HALL TS, BAUMGARTNER WA, BORKON AM, LAFRANCE ND, TRAIL TA, NORRIS S, HUTCHIN GM, BRAWN J, REITZ B. Diagnosis of acute cardiac rejection with antimyosin monoclonal antibody, phosphorous nuclear magnetic resonance imaging, two-dimensional echocardiography, and endocardial biopsy. *J Heart Lung Transplant* 5: 419-424 (1986).
- [59] HAMMERSMITH SM, COLLETTI PM, NORRIS SL, BOSWELL WD, RALLS PW, HAYWOOD LJ. Cardiac calcifications: difficult MRI diagnosis. *Magn Reson Imaging* 9: 195-200 (1991).
- [60] HARRITY P, PATEL A, BIANCO J, SUBRAMANIAN R. Improved diagnosis and characterization of postinfarction left ventricular pseudo-aneurysm by cardiac magnetic resonance imaging. *Clin Cardiol* 14: 603-606 (1991).
- [61] HARTNELL GG, HUGHES LA, KO JP, COHEN MC. Magnetic resonance imaging of pericardial constriction: comparison of cine MR angiography and spin-echo techniques. *Clin Radiol* 51: 268-272 (1996).
- [62] HATA A, NUMANO F. Magnetic resonance imaging of vascular changes in Takayasu arteritis. *Int J Cardiol* 52: 45-52 (1995).
- [63] HERFKENS RJ, CHARLES HC, NEGRO-VILAR R. In vivo phosphorous-31 NMR spectroscopy of human heart transplants. 7th annual meeting S.M.R.M. (1988).
- [64] HIGGINS CB, HERFKENS R, LIPTON M, SIEVERS R, SHELTON P, KAUFMAN L, CROOKS L. Nuclear magnetic resonance imaging of acute myocardial infarction in dogs. Alterations in magnetic relaxation times. *Am J Cardiol* 52: 184-192 (1983).
- [65] HIRSCH R, KILNER PJ, CONNELLY MS, REDINGTON AN, ST JOHN SUTTON MG, SOMERVILLE J. Diagnosis in adolescents and adults with congenital heart disease. Prospective assessment of individual and combined roles of magnetic resonance imaging and transesophageal echocardiography. *Circulation* 90: 2937-2951 (1994).
- [66] HOFMAN MB, PASCHAL CB, LI D, HAACKE EM, VAN ROSSUM AC, SPRENGER M. MRI of coronary arteries: 2D breath-hold vs 3D respiratory-gated acquisition. *J Comput Assist Tomogr* 19: 56-62 (1995).
- [67] HOLMAN ER, VAN ROSSUM AC, DOESBURG T, VAN DER WALL EE, DE ROOS A, VISSER CA. Assessment of acute myocardial infarction in man with magnetic resonance imaging and the use of new paramagnetic contrast agent gadolinium-BOPTA. *Magn Reson Imaging* 14: 21-29 (1996).
- [68] HOLMVANG G, EDELMAN R, PEARLMAN JD, MARSHALL JE, BRADY TJ, KANATON HL. Study of valvular regurgitation by cine-NMR: Comparison to color Doppler flow maps. *Circulation* 76 (Suppl IV): 120 (1987).
- [69] HUBER DJ, KIRKMAN RL, KUPIEC-WEGLINSKI JW, ARAUJS JL, TILNEY NL, ADAMS DF. The detection of cardiac allograft rejection by alterations in proton NMR relaxation times. *Invest Radiol* 20: 796-802 (1985).
- [70] HUGHES JP, RUTTLEY, MS, MUSUMECI F. Case report: traumatic aortic rupture: demonstration by magnetic resonance imaging. *Br J Radiol* 67: 1264-1267 (1994).
- [71] HUNDLEY WG, LANGE RA, CLARKE GD, MESHACK BM, PAYNE J, LANDAU C, MCCOLL R, SAYAD DE, WILLETT DL, WILLARD JE, HILLIS LD, PESHOCK RM. Assessment of coronary arterial flow and flow reserve in humans with magnetic resonance imaging. *Circulation* 93: 1502-1508 (1996).
- [72] HUNDLEY WG, LI HF, HILLIS LD, MESHACK BM, LANGE RA, WILLARD JE, LANDAU C, PESHOCK RM. Quantitation of cardiac output with velocity-encoded, phase-difference magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 75: 1250-1255 (1995).
- [73] JACOBSTEIN MD, FLETCHER BD, GOLDSTEIN S, RIEMENSCHNEIDER TA. Evaluation of atrioventricular septal defect by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 55: 1158-1161 (1985).
- [74] JOHNSTON DL, THOMPSON RC, LIU P, DINSMORE RE, WISMER GL, SAINI S, KAUL S, ROSEN BR, BRADY TJ, IKADA RD, BEAULIEU PA. Magnetic resonance imaging during acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 57: 1059-1065 (1986).
- [75] JOHNSTON DL, GUPTA VK, WENDT RE, MAHMARIAN JJ, VERANI MS. Detection of viable myocardium in segments with fixed defects on thallium-201 scintigraphy: usefulness of magnetic resonance imaging early after acute myocardial infarction. *Magn Reson Imaging* 11: 949-956 (1993).
- [76] JOHNSTON DL, WENDT RE, MULVAGH SL, RUBIN H. Characterization of acute myocardial infarction by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 69: 1291-1295 (1992).
- [77] JUDD RM, LUGO-OLIVIERI CH, ARAI M, KONDO T, CROISILLE P, LIMA JA, MOHAN V, BECKER LC, ZER-

- HOUNI EA. Physiological basis of myocardial contrast enhancement in fast magnetic resonance images of 2-day-old reperfused canine infarcts. *Circulation* 92: 1902-1910 (1995).
- [78] KAMINAGA T, YAMADA N, TAKAMIYA M, NISHIMURA T. Sequential MR signal change of the thrombus in the false lumen of thrombosed aortic dissection. *Magn Reson Imaging* 13: 773-779 (1995).
- [79] KANDA T, NAGANUMA F, SUZUKI T, MURATA K. Masked atrial septal defect in constrictive pericarditis. *J Med* 24: 325-332 (1993).
- [80] KATZ J, MILLIKEN MC, STRAY-GUNDERSEN J, BUJA LM, PARKEY RW, MITCHELL JH, PESHOCK RM. Estimation of human myocardial mass with MR imaging. *Radiology* 169: 495-498 (1988).
- [81] KATZ J, GLAZER HS, SIEGEL MJ, QUTIEREZ F, LEVITT RG, LEE JK. Mediastinal vessels: Postoperative evaluation with MR imaging. *Radiology* 161: 647-651 (1986).
- [82] KAUL S, WISMER GL, BRADY TJ, JOHNSON DL, WAYMAN AE, OKADA RD, DINSMORE RE. Measurement of normal left heart dimensions using optimally oriented MR images. *Am J Radiol* 146: 75-79 (1986).
- [83] KELLER AM, PESHOCK RM, MALLOY CR, BUYER LM, NUNNALLY R, PARKEY RW, WILLERSON JT. In vivo measurement of myocardial mass using nuclear magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 8: 113-117 (1986).
- [84] KEMKES BM, SCHUTZ A, ENGELHARDT M, BRANDL U, BREUER M. Noninvasive methods of rejection diagnosis after heart transplantation. *J Heart Lung Transplant* 11: S221-231 (1992).
- [85] KERSTING-SOMMERHOFF BA, HIGGINS CB, WHITE RD, SOMMERHOFF MD, LIPTON MJ. Aortic dissection: Sensitivity and specificity of MR imaging. *Radiology* 166: 651-655 (1988).
- [86] KERSTING-SOMMERHOFF BA, SECHTEM UP, SCHILLER NB, LIPTON MJ, HIGGINS CB. MR imaging of the thoracic aorta in Marfan patients. *J Comput Assist Tomogr* 11: 633-639 (1987).
- [87] KIM TK, CHOE YH, KIM HS, KO JK, LEE YT, LEE HJ, PARK JH. Anomalous origin of the right pulmonary artery from the ascending aorta: diagnosis by magnetic resonance imaging. *Cardiovasc Intervent Radiol* 18: 118-121 (1995).
- [88] KONERMANN M, GROTZ J, HOTZINGER H, JOSEPHS W, ODENTHAL HJ, LASCHEWSKI F, SANNER B, BEYER HK. Cine-MRT in der funktionellen und morphologischen Diagnostik des Herzens nach Myokardinfarkt. Vergleich zur Angiokardiographie, zweidimensionalen Echokardiographie, Herzbinnenraumszintigraphie und enzymatischen Infarktgrößenbestimmung. *Fortschr Röntgenstr* 163: 24-31 (1995).
- [89] KUBOTA S, SUZUKI T, MURATA K. Cine magnetic resonance imaging for diagnosis of right coronary arterial-ventricular fistula. *Chest* 100: 735-737 (1991).
- [90] KUMAR A, MILLER R, FINLEY JP, ROY DL, GILLIS DA, NANTON MA. Follow-up after patch aortoplasty for coarctation of aorta. *Can J Cardiol* 9: 751-753 (1993).
- [91] LEE R, FISHER MR. MR imaging of cardiac metastases from malignant fibrous histiocytoma. *J Comput Assist Tomogr* 13: 126-128 (1989).
- [92] LEE JKT, LING D, HEIKEN JP, GLAZER HS, SICARD GA, TOTTY WG, LEVITT RA, MURPHY WA. Magnetic resonance imaging of the abdominal aortic aneurysms. *Am J Radiol* 143: 1197-1202 (1984).
- [93] LIEBERMAN JM, ALFIDI RJ, NELSON AD, BATTI RE, MOIR TW, HASGA JR, KOPIWODA S, MIRALDI FD, COHEN AM, BUTTER HE, NARA A, HELLERSTEIN HK. Gated magnetic resonance imaging of the normal and diseased heart. *Radiology* 152: 465-470 (1984).
- [94] LIMA JA, JUDD RM, BAZILLE A, SCHULMAN SP, ATALLAR E, ZERHOUNI EA. Regional heterogeneity of human myocardial infarcts demonstrated by contrast-enhanced MRI. Potential mechanisms. *Circulation* 92: 1117-1125 (1995).
- [95] LOTAN CS, CRANNEY GB, DOYLE M, POHOST GM. Fat-shift artifact simulating aortic dissection. *Am J Radiol* 152: 385-386 (1989).
- [96] LUND G, MORIN RL, OLIVARI MT, RING WS. Serial myocardial T2 relaxation time measurements in normal subjects and heart transplant recipients. *J Heart Lung Transpl* 7: 274-279 (1988).
- [97] MACMILLAN RM, IVANOFF J, TULCHINSKY M, CHANDRASEKARAN K. Clinical application of magnetic resonance imaging of the heart and great vessels. *Angiology* 43: 709-719 (1992).
- [98] MANNING WJ, LI W, EDELMAN RR. A preliminary report comparing magnetic resonance coronary angiography with conventional angiography. *N Engl J Med* 328: 828-832 (1993).
- [99] MARAIS GE, KEGEL JG, SHAH HS, LENORA C, NAZAL S, STARK P. Magnetic resonance imaging – the evaluation of choice in residual shunt after congenital heart disease surgery? *Chest* 99: 249-251 (1991).
- [100] MASANI ND, BANNING AP, JONES RA, RUTTLEY MS, FRASER AG. Follow-up of chronic thoracic aortic dissection: comparison of transesophageal echocardiography and magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 131: 1156-1163 (1996).
- [101] MATHEIJSEN NA, DE ROOS A, DOORNBOS J, REIBER JH, WALDMAN GJ, VAN DER WALL EE. Left ventricular wall motion analysis in patients with acute myocardial infarction using magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 11: 485-492 (1993).
- [102] MATSUOKA H, HAMADA M, HONDA T, KAWAKAMI H, ABE M, SHIGEMATSU Y, SUMIMOTO T, HIWADA K. Morphologic and histologic characterization of cardiac myxomas by magnetic resonance imaging. *Angiology* 47: 693-698 (1996).

- [103] MATSUOKA H, SHIGEMATSU Y, OHTANI T, SUMIMOTO T, HAMADA M, HIWADA K, MIKI H, SADAMOTO K. Analysis of blood flow patterns in aortic aneurysm by cine magnetic resonance imaging – a review of case material. *Angiology* 43: 181-187 (1992).
- [104] McMANUS RP, O'HAIR DP, SCHWEIGER J, BEITZINGER J, SIEGEL R. Cyclosporine-associated central neurotoxicity after heart transplantation. *Ann Thorac Surg* 53: 326-327 (1992).
- [105] McNAMARA MT, HIGGINS CB. Magnetic resonance imaging of chronic myocardial infarcts in man. *Am J Radiol* 146: 315-320 (1986).
- [106] MEIER RA, HARTNELL GG. MRI of right atrial pseudomass: is it really a diagnostic problem? *J Comput Assist Tomogr* 18: 398-401 (1994).
- [107] MENEGUS MA, GREENBERG MA, SPINDOLA-FRANCO H, FAYEMI A. Magnetic resonance imaging of suspected atrial tumors. *Am Heart J* 123: 1260-1268 (1992).
- [108] MORIARTY JA, EDELMAN RR, TUMEH SS. CT and MRI of mycotic aneurysms of the abdominal aorta. *J Comput Assist Tomogr* 16: 941-943 (1992).
- [109] MOUSSEAU E, FARGE D, GUILLEMAIN R, BRUNEVAL P, VULSER C, COUETIL JP, CARPENTIER A, GAUX JC. Assessing human cardiac allograft rejection using MRI with Gd-DOTA. *J Comput Assist Tomogr* 17: 237-244 (1993).
- [110] MULLER CAMESAS A, LICHTSTEIN E, KRAMER J, LIEBESKIND D, KRENZEN I, TYPAS D, BODENHEIMER M. Complementary use of two dimensional echocardiography and magnetic resonance imaging in the diagnosis of ventricular myxoma. *Am Heart J* 114: 440-442 (1987).
- [111] MUNDINGER A, GRUBER HP, DINKEL E, GEIBEL A, BECK A, WIMMER B, SCHLOSSER V. Imaging in cardiac mass lesions. *Radiat Med* 10: 135-140 (1992).
- [112] MURRAY C, ALPERT JS. Diagnosis of acute myocardial infarction. *Curr Opin Cardiol* 9: 465-470 (1994).
- [113] NIENHABER CA, VON KODOLITSCH Y, SPIELMANN RP. Akute und subakute Dissektion der thorakalen Aorta: Diagnostische Bedeutung der Magnetresonanztomographie. *Herz* 17: 338-347 (1992).
- [114] NISHIMURA T, SADA M, SASAKI H, YUTANI C, FUJITA T, AMESNUYA H, KOZUKA T, AKUTSU T, MANABE H. Assessment of severity of cardiac rejection in heterotopic heart transplantation using indium-111 antimyosin and magnetic resonance imaging. *Cardiovasc Res* 22: 108-112 (1988).
- [115] NIWA K, UCHISHIBA M, AOTSUKA H, TOBITA K, MATSUO K, FUJIWARA T, TATENO S, HAMADA H. Measurement of ventricular volumes by cine magnetic resonance imaging in complex congenital heart disease with morphologically abnormal ventricles. *Am Heart J* 131: 567-575 (1996).
- [116] OHTAKI A, OGIWARA H, SAKATA K, TAKAHASHI T, MORISHITA Y. Long-term heart preservation by the combined method of simple immersion and coronary perfusion. *J Heart Lung Transplant* 15: 269-274 (1996).
- [117] PAULIN S, VON SCHULTHESS GK, FOSSEL E, KRAYENBÜHL HP. MR imaging of the aortic root and proximal coronary arteries. *Am J Radiol* 148: 665-670 (1987).
- [118] PENNELL DJ, FIRMIN DN, BURGER P, YANG GZ, MANZARA CC, ELL PJ, SWANTON RH, WALKER JM, UNDERWOOD SR, LONGMORE DB. Assessment of magnetic resonance velocity mapping of global ventricular function during dobutamine infusion in coronary artery disease. *Br Heart J* 74: 163-170 (1995).
- [119] PFLUGFELDER PW, WISENBERG G, BOUGHNER DR. Detection of atrial myxoma by magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 55: 242-243 (1985).
- [120] PFLUGFELDER PW, WISENBERG G, PRATO FS, CARROLL SE, TURNER KL. Early detection of canine myocardial infarction by magnetic resonance imaging in vivo. *Circulation* 71: 587-594 (1985).
- [121] PIZZARELLO RA, GOLDBERG SM, GOLDMAN MA, GOTTESMAN R, v. FETTEN J, BROWN N, KAHN EI, STEIN HL. Tumor of the heart diagnosed by magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 5: 989-991 (1985).
- [122] REES RSO, SOMERVILLE J, WARNES C, UNDERWOOD R, FIRMIN D, KLIPSTEIN R, LONGMORE D. Comparison of magnetic resonance imaging with echocardiography and radionuclide angiography in assessing cardiac function and anatomy following Mustard's operation for transposition of great arteries. *Am J Cardiol* 61: 1316-1322 (1988).
- [123] REICHEK N. Magnetic resonance imaging for assessment of myocardial function. *Magn Reson Q* 7: 255-274 (1991).
- [124] REYNEN K. Cardiac myxomas. *N Engl J Med* 333: 1610-1617 (1995).
- [125] RIENMULLER R. The imaging of cardiac transplantation. *Invest Radiol* 28: S149 (1993).
- [126] ROKEY R, VERANI MS, BOLLI R, KUS LC, FORD JJ, WENDT RE, SCHNEIDERS NJ, BRYAN RN, ROBERTS R. Myocardial infarct size quantification by MR imaging after coronary artery occlusion in dogs. *Radiology* 158: 771-774 (1986).
- [127] RUBINSTEIN RI, ASKENASE AD, THICKMAN D, FELDMAN MS, AGARWAL JB, HELFANT RH. Magnetic resonance imaging to evaluate patency of aorto-coronary bypass grafts. *Circulation* 76: 786-791 (1987).
- [128] SAEED M, WENDLAND MF, SEELOS K, MASUI T, DERUGIN N, HIGGINS CB. Effect of cilazapril on regional left ventricular wall thickness and chamber dimension following acute myocardial infarction: in vivo assessment using MRI. *Am Heart J* 123: 1472-1480 (1992).

- [129] SAEED M, WENDLAND ME, YU KK, LAUERMA K, LI HT, DERUGIN N, CAVAGNA FM, HIGGINS CB. Identification of myocardial reperfusion with echo planar magnetic resonance imaging. Discrimination between occlusive and reperfused infarctions. *Circulation* 90: 1492-1501 (1994).
- [130] SCHAEFER S, PESHOCK RM, MALLOY CR, KATZ J, PARKEY RW, WILLERSON JT. Nuclear magnetic resonance imaging in Marfan's syndrome. *J Am Coll Cardiol* 9: 70-74 (1987).
- [131] SCHOLZ TD, CECKLER TL, BALABAN RS. Magnetization transfer characterization of hypertensive cardiomyopathy: significance of tissue water content. *Magn Reson Med* 29: 352-357 (1993).
- [132] SCHOLZ TD, HOYT RF, DE LEONARDIS JR, CECKLER TL, BALABAN RS. Water-macromolecular proton magnetization transfer in infarcted myocardium: a method to enhance magnetic resonance image contrast. *Magn Reson Med* 33: 178-184 (1995).
- [133] SCHOLZ TD, MARTINS JB, SKORTON DJ. NMR relaxation times in acute myocardial infarction: relative influence of changes in tissue water and fat content. *Magn Reson Med* 23: 89-95 (1992).
- [134] SECHTEM U, SOMMERHOFF BA, MARKIEWICZ W, WHITE RD, CHEITLIN MD, HIGGINS CB. Assessment of regional left ventricular wall thickening by magnetic resonance imaging: evaluation in normal persons and patients with global and regional dysfunction. *Am J Cardiol* 59: 145-151 (1987).
- [135] SECHTEM U, VOTH E, BAER F, SCHNEIDER C, THEISEN P, SCHICHA H. Assessment of residual viability in patients with myocardial infarction using magnetic resonance techniques. *Int J Card Imaging* 9: 31-40 (1993).
- [136] SEIDERER VM, VON ARNIM T, MOSER E, RIENMÜLLER R, HAHN D. Gd-DTPA in der kernspintomographischen Diagnostik chronischer Myokardinfarkte. *Fortschr Röntgenstr* 145: 666-673 (1986).
- [137] SEMELKA RC, SHOENUT JP, WILSON ME, PELLECH AE, PATTON JN. Cardiac masses: signal intensity features on spin-echo, gradient-echo, gadolinium-enhanced spin-echo, and TurboFLASH images. *J Magn Reson Imaging* 2: 415-420 (1992).
- [138] SHIOTANI H, UENO H, MATSUNAGA K, MUROTANI A, YOSHIMURA M, TSUBOTA N. Evaluation of pericardial mesothelioma by Ga-67 and MRI. *Clin Nucl Med* 19: 553 (1994).
- [139] SILBER S. The present role of NMR as compared to other cardiac imaging techniques: a cardiologist's critical point of view. Second European Congress of NMR in Medicine and Biology. Berlin (1988).
- [140] SILBER S, CRANNEY G, POHOST GM. One Minute Cine NMR Left Ventricular Function Studies: Are They Reliable in Conjunction With Automated Edge Detection? Society of Magnetic Resonance in Medicine - Eighth Annual Scientific Meeting, August 12-18, Vol. 2, Amsterdam (1989).
- [141] SIMPSON IA, CHUNG KJ, GLASS RF, SAHN DJ, SHERMAN FS, HESSELINK J. Cine magnetic resonance imaging for evaluation of anatomy and flow relations in infants and children with coarctation of the aorta. *Circulation* 78: 142-148 (1988).
- [142] SOBERMAN MS, PLAUTH WH, WINN KJ, FOREST GC, HATCHER CR, SIK JD. Hemangioma of the right ventricle causing outflow tract obstruction. *J Thorac Cardiovasc Surg* 96: 307-309 (1988).
- [143] STEFFANS JC, SAKUMA H, BOURNE MW, HIGGINS CB. Magnetic resonance imaging in ischemic heart disease. *Am Heart J* 132: 156-173 (1996).
- [144] STEHLING MJ, HOWSEMAN AM, ORRIDGE RJ. Whole-body echo planar MR imaging at 0.5 T. *Radiology* 170: 257-263 (1989).
- [145] STEHLING MK, VON SMEKAL A, REISER M. MRT der Koronararterien: Möglichkeiten und Grenzen. Eine vergleichende Darstellung unter Berücksichtigung von Koronarangiographie, Echokardiographie und Electron-Beam-Tomographie. *Radiologe* 34: 462-468 (1994).
- [146] STERN HC, LOCHER D, WALLNOFER K, WEBER F, SCHEID KF, EMMRICH P, BUHLMEYER K. Noninvasive assessment of coarctation of the aorta: comparative measurements by two-dimensional echocardiography, magnetic resonance, and angiography. *Pediatr Cardiol* 12: 1-5 (1991).
- [147] SUNGER B, SECHTEM U, SCHICHA H. Kernspintomographische Befunde bei erwachsenen Patienten mit kongenital korrigierter Transposition der großen Arterien. *Z Kardiol* 84: 316-322 (1995).
- [148] SUTTON MG, MERCIER LA, GIULIANI E, LIE JT. Atrial myxomas - a review of clinical experience in 40 patients. *Mayo Clin Proc* 55: 371-376 (1980).
- [149] SUZUKI S, KANASHIRO M, WATANABE H, ARREMIYA H. Therapeutic effect of 15-deoxyspergualin on acute graft rejection detected by 31-P nuclear magnetic resonance spectrography and its effect on rat heart transplantation. *Transplantation* 46: 669-672 (1988).
- [150] TEIEN DE, WENDEL H, BJORNEBRINK J, EKELOUND L. Evaluation of anatomical obstruction by Doppler echocardiography and magnetic resonance imaging in patients with coarctation of the aorta. *Br Heart J* 69: 352-355 (1993).
- [151] THOMPSON RC, LIU P, BRADY TJ, OKADA RD, JOHNSTON DL. Serial magnetic resonance imaging in patients following acute myocardial infarction. *Magn Reson Imaging* 9: 155-158 (1991).
- [152] TOMIGUCHI S, MORISHITA S, NAKASHIMA R, HARA M, OYAMA Y, KOJIMA A, TAKAHASHI M. Usefulness of turbo-FLASH dynamic MR imaging of dissecting aneurysms of the thoracic aorta. *Cardiovasc Intervent Radiol* 17: 17-21 (1994).
- [153] TSCHOLAKOFF D, AHERNE T, YEE ES, DEMUGIN N, HIGGINS CB. Cardiac transplantation in dogs: Evaluation with MR. *Radiology* 157: 697-702 (1985).

- [154] UNDERWOOD SR, GILL CRW, FIRMIN DN, KLIPSTEIN RH, MOHIADDIN RH, REES RSO, LONMORE DB. Left ventricular volume measured rapidly by oblique magnetic resonance imaging. *Br Heart J* 60: 188-195 (1988).
- [155] UNDERWOOD SR, KLIPSTEIN RH, FIRMIN DN, FOX KM, POOLE PA, REES RSO, LONGMORE DB. Magnetic resonance assessment of aortic and mitral regurgitation. *Br Heart J* 56: 455-462 (1986).
- [156] UTZ JA, HERFKENS RJ, HEINSIMER JA, SHIMAKAWA A, GLOVER G, PELC N. Valvular regurgitation: Dynamic MR imaging. *Radiology* 168: 91-94 (1988).
- [157] VAN DER WALL EE, VLIAGEN HW, DE ROOS A, BRUSCHKE AV. Magnetic resonance imaging in coronary artery disease. *Circulation* 92: 2723-2739 (1995).
- [158] VAN ROSSUM AC, POST JC, VISSER CA. Coronary imaging using MRI. *Herz* 21: 97-105 (1996).
- [159] VAN ROSSUM AC, VISSER FC, SPRENGER, VAN EENIGE MG, VALK J, ROOS JP. Evaluation of magnetic resonance for determination of left ventricular ejection fraction and comparison with angiography. *Am J Cardiol* 62: 628-633 (1988).
- [160] VAN RUGGE FP, HOLMAN ER, VAN DER WALL EE, DE ROOS A, VAN DER LAARSE A, BRUSCHKE AV. Quantitation of global and regional left ventricular function by cine magnetic resonance imaging during dobutamine stress in normal human subjects. *Eur Heart J* 14: 456-463 (1993).
- [161] VANNIER MW, GUTIERREZ FR, CANTER CE, HILDEBOLT CR, PILGRAM TK, MCKNIGHT RC, LASCHINGER JC, BROWN JJ, MIROWITZ SA, RAISHER BD et al. Evaluation of congenital heart disease by three-dimensional magnetic resonance imaging. *J Digit Imaging* 4: 153-158 (1991).
- [162] VON SMEKAL A, SILBER S, POHOST GM. Eine neue Belastungsmethode während kardiologischer Kernspintomographie. *Z Kardiol* 78 (Suppl I): 15 (1989).
- [163] WALKER PM, MARIE PY, MEZERAY C, BESSIERES M, ESCANYE JM, KARCHER G, DANCHIN N, MATTEI S, VILLEMOT JP, BERTRAND A. Synchronized inversion recovery-spin echo sequences for precise in vivo T1 measurement of human myocardium: a pilot study on 22 healthy subjects. *Magn Reson Med* 29: 637-641 (1993).
- [164] WALPOTH BH, LAZEYRAS F, TSCHOPP A, SCHAFFNER T, ALTHAUS U, BILLINHAM M, MORRIS R. Assessment of cardiac rejection and immunosuppression by magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Transplant Proc* 27: 2088-2091 (1995).
- [165] WESBEY GE, HIGGINS CB, MCNAMARA MT, ENGELSTACK BL, LIPTON MJ, SIEVERS R, EHMAN RL, LOVIN J, BRASCH RC. Effect of Gadolinium-DTPA on the magnetic relaxation times of normal and infarcted myocardium. *Radiology* 153: 165-169 (1984).
- [166] WEXLER L, HIGGINS CB. The use of magnetic resonance imaging in adult congenital heart disease. *Am J Card Imaging* 9: 15-28 (1995).
- [167] WEXLER L, HIGGINS CB, HERFKENS RJ. Magnetic resonance imaging in adult congenital heart disease. *J Thorac Imaging* 9: 219-229 (1994).
- [168] WHITE CS. MR evaluation of the pericardium. *Top Magn Reson Imaging* 7: 258-266 (1995).
- [169] WHITE RD, PELUGELDER PW, LIPTON MJ, HIGGINS CB. Coronary artery bypass grafts: Evaluation of patency with cine MR imaging. *Am J Radiol* 150: 1271-1274 (1988).
- [170] YASUTAKE M, SASAKI H, FUJIMATAU M, KANDA T, OSHIBENCHI M, OOTSU N, ALARASHI J, HAYAKAWA H, OKUMURA H. Metastatic cholangiocarcinoma to the right atrial appendage detected by magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 116: 566-568 (1988).
- [171] YOKOTA C, NONOGI H, MIYAZAKI S, GOTO Y, MAENO M, DAIKOKU S, ITOH A, HAZE K, YAMADA N. Gadolinium-enhanced magnetic resonance imaging in acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 75: 577-581 (1995).
- [172] YU KK, SAEED M, WENDLAND MF, DERUGIN N, CAVAGNA FM, HIGGINS CB. Real-time dynamics of an extravascular magnetic resonance contrast medium in acutely infarcted myocardium using inversion recovery and gradient-recalled echo-planar imaging. *Invest Radiol* 27: 927-934 (1992).
- [173] ZERHOUNI EA, PARISH DM, ROGERS WJ, YANG A, SHAPIRO EP. Human heart: Tagging with MR imaging – a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 169: 59-63 (1988).