

Quelle: Theissen P, Baer F.M.: Kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie; in: Klinische Kardiologie (Hrsg. E. Erdmann), Springer 2000

## Kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie

### 1 Entwicklung einer neuen kardialen diagnostischen Technik

Die Magnetresonanztomographie (MRT) basiert auf einem physikalischen Phänomen, das bereits 1946 entdeckt wurde. Die Grundlagen der Physik sollen hier keine Rolle spielen. Als Resultat erwächst jedenfalls die praktische Konsequenz, dass man Protonen mit hochfrequenten Radiowellen zur Aussendung eines magnetischen Impulses bringen kann. Die Analyse der Rohdaten erfolgt mit Algorithmen, die man T1- (Spin-echo-Technik) und T2-Wichtung (Gradienten-echo-Technik) nennt und in denen Gewebe unterschiedliche Signalgebung zeigen.

Darüber hinaus zeigt Gewebe in Bewegung (z.B. Blut) ein eigenes physikalisches Verhalten, aus dem man auf die Flussgeschwindigkeit zurückrechnen kann (die Analogie zum Doppler-Effekt der Ultraschall-Diagnostik).

Dem praktischen Einsatz der MRT standen bislang mehrere Gründe entgegen:

- **Mangelnde Verfügbarkeit** einer MRT: Inzwischen stehen MRT in Deutschland nahezu flächendeckend zur Verfügung. Allerdings zeigen die meisten Geräte
- eine **mangelnde Kürze der Rohdatenaufnahme**. Dadurch können sich bewegende Organe nur unzureichend artefaktfrei abgebildet werden. Neuere MRT liefern Bilder mit einer Aufnahmezeit von 100ms, eine zusätzliche EKG-Triggerung der Aufnahme und Kurzaufnahme in Atemstillstand liefern inzwischen detailgenaue Standardaufnahmen. Durch dynamische EKG-Triggerung (Aufnahmen während verschiedener Phasen des elektrischen Herzzyklus) gelingen darüber hinaus inzwischen dynamische Abbildungen der Herzaktion inklusive Blutflussanalyse ('Doppler').

#### 1.1 MRT vs. Echokardiographie

Die transthorakale **Echokardiographie** stellt schlicht aufgrund ihrer einfachen Anwendung und fehlenden Belastung des Patienten auch nach Einführung einer Kardio-MRT den **Untersuchungsstandard** in der nichtinvasiven Bildgebung bei strukturellen Herzerkrankungen dar.

Der direkte Konkurrent zur Kardio-MRT ist daher eher das transösophageale Echokardiogramm, wobei in näherer Zukunft wohl Verfügbarkeit und Präferenz des Patienten die Auswahl des Verfahrens beeinflussen.

### Vorteile der TEE:

- Am Patientenbett verfügbar.
- Leicht verfügbar.
- Auch am Intensivpatienten bzw. am Beatmeten leicht anwendbar.
- Billiger.

### Vorteile der Kardio-MRT:

- Weniger untersucherabhängig
- bei schwierigen Anschallverhältnissen der TEE überlegen
- Aquisition lückenloser 3D-Datensätze in jeder beliebigen Schnittrichtung
- Bessere Darstellung epi- und parakardialer Strukturen, des rechtsventrikulären Myokards und der proximalen Coronargefäße.

## 1.2 Stress-MRT vs. Stress-Echo

Interessant wird die weitere technische Entwicklung der Stress-MRT mit kardiotropen Substanzen, z.Zt. v.a. Dobutamin. Prinzipiell ist auch die MRT in der Lage, Wandbewegungsstörungen zu analysieren, bei allerdings bedeutend größerem Aufwand. Eine Überwachung des Patienten ist schwieriger, eine nicht-pharmakologische Belastung nicht möglich.

## 1.3 MRT und CT

Das CT bietet bei der Diagnostik kardialer Erkrankungen nur wenig Vorteile und **ist der MRT klar unterlegen**.

Die MRT bietet einen viel besseren Weichteilkontrast, eine freie Wahl der Schnittebenen, eine hochauflösendere Darstellung der Anatomie und eine Erfassung von Bewegungsabläufen und Flussläufen.

Das CT findet in der Notfalldiagnostik zur Zeit nur aufgrund technischer Probleme (kompatible Überwachungstechnik) und wegen eines geringen Zeitvorsprungs (Spiral-CT) noch eine Bevorzugung.

## 1.4 MRT vs. Angiographie

Die Unterschiede zwischen MRT und Angiographie sind ganz prinzipiell: Die **MRT** ist eine **räumliche Bildtechnik**, die **Angiographie eine Projektionstechnik**. Insofern wird klar, dass bei jeder Fragestellung zu strukturellen Auffälligkeiten des Herzmuskels und des Klappenapparates die MRT



**Abbildung 1: Zunahme der Bildqualität bei der Darstellung von Koronararterien** (© Dr. Eike Nagel, DHZT, Berlin)

eindeutige Vorteile gegenüber der Angiographie hat. Dies gilt auch für die Bestimmung der Kinetik des Herzmuskels und der Ejektionsfraktion.

Dagegen bleibt die **Domäne der Herzkatheterdiagnostik die invasive Druckmessung**. Auch die Analyse von Coronarstenosen ist derzeit noch mit der Angiographie besser möglich, hier ist aber eine Wandlung in nächster Zeit möglich.

Hierzu möchte ich einen Artikel des Deutschen Herzzentrums Berlin wieder geben:

#### **Magnetresonanz-Bildgebung von Koronararterien**

##### **Die nicht-invasive Abbildung von Koronarien ist einen Schritt weiter gekommen**

In der Darstellung der Koronararterien mit der kardiovaskulären Magnetresonanztomographie (CMR) sind in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden. Erste Erfolge gab es bei der nicht-invasiven Diagnostik der koronaren Herzerkrankung. Etabliert haben sich bereits Indikationen, bei denen Koronaraneurysmata dargestellt werden oder fehlverlaufende Koronararterien räumlich zugeordnet werden müssen. Erweitert wird diese Indikation auf Patienten mit Kardiomyopathie und auf das präoperative Screening aufgrund einer Multicenterstudie an 109 Patienten, die in diesem Jahr beim AHA von W. Manning (Circulation 2001; 104: II-374) vorgestellt worden ist. In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass eine Hauptstammstenose oder koronare 3-Gefäßerkrankung mit allergrößter Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, wenn die CMR-Untersuchung negativ ist. Für diese Untersuchung wurde eine standardisierte 3D Technik unter Verwendung einer Atemkorrektur genutzt. Diese Atemkorrektur (Navigatortechnik) ermöglicht es, scharfe Bilder mit einer räumlichen Auflösung von 0.7 x 0.9 x 1.5 mm und ausreichendem Signal / Rausch Verhältnis innerhalb 10-15 Min. (Akquisitions-Fenster pro Herzschlag <70 ms) zu erhalten. Die Technik soll weiter verbessert werden: Dabei müssen das Signal/Rausch-Verhältnis optimiert und Bewegungsartefakte durch Herz- und Atembewegung unterdrückt werden.

Folgende Ziele werden zur Zeit von den Herstellern der Magnetresonanztomographen, den Kontrastmittelherstellern und den Entwicklern neuer Bildsequenzen intensiv verfolgt.

- Die Entwicklung von schnelleren und stärkeren Gradienten, die Bildgebungszeit und Artefakte bei den Herzbewegungen reduzieren.
- Die Entwicklung von höheren Feldstärken für die Herz-Bildgebung, z.B. 3-Tesla-Magneten, um das Signal/Rausch-Verhältnis zu erhöhen.
- Die Entwicklung intravaskulärer Kontrastmittel, um das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern.
- Die Optimierung von Navigator-Techniken, um den Einfluss von Bewegungsartefakten auf die Bildqualität zu reduzieren.
- Die Verbesserung des Kontrasts ohne Kontrastmittel.

### **Schnellere und stärkere Gradienten**

Mit Hilfe schnellerer und stärkerer Gradienten können die Zeiten bis zur Gewinnung eines Bildes (Akquisitionszeiten) und die räumliche Auflösung verbessert werden. Problematisch ist jedoch, dass eine Verkürzung der Akquisitionszeit und Verbesserung der räumlichen Auflösung auch mit einer Verminderung des Signals verbunden ist. Schon jetzt ist das niedrige Signal-zu-Rausch-Verhältnis das Hauptproblem bei der nichtinvasiven Abbildung der Koronarien mit der CMR. Somit ist eine weitere Verbesserung über Einsatz schnellerer Gradientensysteme nur in Kombination mit einer deutlichen Signalververstärkung möglich.

### **Höhere Feldstärken**

Im Prinzip haben höhere Feldstärken (z.B. 3 Tesla) den Vorteil, ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erzeugen, was für die Darstellung der Koronarien hilfreich sein könnte. Die Herausforderung für 3T-Systeme ist jedoch die Konstruktion von adäquaten Empfänger-Spulen für die Darstellung des Herzens, da die Homogenität des zu messenden Signals von der Gewebeverteilung abhängt, die sich unter anderem durch den Herzschlag selbst verändert.

### **Intravaskuläre Kontrastmittel**

Die für die CMR zugelassenen Kontrastmittel haben derzeit noch den Nachteil, schnell aus dem Gefäßbett in das umliegende Gewebe zu diffundieren. Dadurch wird das Gefäß nur für kurze Zeit nach der Kontrastmittelgabe gegenüber dem Interstitium und dem Myokard kontrastiert. Dieser Effekt kann für Atemstopptechniken genutzt werden. Die Navigator-Techniken benötigen jedoch eine längere Messzeit (erreichen jedoch dafür eine höhere Auflösung), so dass die Anwendung dieser Kontrastmittel wenig hilfreich ist. Es befinden sich bei mehreren Herstellern intravaskuläre Kontrastmittel in der Erprobungsphase. Solche intravaskulären Kontrastmittel diffundieren nicht in umliegendes Gewebe und können sich besonders in Kombination mit den Navigator-Techniken als nützlich erweisen, da eine kontinuierliche Verbesserung des Kontrasts für die gesamte Messdauer erreicht wird. Vorbereitende Phase-I- und II-Studien mit intravaskulären Kontrastmitteln haben eine Verbesserung der Bildqualität in einzelnen Zentren gezeigt, es wurden jedoch noch keine Multicenter-Daten präsentiert.

Optimierung von Navigator-Techniken

Außer dem niedrigen Signal / Rausch-Verhältnis sind die Herz- und Atembewegungen die limitierenden Faktoren bei der hochaufgelösten Darstellung der Koronararterien. Ein Vorteil von MR-Techniken im Vergleich zu anderen nicht-invasiven Bildgebungstechniken für die Bewertung von Koronararterien ist die kurze Akquisitionsdauer pro Herzschlag. Um Unschärfen zu verringern, sollte die Akquisitionszeit unter 70 ms für die rechte und 100 ms für die linke Koronararterie liegen was für die MR-Bildgebung problemlos möglich ist. Eine Verkürzung der Zeit zur Datenerfassung innerhalb des Herzzyklus führt jedoch zu einer Verlängerung der gesamten Bildgebungszeit, da mehr Herzschläge gebraucht werden, um eine ausreichende Menge von Daten zu erreichen. Dadurch entsteht die Notwendigkeit, komplexe Techniken anzuwenden, die Artefakte von der Atembewegung unterdrücken können, da bei den meisten Patienten die Anzahl der erforderlichen Herzschläge die maximale Dauer eines Atemstopps übersteigt. Vorschläge zur Lösung dieses Problems sind zum Beispiel retrospektives Gating, sowie prospektives Gating mit und ohne Echtzeit-Korrektur. Bei diesen Verfahren wird vor der tatsächlichen Bildgewinnung ein eindimensionales Bild der Lungen-Zwerchfellgrenze erstellt (Navigator) und die Bilddaten nur dann verwendet, wenn das Zwerchfell in einer vorher definierten (endexpiratorischen) Position ist (Gating). Weitere Verbesserungen der Bildqualität können durch eine Korrektur von Verschiebungen des Zwerchfells innerhalb des Gating-Fensters erreicht werden. Dabei werden optimalerweise unterschiedliche Korrekturfaktoren für verschiedene Herzschichten genutzt. Mögliche Erweiterungen dieser Technik können durch unterschiedliche Wichtung der Frequenzlinien (k-Raum) erreicht werden, da einige Teile der Daten (zentrale k-Raum-Linien) mehr zu Bewegungs-Artefakten neigen als andere (äußere k-Raum-Linien). Mit solch einem Ansatz kann eine größere Verlagerung des Zwerchfells - z.B. 10 mm, statt der üblichen 5 mm - toleriert und damit eine kürzere Gesamtmeszeit erzielt werden.

### **Verbesserte Darstellung ohne Kontrastmittel**

Diverse Ansätze werden gerade erforscht, um den Kontrast ohne Zusatz von Kontrastmitteln zu verbessern. Eine wichtige Optimierung des Kontrast/ Rausch Verhältnisses wurde durch die Einführung der Fett-Unterdrückung und T2 Präparationspulsen erreicht, die das Signal des umgebenden Gewebes unterdrücken und so die Koronararterien-Darstellung verbessern.

Vielversprechend ist derzeit die Anwendung neuer Sequenzen, wie "steady state free precession" (= balanced FFE, FIESTA, TrueFISP je nach Hersteller) oder "spiral imaging". Mit beiden Sequenzen kann der Kontrast zwischen Blut und umgebenden Gewebe deutlich gesteigert werden, erste Validierungsstudien werden derzeit durchgeführt. Ein vollkommen anderer Ansatz ist der Gebrauch von Schwarzblut-Techniken, bei denen das starke Eigensignal des umliegenden Gewebes genutzt und das Signal des Blutes innerhalb des Gefäßes unterdrückt wird.

Die nichtinvasive Bildgebung von Koronararterien mit Magnetresonanz-Techniken hat schon heute einen in der klinischen Routine nützlichen Wert erreicht (Koronaraneurysmata, Koronaranomalien) und kann auch zum Ausschluss einer koronaren 3-Gefäßerkrankung oder Hauptstammstenose genutzt werden. Eine Anwendung in der breiten klinischen Routine kann schon bald durch eine Kombination aller oben genannten Techniken möglich werden. Im Moment ist die Stärke der Magnetresonanz-Bildgebung bei Patienten mit bekannter oder vermuteter koronarer Herzerkrankung jedoch nach wie vor die Bewertung funktioneller Parameter, wie Wandbewegung in Ruhe und Stress, die Beurteilung der Myokardperfusion oder die Infarkt Diagnostik. Diese Bereiche haben sich den jeweiligen Konkurrenztechniken (Stress-Echo, SPECT und PET) als überlegen erwiesen. (Dr. Eike Nagel, DHZT, Augustenburger Platz , 113353 Berlin)

### 1.5 MRT vs. Szintigraphie (SPECT und PET)

Die Szintigraphie des Myokards ist **der MRT in der Aussage zur Mikrozirkulation und zur Vitalitätsbeurteilung überlegen**. Eine der Ursachen ist der derzeitige noch bestehende Mangel an einem geeigneten MRT-Kontrastmittel, das von vitalen Myozyten aufgenommen wird.

## 2 MRT und spezielle kardiale Erkrankungen

### 2.1 Erkrankungen des Perikards

Die MRT kann einen Perikarderguss vom Perikard selbst ausgezeichnet unterscheiden. Außerdem gelingt die Unterscheidung zwischen serösem und fibrinösem Perikarderguss. Da zahlreiche Perikarderkrankungen darüber hinaus einen intrathorakalen aber extrakardialen Ursprung haben, bietet die MRT über die lokale Diagnostik hinaus auch die Möglichkeit einer Diagnostik des gesamten Brustraumes.

### 2.2 Tumoren des Herzens

Die Darstellung von Tumoren des Herzens gelingt sowohl im Standbild als auch im Cine Loop. Die unterschiedlichen geweblichen Eigenschaften der Herztumoren lassen meist eine Abgrenzung untereinander und gegenüber nichttumorösen Raumforderungen, wie z.B. Thromben zu.

### 2.3 Erkrankungen der Aorta

Neben der guten Ortsauflösung bietet die MRT zusätzlich die Analyse von Flussgeschwindigkeiten und Cine Loops, die beispielsweise folttierende Dissektionsmembranen zu Darstellung bringen.

Aufgrund der Einfachheit der Untersuchung und der Dringlichkeit der Fragestellung ist die Diagnostik einer fraglichen Dissektion der Aorta aber immer noch eine Domäne der TEE.

### 2.4 Angeborene komplexe Vitien

Vor geplanter Korrektur-Operation und zur nichtinvasiven Verlaufsbeobachtung nach Korrektur angeborener Vitien stellt heute bereits die Kardio-MRT den Standard der Bildgebung dar.

- Die MRT ermöglicht eine dreidimensionale anatomische Darstellung auch komplexer Vitien.

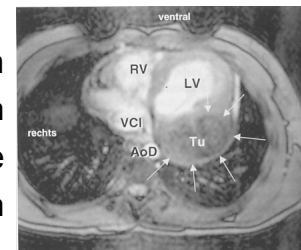


Abbildung 2: Fibrom des Perikards

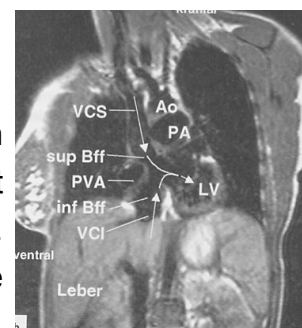


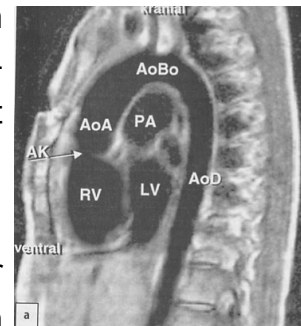
Abbildung 3: Vorhofumkehr-OP nach Mustard/Senning

- Über Gradienten-Echos können Flussgeschwindigkeiten ermittelt und darüber - in Analogie zur Dopplersonographie - Druckgradienten, Herzzeitvolumina und Shuntflüsse abgeschätzt werden.

**2.5 Ischämiediagnostik**

Im Gegensatz zur anatomischen Genauigkeit und zur hinreichenden Präzision bei der Ermittlung von Flussgeschwindigkeit und -richtung stößt die Kardio-MRT bei der Analyse der makro- und mikrozirkulatorischen kardialen Versorgung derzeit noch an Grenzen der Machbarkeit.

- Die Analyse von Stenosen der Koronararterien ist derzeit zwar bereits prinzipiell möglich, zeigt aber noch keine ausreichende Sensitivität und Spezifität, die einen Einsatz als nichtinvasive Methode der coronaren Bildgebung rechtfertigen würde.
- Die Vitalitätsdiagnostik kann durch die MRT indirekt über die Wandbewegungsanalyse beim Stress-MRT leisten, bietet hier jedoch gegenüber der Stressechokardiographie im Allgemeinen keine Vorteile. Die direkte visuelle Analyse der Mikrozirkulation und Vitalität der Myozyten stößt durch Mangel eines geeigneten kardialen Tracers für die MRT derzeit an ihre Grenzen.
- Die Phosphor-31-MR-Spektroskopie ist ein noch experimentelles Verfahren, in dem der Gehalt der Myozyten an energiereichen Phosphaten (ATP) bestimmt werden. Das Verfahren ist jedoch langdauernd und schwierig und mit ungenügender Ortsauflösung behaftet.



**Abbildung 4: d-Transposition**

**3 Zusammenfassung: Indikationen für eine Kardio-MRT**

Indiziert	Möglich	Experimentell
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkrankungen der Aorta und der Pulmonalgefäße</li> <li>• Kongenitale Vitien</li> <li>• Kardiale oder parakardiale Tumoren</li> <li>• (intrakardiale Thromben)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klappenvitien</li> <li>• Ischämiediagnostik</li> <li>• Post-Infarkt-Komplikationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koronaranatomie</li> <li>• Bildgebung der Mikrozirkulation</li> <li>• Visuelle Darstellung der myokardialen Stoffwechsels (ATP)</li> </ul>