

Kardiologie

<https://doi.org/10.1007/s12181-019-0301-x>

© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie - Herz- und Kreislaufforschung e.V. Published by Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature - all rights reserved 2019



CrossMark

F. von Knobelsdorff-Brenkenhoff¹ · W. R. Bauer² · T. Deneke³ · E. Fleck⁴ · A. Rolf⁵ · J. Schulz-Menger^{6,7} · P. Sommer⁸ · C. Tillmanns⁹ · I. Eitel¹⁰

¹ Klinik für Innere Medizin – Kardiologie, Krankenhaus Agatharied, Akademisches Lehrkrankenhaus der Ludwig-Maximilians-Universität München, Agatharied, Deutschland

² Medizinische Klinik und Poliklinik I, Universitätsklinikum Würzburg, Würzburg, Deutschland

³ Klinik für interventionelle Elektrophysiologie, Herz- und Gefäß-Klinik GmbH Bad Neustadt, Bad Neustadt, Deutschland

⁴ Deutsche Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung e. V., Düsseldorf, Deutschland

⁵ Abteilung Kardiologie, Kerckhoff-Klinik, Herz-, Lungen-, Gefäß- und Rheumazentrum, Bad Nauheim, Deutschland

⁶ Experimental and Clinical Research Center, Gemeinsame Einrichtung von Charité Universitätsmedizin Berlin und Max-Delbrück-Zentrum, Berlin, Deutschland

⁷ Klinik und Poliklinik für Kardiologie und Nephrologie, HELIOS-Klinikum Berlin-Buch, Berlin, Deutschland

⁸ Klinik für Elektrophysiologie/Rhythmologie, Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen, Bad Oeynhausen, Deutschland

⁹ Diagnostikum Berlin, Berlin, Deutschland

¹⁰ Medizinische Klinik II – Universitäres Herzzentrum Lübeck, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Lübeck, Deutschland

Empfehlungen zu kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren

Präambel

In Ergänzung zum Konsensuspapier der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) und der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG) über Magnetresonanztomographie(MRT)-Untersuchungen bei Patienten mit einem Herzschrittmacher (HSM) oder einem implantierbaren Kardioverter-Defibrillator (ICD) [1] soll hier speziell für herzspezifische Fragestellungen der Einfluss von Störsignalen/Artefakten auf

die Bildinterpretation dargelegt werden. Außerdem sollen Hinweise gegeben werden, wie diese ggf. umgangen und dadurch die diagnostische Sicherheit gesteigert werden kann. Die vorliegende Stellungnahme der DGK möchte dazu beitragen, Ärzten die Entscheidungsfindung zu erleichtern, um Patienten mit rhythmusrelevanten Implantaten nicht unnötig von der zielführenden kardialen MRT-Diagnostik auszuschließen.

Einleitung

Konkreter Anlass für das ergänzende Papier sind einschlägige Studien sowie neue technische Entwicklungen, sodass MRT-Untersuchungen bei Patienten mit einem HSM oder einem ICD unter dezidierten Sicherheitsvorkehrungen mit einem vertretbaren Risiko möglich sind. Konventionelle (d. h. nicht bedingt MRT-sichere)

HSM- und ICD-Systeme werden daher nicht mehr als absolute, sondern als relative Kontraindikation für eine MRT-Untersuchung angesehen.

Ein Unterkapitel des DGK-DRG-Konsensuspapiers aus 2017 behandelt bereits kurz spezielle Aspekte von *kardialen* MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM und ICD. Die Evidenz über den klinischen Nutzen einer kardialen MRT-Bildgebung hat in den letzten Jahren zugenommen, sodass die kardiale MRT-Bildgebung inzwischen einen festen Bestandteil in der Diagnostik kardialer Pathologien einnimmt. Entsprechend hat sie Einzug in die Mehrzahl der für die Kardiologie relevanten Leitlinien genommen [2]. Allerdings sind kardiale MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM oder ICD besonders komplex: Sie fallen in eine höhere Risikokategorie – unter anderem, da das Implantat

E. Fleck für die Kommission Klinische Kardiovaskuläre Medizin der DGK.

Die Autoren T. Deneke und P. Sommer sind Mitglieder der Arbeitsgruppe 1 (Rhythmologie), die Autoren F. von Knobelsdorff-Brenkenhoff, W.R. Bauer, A. Rolf, J. Schulz-Menger, P. Sommer, C. Tillmanns, I. Eitel der Arbeitsgruppe 21 (Magnetresonanztomographie in der Kardiologie) der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie.

direkt im Hochfrequenzfeld liegt und das Myokard potenziell vulnerabel und damit anfällig gegenüber elektrophysiologischen Störeinflüssen ist. Überdies kann die Bildqualität der Standard-MRT-Sequenzen durch gerätebedingte Artefakte negativ beeinflusst werden.

Die vorliegenden Empfehlungen stellen die Besonderheiten bei der Planung und Durchführung von kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM und ICD heraus und ergänzen das Konsensuspapier aus 2017 durch die praktische Vorgehensweise besonders bei kardio-spezifischen Untersuchungen.

Sicherheit

Zwischen implantiertem Aggregat einschließlich der Elektroden und den elektromagnetischen Feldern eines MRT (statisches Magnetfeld, Gradientenfelder, Hochfrequenzfelder) entstehen Wechselwirkungen, die die Funktionsweise des Gerätes ungünstig beeinflussen und das anliegende Gewebe schädigen können. Die Untersuchungsregion „Herz/Thorax“ – und damit jede kardiale MRT-Untersuchung – birgt allgemein ein erhöhtes Risiko, da das Implantat im Wirkungsbereich der Hochfrequenzspule liegt und mit vermehrter Einkopplung von Hochfrequenzenergie und potenziell erhöhten Erwärmungseffekten an der Elektrodenspitze zu rechnen ist. Darüber hinaus kommen bei der kardialen MRT-Untersuchung häufig energiereiche Pulssequenzen zum Einsatz (z. B. CINE-Bildgebung), sodass Wechselwirkungen verstärkt sein können.

Als weiterer risikohöher Faktor ist das Vorhandensein von „vulnerabilem Myokard (akuter/subakuter Myokardinfarkt, floride Myokarditis) oder eines arrhythmogenen Substrats bzw. einer strukturellen Herzerkrankung“ zu beachten, da hier das Risiko für die Induktion von Kammerflimmern/ventrikulären Tachykardien infolge von Spannungsinduktion in den Elektroden durch Gradientenfelder oder gleichgerichtete Hochfrequenzfelder erhöht ist. Patienten mit einem HSM oder ICD, die einer kardialen MRT-Untersuchung zugeführt werden, weisen häufig vulne-

rables Myokard bzw. ein arrhythmogenes Substrat auf.

Unter diesen Bedingungen können Wechselwirkungen zwischen Implantat, Magnetfeldern und Gewebe bei kardialen MRT-Untersuchungen verstärkt sein. Daher fallen kardiale MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM oder ICD sowohl hinsichtlich des „elektrophysiologischen“ Risikos als auch der Untersuchungsregion in eine erhöhte Risikokonstellation. Dies gilt im Allgemeinen sowohl für konventionelle als auch für bedingt MRT-sichere HSM- und ICD-Systeme, wenn auch bei Letzteren einige technische Anpassungen das Risiko reduzieren können.

Zu betonen ist in diesem Zusammenhang, dass nicht alle bedingt MRT-sicheren HSM- und ICD-Systeme eine Zulassung für sämtliche Untersuchungsregionen einschließlich Thorax/Herz sowie für alle Feldstärken haben [3]. Außerdem gilt die Zulassung in der Regel nur für definierte Kombinationen aus Aggregat und Sonden. Da die Zulassung einzelner Produkte einem raschen Wandel unterliegt, wird in dieser Empfehlung auf produktspezifische Information verzichtet. Es wird empfohlen, im Vorfeld einer kardialen MRT-Untersuchung bei einem Patienten mit bedingt MRT-sicherem HSM oder ICD die Zulassungsbedingungen zu prüfen und den Patienten ggf. gezielt über diesen Punkt aufzuklären. Produktspezifische Informationen sind auf den Internetseiten der Gerätehersteller sowie auf herstellerübergreifenden Plattformen (z. B. www.mrisafety.com) erhältlich. Bei konventionellen (d. h. nicht bedingt MRT-sicheren) HSM- und ICD-Systemen ist eine MRT-Untersuchung immer „off-label“. Dieser Aspekt und mögliche haftungsrechtliche Konsequenzen müssen dem Patienten in einem Aufklärungsgespräch erläutert werden, und eine entsprechende Dokumentation muss erfolgen.

Einige physikalische und elektrophysiologische Sicherheitsaspekte seien hier in Ergänzung zu dem Konsensuspapier von DGK und DRG hervorgehoben:

Das *statische Magnetfeld* übt eine Zug- bzw. Drehkraft auf die ferromagnetischen Komponenten des metallischen Implantats aus, was bei frisch implantierten Elek-

troden (<6 Wochen) zu einer Dislokation führen kann. Überdies kann das statische Magnetfeld je nach Kraftwirkung zum permanenten An- oder Abschalten des sog. Reedschalter führen, sodass im HSM die Wahrnehmung („Sensing“) deaktiviert und der HSM in einen asynchronen Stimulationsmodus übergeht. Im ICD kann ein geschlossener Reedschalter zu einer Deaktivierung führen. In neueren Systemen besteht diese Problematik nicht mehr, da alternative Materialien für den Reedschalter eingesetzt werden. Weiterhin kann das statische Magnetfeld die Funktionsteile nicht-MRT-kompatibler Aggregate bis zum Totalausfall schädigen, die Lebensdauer der Batterie reduzieren und die Programmierung verändern. Durch einen solchen Reset können bei nicht-MRT-kompatiblen Aggregaten Schutzprogrammierungen zurückgesetzt werden.

Die *zeitabhängigen Gradientenfelder* können von einem ICD fälschlicherweise als ventrikuläre Tachykardie wahrgenommen werden. Dies kann zu einer inadäquaten Therapieabgabe oder bei konventionellen ICD zum Kurzschluss mit Geräteerhitzung und thermischer Schädigung führen, wenn beim Hochladen durch die im äußeren Magnetfeld induzierte magnetische Sättigung der ICD-Spule der induktive Widerstand aufgehoben wird. Weiterhin können die zeitabhängigen Gradientenfelder Spannungspulse im Voltbereich in der Elektrode induzieren, die den Herzmuskel asynchron stimulieren oder im Gerät als vermeintliche Eigenaktionen des Herzens wahrgenommen werden und so eine möglicherweise notwendige Stimulation inhibieren.

Die *Hochfrequenzfelder* verursachen die komplexesten und für die Sicherheit bedeutsamsten Wechselwirkungen. Als elektromagnetische Wellen besitzen sie eine elektrische Feldkomponente, die auf die Elektrode des Implantats einwirken kann. Die Wellenlängen liegen im menschlichen Körper bei ca. 50 cm (1,5 T) bzw. 25 cm (3 T), sodass Resonanz auftreten kann, da die Elektrodenlängen in der gleichen Größenordnung liegen (40–60 cm). Die Elektrode wirkt dann wie eine abgestimmte Antenne, die das Hochfrequenzfeldsignal auffängt, lo-

Empfehlungen zu kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren

Zusammenfassung

In dieser Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) werden die besonderen Aspekte von kardialen Magnetresonanztomographie (MRT)-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern (HSM) und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren (ICD) dargestellt. Es ist eine Ergänzung/Aktualisierung zu dem Konsensuspapier der DGK und der Deutschen Röntgengesellschaft aus dem Jahr 2017 über MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM und ICD. Fokussiert auf kardiale MRT-Untersuchungen, werden physikalische und elektrophysiologische Erklärungen, hilfreich für Verständnis und Handhabung versierter Anwender, sowie Handlungsempfehlungen bezüglich Fragestellung und Patientenauswahl, Geräteprogrammierung, Monitoring und Modifikation der MRT-Sequenzen gegeben. Ziel ist es, Patienten mit aktiven kardialen Implantaten den Zugang zu einer kardialen MRT-Untersuchung unter strenger Indikationsprüfung zu ermöglichen, ohne relevante Einschränkungen in Patien-

tensicherheit und Bildqualität einzugehen. Kernaussagen dieser Empfehlungen sind: 1. In Analogie zu sonstigen MRT-Untersuchungen sind konventionelle (d. h. nicht bedingt MRT-sichere) HSM- und ICD-Systeme auch für kardiale MRT-Untersuchungen nicht mehr als eine absolute, sondern als eine relative Kontraindikation anzusehen. 2. Kardiale MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM oder ICD sind jedoch mit einem besonderen Risiko verbunden, da sich einerseits das Gerät in der Bildgebungsregion befindet und dadurch Wechselwirkungen zwischen Gerät, MRT und Gewebe verstärkt sein können, und andererseits das Myokard der untersuchten Patienten potenziell vulnerabel und daher möglicherweise anfällig für Störeinflüsse ist. 3. Neben Sicherheitsaspekten kann die Bildqualität durch einen HSM oder ICD beeinträchtigt werden, sodass angepasste MRT-Pulssequenzen erforderlich sein können. 4. Entscheidend bei Indikationsstellung und Untersuchungsdurchführung sind die Abschätzung des individuellen Nutzen-Risiko-

Verhältnisses, eine umfassende Aufklärung über spezifische Risiken, dezidierte HSM-/ICD-bezogene und MRT-bezogene Sicherheitsmaßnahmen zur Reduzierung dieser Risiken sowie adäquate Monitoringtechniken während der MRT-Untersuchung. Diese Komplexität erfordert die Anwesenheit von in kardialer MRT und ICD/HSM-Therapie erfahrenem ärztlichen Personal. 5. Wenn auch einige HSM und ICD als bedingt MRT-sicher („MR conditional“) einschließlich kardialer MRT-Untersuchungen zugelassen sind, gelten dennoch weitgehend ähnliche Vorsichts- und Monitoringmaßnahmen wie bei Trägern konventioneller HSM- und ICD-Systeme. Für die Patientensicherheit sind die genaue Kenntnis und Beachtung der spezifischen Nutzungsbedingungen des jeweiligen HSM oder ICD entscheidend.

Schlüsselwörter

Magnetresonanztomographie · Herzschrittmacher · Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator (ICD) · Artefakte · Sicherheit

Recommendations for cardiac magnetic resonance imaging in patients with cardiac pacemakers and implantable cardioverter defibrillators

Abstract

These recommendations by the German Society for Cardiology (DGK) summarize specific characteristics of cardiac magnetic resonance imaging (MRI) in subjects with a cardiac pacemaker (PM) or implantable cardioverter defibrillator (ICD). They represent a supplement/update of the comprehensive consensus paper of the DGK and the German Roentgen Society on MRI examinations in general in patients with PM and ICD published in 2017. With a focus on cardiac MRI, physical and electrophysiological explanations are given, which are helpful for the understanding and handling by experienced users. Detailed recommendations regarding indications, patient selection, device programming, patient monitoring and MRI sequence modification are provided. The aim of this article is to grant subjects with active cardiac implants access to cardiac MRI examinations after careful consideration of the clinical need

and potential limitations regarding patient safety and image quality. The essentials of this recommendation paper are: 1) as is common sense for MRI examinations in general, conventional (i. e. not MRI conditional) PM and ICD are no longer regarded as absolute contraindications for performing cardiac MRI but as relative contraindications. 2) Cardiac MRI in patients with PM or ICD is, however, associated with a particular risk, as the device is within the imaging field and interactions between the device, MRI and tissue may be aggravated. In addition, the myocardium of the patient under investigation may be vulnerable and therefore possibly prone to any confounding effects. 3) Apart from safety concerns, image quality can be unfavorably influenced by PM or ICD systems, so that adjusted MRI pulse sequences can be necessary. 4) The individual risk-benefit analysis, a comprehensive informed consent

about specific risks, targeted device and MRI-related safety measures, as well as adequate monitoring techniques during the MRI examination are highly important to reduce such risks when planning a cardiac MRI in a patient with a PM or ICD. This complexity makes the presence of experienced physicians trained in cardiac MRI and PM/ICD treatment mandatory. 5) Even if some PM and ICD are approved as being safe for cardiac MRI (MRI conditional), precautionary and monitoring measures are widely the same as for conventional PM and ICD systems. For patient safety, exact knowledge and consideration of the specific terms and conditions of use of the respective device are obligatory.

Keywords

Magnetic resonance imaging · Pacemaker · Implantable cardioverter defibrillator (ICD) · Artifacts · Safety

kal verstärkt und dessen Energie an die Elektroden Spitze weitergeben kann, wodurch das Herzmuskelgewebe potenziell thermisch geschädigt wird. Wie stark diese Resonanz ist, hängt von Lage und Verlauf der Elektrode, der Position des Patienten im MRT sowie der Bauform der im System verwendeten Hochfrequenzfeldsendespule ab. Diese Erwärmung der Elektroden Spitze kann unter Umständen zu einem Reizschwellenanstieg führen. Insbesondere gekappte Elektroden, denen der Energieabfluss über das Aggregat fehlt, können so zu thermischen Schädigungen des Myokards in der Implantationsregion führen. Daher sind stillgelegte Sonden als deutlich risikoe erhöhend anzusehen und erfordern umso mehr ein sorgfältiges Abwägen der individuellen Risiko-Nutzen-Relation. Schließlich kann das Hochfrequenzfeld zur Inhibition des Schrittmachers/ICD und damit zu fehlerhaften Brady- bzw. Tachykardie-therapien, zur Fehlprogrammierung und zur permanenten Schädigung des Aggregats führen.

Bildartefakte und Lösungsansätze

Wenn auch einige Sicherheitsaspekte durch den Einsatz von bedingt MRT-tauglichen HSM und ICD optimiert wurden, ist die Problematik der Artefakte/Bildqualität bei der kardialen MRT-Untersuchung weiterhin vorhanden, da sich das Gerät im oder nahe dem abgebildeten Bereich befindet.

Der Hauptgrund für die Bildstörung ist die Verzerrung des äußeren Magnetfelds. Dessen Homogenität ist die wesentliche Voraussetzung für eine korrekte Anregung der Spins durch das Hochfrequenzfeld und damit die Möglichkeit, das MRT-Signal für morphologische und funktionelle Messungen räumlich zuzuordnen. Da Aggregate und Elektroden immer „magnetische Eigenschaften“ (Ferro-, Para- und Diamagnetismus) in diesem äußeren Feld haben, wird das dadurch erzeugte Störfeld dem äußeren überlagert und die Homogenität aufgehoben. Während die Störung durch die Elektroden eher gering ist, sind die Auswirkungen durch das Aggregat erheblich. Je weiter das

Aggregat von der Untersuchungsregion entfernt ist, desto weniger anfällig ist die Bildgebung. Deshalb stören rechts implantierte Aggregate deutlich weniger als links implantierte [4].

Bei der kardialen MRT-Untersuchung ist eine Besonderheit, dass v. a. bewegte Strukturen, also das Myokard und das fließende Blut, dargestellt werden. Bewegung in einem inhomogenen Magnetfeld um das Aggregat bedeuten immer eine ungleichmäßige Modulation der Spinphase und über die Zeit eine entsprechende Phasenakkumulation, was zu intensiven Artefakten führen kann. Viele Techniken zur Artefaktunterdrückung zielen darauf, diese Phasenakkumulation zu minimieren. So wird bei den „gespoilten“ Gradientenechosequenzen nach der Repetitionszeit die Phase „zerstört“, was zu deutlich weniger Artefakten führt als bei den heute meist verwendeten refokussierenden Gradientenechotechniken („steady-state free-precession“ [SSFP]) [5, 6]. Auf dem gleichen Prinzip beruht auch die Artefaktreduktion nach Gabe konventioneller MRT-Kontrastmittel, da auch hier über Beschleunigung der transversalen Relaxation die Phasenkohärenz schnell verloren geht.

Für kardiale MRT-Untersuchungen wird in der Regel eine Kombination aus verschiedenen MRT-Pulssequenzen eingesetzt, um die kardiale Morphologie und Funktion umfassend zu beurteilen. Zu den häufigsten Techniken zählen dabei die CINE-Bildgebung mittels SSFP-Sequenz, die Fibrosedarstellung mittels gradientenechobasierter Late-Gadolinium-Enhancement-Bildgebung, weitere Gewebeanalyse mittels T1- und T2-gewichteter Spinechosequenz sowie T1- und T2-Mapping auf Basis von SSFP-Sequenzen, die Perfusionsanalyse sowie Blutflussmessungen mittels Phasenkontrasttechnik. Das Vorhandensein von HSM- oder ICD-Systemen macht eine Anpassung der MRT-Pulssequenzen bzw. die Wahl einer alternativen MRT-Pulssequenz erforderlich. Im Folgenden werden Lösungsansätze für die häufigsten kardialen MRT-Pulssequenzen vorgestellt. Die **Abb. 1** zeigt einige Beispielbilder.

CINE-Bildgebung

Wegen hohem Signal-zu-Rausch-Verhältnis und exzellentem Blut-Myokard-Kontrast werden zur CINE-Bildgebung überwiegend balancierte, refokussierte Gradientenechosequenzen (SSFP) eingesetzt. Das Refokussieren der am Ende der MRT-Pulssequenz verbleibenden Transversalmagnetisierung trägt wesentlich zu diesem gewünschten Kontrastverhalten bei, ist jedoch gleichzeitig durch Phasenakkumulation die Ursache von Artefakten bei einem inhomogenen Magnetfeld. Diese sind umso ausgeprägter, je länger die Echozeit (TE) und Repetitionszeit (TR) sind. Daher sollten TE und TR möglichst kurz gewählt werden. Einige MRT-Scanner bieten die Möglichkeit, den „minTE/minTR“-Modus auszuwählen. Überdies hat es sich als günstig erwiesen, die transversale Relaxierung durch die Gabe von Kontrastmittel zu beschleunigen, weil hierdurch akkumulierte Phase verloren geht. Insofern ist es im Falle von Artefakten ratsam, die CINE-Bildgebung nach Kontrastmittelgabe durchzuführen.

Insbesondere bei MRT-Scannern mit einer Feldstärke von 3 T können Off-Resonanz-Artefakte auftreten. „Frequenz-Scouts“ können helfen, den günstigsten Frequenz-Offset zu ermitteln. Dieses Prinzip kann auch bei Patienten mit HSM oder ICD hilfreich sein, um Off-Resonanz-Artefakte zu reduzieren bzw. aus dem entscheidenden Bildbereich zu verschieben.

Bei rechtsseitig implantierten HSM sind diese Strategien oft ausreichend, um eine adäquate Bildqualität zu erzielen. Bei linksseitig implantierten HSM sowie bei ICD sind SSFP-Bilder häufig Artefakt-überlagert, sodass ein Wechsel auf sog. „gespoilte“ Gradientenechosequenzen (SGRE) empfohlen wird [7]. Die Anzahl der auswertbaren Segmente in CINE-Studien steigt durch den Wechsel von SSFP- auf SGRE-Sequenzen von 14 auf 68 % und durch die zusätzliche Gabe von Gadolinium weiter auf 76 %. Ebenso konnten durch Einsatz von SGRE plus Gadolinium die Intra- und Interuntersuchervariabilität verbessert werden [8].

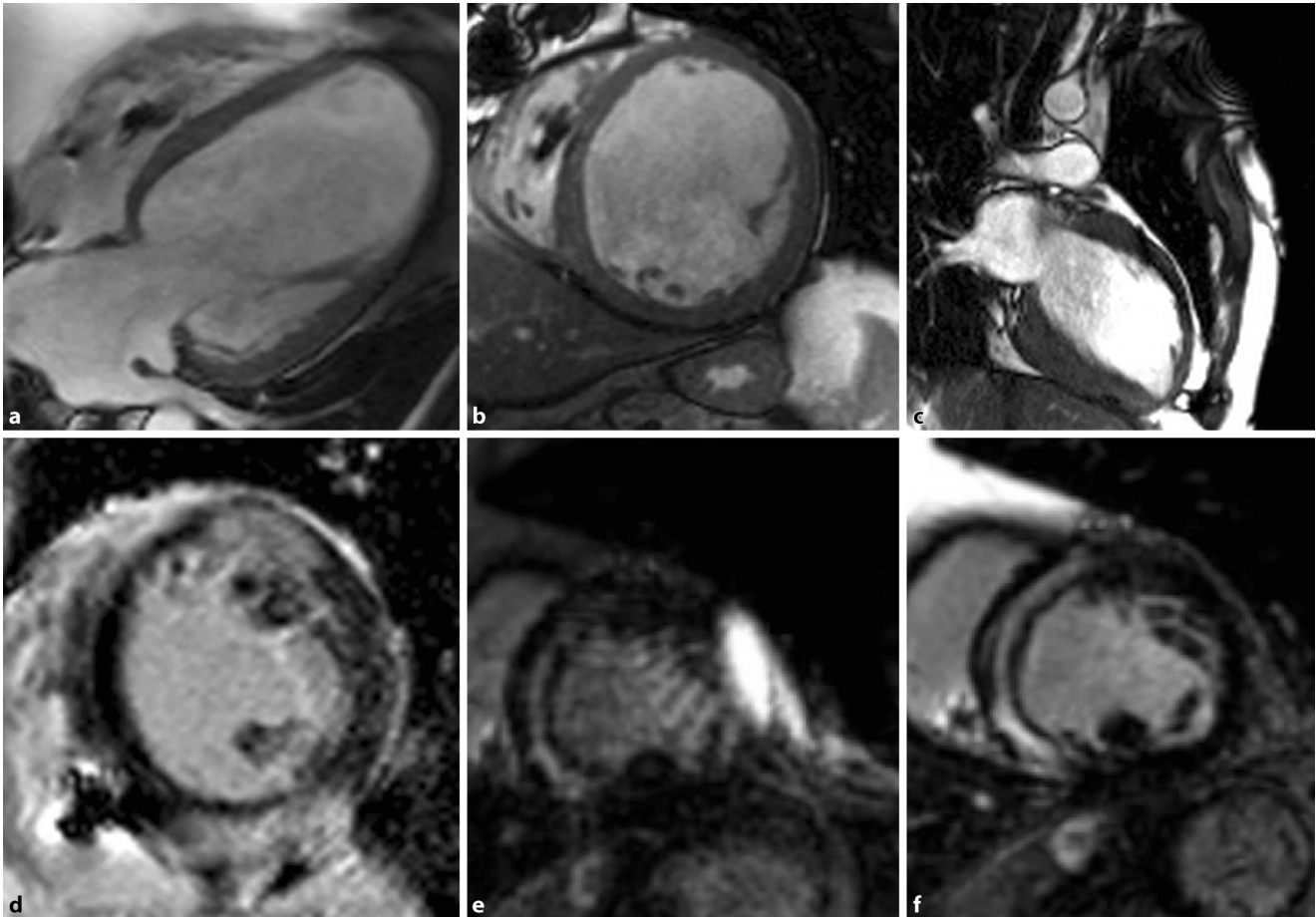


Abb. 1 ▲ Beispiele von kardialen MRT-Bildern bei Patienten mit HSM oder ICD. **a, b** SSFP-Cine bei einem Patienten mit einem linksseitig implantierten Zweikammer-HSM. Im Vierkammerblick (**a**) und in der kurzen Achse (**b**) ist der Artefakt durch die rechtsventrikuläre Sonde erkennbar. Eine signifikante Beeinträchtigung der Beurteilbarkeit der Bilder entsteht nicht. **c** SSFP-Cine bei einem Patienten mit einem linksseitig implantierten Zweikammer-HSM. Man erkennt in diesem Zweikammerblick die Artefaktentstehung im Bereich des Aggregates mit Ausdehnung auf die Vorderwand des linken Ventrikels. **d** Late-Gadolinium-Enhancement (LGE)-Bild in konventioneller Technik bei einem Patienten mit einem linksseitig implantierten Zweikammer-HSM. In diesem Kurzachsenschnitt ist die Sonde im rechten Ventrikel erkennbar. Die Signalanhebung im linksventrikulären Myokard bei diesem Patienten mit kardialer Sarkoidose ist erkennbar. **e** Zeigt ein konventionelles LGE-Bild bei einem Patienten mit linksseitig implantiertem CRT-D-System mit starkem Signalanstieg in der linksventrikulären Lateralwand sowie geringer Signalanhebung im interventrikulären Septum. **f** Nach Einsatz einer Breitband-LGE-Sequenz demarkiert sich das septale LGE klar, während die Lateralwand kein LGE mehr aufweist. (**e, f** Mit Genehmigung adaptiert nach Hilbert et al. [4]). MRT Magnetresonanztomographie, HSM Herzschrittmacher, ICD Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator, SSFP „steady state free precession“, LGE „Late Gadolinium Enhancement“, CRT-D, „Cardiac-Resynchronization-Therapy“-Defibrillator

Late-Gadolinium-Enhancement (LGE)

Der exzellente Kontrast zwischen gesundem und erkranktem Myokard basiert bei der LGE-Bildgebung v. a. auf einem 180° Inversionspuls. Dieser Anteil der Pulssequenz ist jedoch besonders anfällig für Off-Resonanz-Artefakte, sodass unterschiedliche Nulldurchgänge der Longitudinalmagnetisierung entstehen können. Gesundes Myokard kann so fälschlicherweise signalreich zur Darstellung kommen und erkranktes Myokard vor-

täuschen. Bei linksseitig implantierten Aggregaten sind daher nur etwa 68 % der Segmente auswertbar, wobei vorwiegend die anterioren und anteroseptalen Myokardsegmente betroffen sind [4, 9]. Bei rechtsseitig implantierten Aggregaten ist dieser Aspekt eher nachrangig.

Eine technische Lösung ist es, die Transmit-Bandbreite des Radiofrequenzpulses zu erhöhen, um das Frequenzspektrum der bei Standardpulsen nicht-resonanten Spins einzuschließen und einen Frequenz-Offset zu berücksichtigen [10]. Vereinfacht ausgedrückt wir-

ken Breitbandpulse auf alle Spins, die sich in einem inhomogenen Feld um das Aggregat befinden, gleichermaßen. Mit einer sog. Breitband-LGE-Sequenz waren in einer Studie 96 % aller Myokardsegmente auswertbar, während dies nur bei 74 % mit der Standardsequenz gelang [4]. Derzeit erlauben jedoch viele Produktsequenzen keine so tiefgreifende Veränderung der Sequenzparameter, sodass diese Anpassung im klinischen Alltag in der Mehrzahl der Zentren noch nicht möglich ist. Entsprechende Produktsequenzen sind jedoch in Planung.

Eine weitere Möglichkeit, den Effekt der Feldverzerrung bei LGE-Aufnahmen zu verringern, beruht auf dem Konzept der Verschiebung des Frequenz-Offset der Pulse (siehe auch CINE-Bildgebung): Idealerweise hätte ein homogenes Feld eine singuläre Feldverteilung. Das Aggregat verbreitert und verschiebt diese Verteilungsfunktion. Aus technischen Gründen und um auch nicht die räumliche Auflösung zu verschlechtern, kann man Breitbandpulse jedoch nicht immer so breit gestalten, dass Verbreiterung und Verschiebung der Verteilungsfunktion abgedeckt wären. Bei einigen MRT-Scannern kann dies aber durch Verschiebung des Frequenz-„Offset“ der Pulse erzielt werden. Idealerweise würde man so durch adäquate Verschiebung des Frequenz-„Offset“ und die dann noch verbleibende notwendige Verbreiterung des Hochfrequenzpulses eine optimale Lösung bezüglich gleichmäßiger Anregung und Beibehaltung der Bildqualität erzielen.

Perfusionsbildgebung

Für die Perfusionsbildgebung werden überwiegend SGRE-basierte Pulssequenzen, aber zunehmend auch SSFP-basierte Techniken eingesetzt [11]. Wie bereits für die CINE-Bildgebung beschrieben, können SSFP-basierte Ansätze unter ungünstigen Artefaktüberlagerungen leiden, sodass ein Wechsel auf SGRE vorteilhaft sein kann. Unter Beachtung dieser Einschränkungen sind Perfusionsanalysen auch bei Patienten mit HSM oder ICD weitgehend artefaktfrei möglich [8, 9, 12, 13].

Blutflussmessung mittels Phasenkontrasttechnik

Studien zeigten, dass die Phasenkontrastmessung auch bei HSM-Trägern artefaktfreie Bilder liefert [13]. Die Flussquantifizierung beruht jedoch auf der Phasenänderung der sich entlang eines Gradienten bewegend Spins des Blutes. Diese Spins sind nun zusätzlich den HSM- bzw. ICD-bedingten Störungen des Hauptmagnetfeldes (B₀-Inhomogenität) ausgesetzt. Dadurch kann die tatsächliche Geschwindigkeit der Spins

selbst bei visuell artefaktfreien Bildern über- oder unterschätzt werden. An einem Flussphantom mit Aortenklappenprothesen konnte gezeigt werden, dass es durch B₀-Inhomogenität zu einer systematischen Unter- oder Überschätzung der tatsächlichen Flussgeschwindigkeit kommt [14]. Der notwendige Abstand der Flussmessung zur Prothese, um diese systematischen Fehler zu vermeiden, betrug hier ca. 20 mm. Dieser Abstand dürfte bei dem wesentlich größeren Metallvolumen linksseitiger ICD deutlich größer sein. Die absoluten Flusswerte sind also selbst bei artefaktfreien Bildern mit Vorsicht zu bewerten. Systematische Analysen zum Einfluss von HSM und ICD auf die Ergebnisse von Flussmessungen sind jedoch noch ausstehend.

T1-Mapping

Die Messung der T₁-Relaxation wird auf Basis von Inversion- oder Saturation-Recovery-Sequenzen durchgeführt. Die Probleme der Off-Resonanz der Spins in Aggregatnähe gelten hier wie vorher für die LGE-Bildgebung beschrieben. Da beim Mapping absolute Relaxationszeiten gemessen werden, können kleine Abweichungen von der Centerfrequenz größere Bedeutung haben. Die MOLLI (Modified Look-Locker Inversion Recovery) basierten Mapping-Sequenzen haben einen SSFP-Readout. Hier gelten die bereits zuvor im Rahmen der CINE-Bildgebung genannten Limitationen. Alternativ gibt es Mapping-Sequenzen mit SGRE-Readout, die – wie bei der CINE-Bildgebung – eine sinnvolle Alternative darstellen. Diese sind jedoch häufig keine Produkt-Sequenzen und daher nicht in der Breite verfügbar [15, 16].

Patientenmonitoring und Geräteprogrammierung

Das Positionspapier von DGK und DRG [1] nennt verschiedene Parameter, die das Gesamtrisiko eines Patienten mit HSM oder ICD für eine MRT-Untersuchung erhöhen. Wie eingangs unter „Sicherheit“ dargestellt, fallen kardiale MRT-Untersuchung bei Patienten mit HSM oder ICD in eine höhere Risikokategorie. Für die Praxis bedeutet

das, dass das Patientenmonitoring besonders intensiv sein muss. Es sollte stets ärztliches Personal mit Kenntnis in HSM- und ICD-Therapie und Notfallmedizinischen Maßnahmen vor Ort präsent sein, um beim Auftreten bradykarder und tachykarder Herzrhythmusstörungen eine sofortige Therapie einzuleiten. Außerdem muss während der gesamten kardialen MRT-Untersuchung eine Patientenüberwachung mittels MRT-kompatibler Pulsoxymetrie mit kontinuierlicher Anzeige von peripherer Pulskurve und Sauerstoffsättigung, mittels MRT-kompatiblem EKG-Gerät sowie mittels nichtinvasiver Blutdruckmessung gewährleistet sein. Es wird betont, dass die Kombination mehrerer Monitoringverfahren wichtig ist, da während bestimmter MRT-Pulssequenzen Artefaktüberlagerungen die EKG-Interpretation erschweren können, sodass die zeitgleiche Ableitung der Sauerstoffsättigungskurve für die Erkennung von Herzrhythmusstörungen notwendig ist. Zudem muss bei Patienten mit HSM oder ICD die Möglichkeit einer zügigen Defibrillation oder externen Stimulation im Kontrollraum des Scanners gegeben sein. Die sofortige Verfügbarkeit eines Defibrillators sowie eines geeigneten Programmiergeräts vor Ort ist obligat. Ebenfalls sind die intensive Schulung des Personals und das regelmäßige Training dieser Notfallsituation mit Evakuierung des Patienten aus dem MRT-Gerät sinnvoll und empfohlen. Patienten mit HSM oder ICD sollen vor der kardialen MRT-Untersuchung explizit darauf hingewiesen werden, dass sie auf eine mögliche Erwärmung des Aggregats achten und sich im Falle von subjektiven Missempfindungen während der Untersuchung melden sollen.

Die Interaktion der zeitabhängigen Felder mit einem HSM/ICD kann potenziell das Gerät inhibieren (HSM) oder eine vermeintliche Tachykardie detektieren lassen (ICD). Entsprechend müssen die Geräte umprogrammiert werden. Die Anpassung der Programmierung sowie die Zeit zwischen Umprogrammierung und Rückprogrammierung in den Ausgangsstatus sind für den Patienten von großer Bedeutung. Im Allgemeinen sollte die Zeitdauer zwischen Um- und

Tab. 1 Empfehlungen zur HSM- und ICD-Programmierung bei kardialen MRT-Untersuchungen. Es ist zu betonen, dass Patienten-individuelle Faktoren ein Abweichen vom vorgeschlagenen Vorgehen begründen können und ggf. sachkundiges ärztliches Fachpersonal in die Entscheidungsfindung über Ort und Zeit der Um- und Rückprogrammierung eingebunden werden soll

Gerätekategorie	Patientenstatus	Geräteeinstellungen für die MRT-Untersuchung	Umprogrammierung prä MRT	Rückprogrammierung post MRT
HSM, konventionell	Absolut HSM-abhängig	D00, V00 70/min	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT	Unmittelbar post MRT
	Nicht HSM-abhängig, instabiler Eigenrhythmus, stattgehabte Synkopen	D00, V00 70/min	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT	Unmittelbar post MRT
	Nicht HSM-abhängig, stabiler Eigenrhythmus	Option A: 0D0, 000	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
		Option B: VVI, DDI	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch innerhalb 48 h vor der MRT	Unmittelbar post MRT
HSM, bedingt MRT-sicher	Absolut HSM-abhängig	D00, V00 70/min	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT
	Nicht HSM-abhängig, instabiler Eigenrhythmus, stattgehabte Synkopen	D00, V00 70/min	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch am selben Tag wie MRT
	Nicht HSM-abhängig, stabiler Eigenrhythmus	Option A: 0D0, 000 ^a	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
		Option B: VVI ^b	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch innerhalb 48 h vor der MRT	Orts- und zeitversetzt möglich, jedoch innerhalb 48 h nach der MRT
ICD, konventionell ICD, bedingt MRT-sicher	<i>Risiko sehr hoch</i> (Konventioneller ICD plus absolute HSM-Abhängigkeit)	D00 ^c	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
	<i>Risiko hoch</i> (Konventioneller ICD plus stattgehabte VT/VF; keine absolute HSM-Abhängigkeit)	0D0 oder D00 ^{c,d}	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
	<i>Risiko mittel</i> (Konventioneller ICD ohne stattgehabte VT/VF; keine absolute HSM-Abhängigkeit)	0D0 oder D00 ^{c,d}	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
	<i>Risiko niedrig</i> (Bedingt MRT-sicherer ICD plus absolute HSM-Abhängigkeit)	D00 ^c	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT
	<i>Risiko sehr niedrig</i> (Bedingt MRT-sicherer ICD ohne stattgehabte VT/VF; keine absolute HSM-Abhängigkeit)	0D0 oder D00 ^{c,d}	Unmittelbar prä MRT	Unmittelbar post MRT

HSM Herzschrittmacher, ICD Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator, MRT Magnetresonanztomographie

^aDer 0D0- oder 000-Modus wird wegen der Minimierung der möglichen Interferenzen mit den MRT-Feldern von den Herstellern bedingt MRT-sicherer HSM empfohlen und ist im MRT-Schutzmodus hinterlegt. Der Patient ist während der MRT-Untersuchung im 0D0/000-Modus aber nicht gegen spontane symptomatische Bradykardien geschützt. Folglich ist hier eine entsprechende kardiologische Notfallversorgung, insbesondere die Möglichkeit einer zeit- und ortsnahen Reprogrammierung des HSM, grundsätzlich zu gewährleisten

^bDer VVI-Modus ermöglicht die orts- und zeitversetzte Um- und Reprogrammierung, beinhaltet aber ein prinzipiell erhöhtes Risiko für Interferenzen mit den MRT-Feldern (z. B. asynchrone Stimulationen bei Aktivierung des Magnetschalters), ist deshalb nicht Bestandteil des hinterlegten MRT-Schutzmodus und somit eine zulassungsüberschreitende Anwendung („off-label use“)

^cDie ICD-Therapie ventrikulärer Rhythmusstörungen muss vor der MRT-Untersuchung inaktiviert werden

^dBei nicht HSM-abhängigen ICD-Patienten mit einer stabilen niedrigen Eigenfrequenz: D00 mit asynchroner Stimulation deutlich über der Eigenfrequenz; bei nicht HSM-abhängigen ICD-Patienten mit höheren oder instabilen Eigenfrequenzen: 0D0



Abb. 2 ▲ Grundlage für ein Untersuchungsprotokoll einer kardialen MRT-Untersuchung bei Patienten mit HSM/ICD. Das finale Untersuchungsprotokoll muss individuell an die Fragestellung und die Patienteneigenschaften angepasst werden. SSFP „steady state free precession“, SGRE „spoiled gradient echo“, LGE Late-Gadolinium-Enhancement. (Adaptiert nach [8])

Rückprogrammierung kurz gehalten werden.

Neben patienten-/krankheitsbedingten Gegebenheiten (z. B. ICD mit kürzlich stattgehabtem elektrischen Sturm und zahlreichen ICD-Schockabgaben vs. HSM bei intermittierender Bradyarrhythmie) ist die Art des Gerätes für die Planung relevant:

Bei Patienten mit einem konventionellen HSM ist das Vorgehen abhängig vom Grundrhythmus. Bei absoluter HSM-Abhängigkeit ist die Umprogrammierung vor der kardialen MRT-Untersuchung orts- und zeitversetzt möglich, sollte jedoch am selben Tag wie die MRT-Untersuchung erfolgen. Dasselbe gilt für Patienten ohne absolute HSM-Abhängigkeit mit permanenter Bradykardie, instabilem Eigenrhythmus und Zustand nach Synkopen. Bei Patienten ohne absolute HSM-Abhängigkeit und mit stabilem Eigenrhythmus gibt es 2 Optionen: A) Wird der HSM-Modus auf 0D0 oder 000 gestellt, muss dies unmittelbar vor der MRT-Untersuchung erfolgen, da der Patient damit keinen Schrittmacherschutz innehat. B) Wird der HSM-Modus auf VVI oder DDI programmiert, kann diese Umprogrammierung orts- und zeitversetzt innerhalb von 48 h vor der MRT-Untersuchung erfolgen. In allen genannten Fällen sollte die Rückprogrammierung unmittelbar nach der MRT-Untersuchung durchgeführt werden.

Bei Patienten mit einem bedingt MRT-sicheren HSM gilt hinsichtlich Ort und Zeit der Umprogrammierung vor der kardialen MRT-Untersuchung dasselbe wie bei konventionellen HSM. Die Rückprogrammierung unterscheidet sich jedoch.

Bei absoluter HSM-Abhängigkeit ist die Rückprogrammierung orts- und zeitversetzt möglich, sollte jedoch am selben Tag wie die MRT-Untersuchung erfolgen. Dasselbe gilt für Patienten ohne absolute HSM-Abhängigkeit mit permanenter Bradykardie, instabilem Eigenrhythmus und Zustand nach Synkopen. Bei Patienten ohne absolute HSM-Abhängigkeit und mit stabilem Eigenrhythmus gibt es 2 Optionen hinsichtlich der Rückprogrammierung: A) Wurde der HSM auf 0V0 oder 000 programmiert, muss die Rückprogrammierung unmittelbar nach der MRT-Untersuchung erfolgen, da der Patient damit keinen Schrittmacherschutz hat. B) Wurde der HSM auf VVI gestellt, kann die Rückprogrammierung orts- und zeitversetzt innerhalb 48 h nach der MRT-Untersuchung erfolgen.

Bei ICD-Patienten sollte die Umprogrammierung unmittelbar vor dem MRT sowie die Rückprogrammierung unmittelbar nach dem MRT erfolgen. Dies gilt sowohl für konventionelle als auch für bedingt MRT-sichere ICD. Grundsätzlich muss die Tachykardiedetektion eines ICD vor der kardialen MRT-Untersuchung inaktiviert werden, was bei bedingt MRT-sicheren Systemen durch den MRT-Modus gewährleistet wird. Die übrige Programmierung richtet sich nach dem individuellen Grundrhythmus.

Angelehnt an das Positionspapier von DGK und DRG enthält **Tab. 1** Empfehlungen zur HSM- und ICD-Programmierung im Zusammenhang mit kardialen MRT-Untersuchungen. Es ist erneut zu betonen, dass Patienteneigenschaften (z. B. Auftreten häufiger ventrikulärer Extrasystolen) zu

jeder Zeit ein Abweichen von dem in **Tab. 1** vorgeschlagenen Vorgehen begründen können und ggf. sachkundiges ärztliches Fachpersonal in die Entscheidungsfindung über Ort und Zeit der Um- und Rückprogrammierung eingebunden werden soll.

Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Technologie insbesondere der bedingt MRT-sicheren Geräte stetig weiterentwickelt. Zum Beispiel erkennen einige moderne Geräte, ob sie einem MRT-Magnetfeld ausgesetzt sind, bringen sich dann selbstständig in einen MRT-Modus und kehren in ihre ursprüngliche Programmierung zurück, wenn das MRT-Magnetfeld verlassen wurde. Derartig „intelligente“ Geräte sind jedoch derzeit nicht der Standard.

Nach 3 Monaten sollte eine Funktionskontrolle des HSM bzw. ICD zum Ausschluss von Langzeitschäden erfolgen. Die langfristigen Effekte der MRT-Untersuchung bei Patienten mit HSM oder ICD sind noch weitgehend unklar. Eine dezidierte Aufklärung des Patienten über diesen Sachverhalt und die Notwendigkeit regelhafter Nachuntersuchungen sind notwendig.

Untersuchungsprotokoll

Um einerseits die Expositionsdauer des Patienten mit einem HSM oder ICD in einem MRT auf ein Minimum (unter 30 min) zu beschränken und andererseits zuverlässig eine diagnostische Bildqualität zu erzielen, sollte das Untersuchungsprotokoll an die Fragestellung und die Patienteneigenschaften angepasst und vorausschauend geplant werden. Es gibt daher kein Standardprotokoll für eine kar-

Tab. 2 Checkliste für kardiale MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern/ICD

Vor der MRT-Untersuchung (1,5 T)	
<input type="checkbox"/>	Indikation sorgfältig überprüft (d. h. keine alternativen bildgebenden Verfahren zur Verfügung, Ergebnisse des kardialen MRT wichtig für Diagnosesicherung, Differenzialdiagnose und Therapieentscheidung)
<input type="checkbox"/>	Aufklärung des Patienten über zusätzliche Risiken erfolgt
<input type="checkbox"/>	Implantation liegt >6 Wochen zurück
<input type="checkbox"/>	Schrittmacherabfrage erfolgt (suffizienter Eigenrhythmus vorhanden?)
<input type="checkbox"/>	Dokumentation der Aggregat-/Sondenparameter (Reizschwellen, Batteriestatus etc.)
<input type="checkbox"/>	Schrittmacher-/ICD-Programmiergerät laut Patientenausweis bereitstellen
<input type="checkbox"/>	Thoraxröntgenaufnahme prüfen (d. h. keine freien/gekappten/stillgelegten Sonden, kein Sondenbruch/-isolationsdefekt, keine Sondenfehlage, keine epikardialen Elektroden etc.)
<input type="checkbox"/>	Funktionsfähiger i.v.-Zugang
<input type="checkbox"/>	ICD: Deaktivieren aller antitachykarder Therapiefunktionen
<input type="checkbox"/>	Prüfung und Anpassung der Geräteprogrammierung erfolgt
Während der MRT-Untersuchung	
<input type="checkbox"/>	EKG, RR-Manschette, O ₂ -Sensor anlegen und Ableitungen prüfen
<input type="checkbox"/>	Patienten anweisen, alle Missempfindungen zu melden
<input type="checkbox"/>	SAR(spezifische Absorptionsrate)-Limitationen beachten
<input type="checkbox"/>	Untersuchungsdauer kurz halten (<30 min = kumulative Zeit mit aktiven Gradienten-/Hochfrequenzfeldern)
Nach der MRT-Untersuchung	
<input type="checkbox"/>	Aktivieren der Stimulation mit Wiederherstellung der ursprünglichen Programmierung
<input type="checkbox"/>	ICD: Aktivieren der antitachykarden Therapiefunktionen und Programmierung auf die vorherigen Einstellungen
<input type="checkbox"/>	Dokumentation der Aggregat-/Sondenparameter (Batteriestatus, Reizschwellen etc.)
Bemerkungen	
<input type="checkbox"/>	...

diale MRT-Untersuchung bei Patienten mit HSM oder ICD. Als Grundlage kann jedoch das in **Abb. 2** skizzierte Vorgehen dienen, angelehnt an Hilbert et al. [8]. Dabei erfolgt im Anschluss an die CINE-SSFP-Aufnahmen in Kurzachsenorientierung die Festlegung des weiteren Procedere abhängig vom Ausmaß der Artefakte. Sind die CINE-SSFP-Aufnahmen weitgehend artefaktfrei, können SSFP-basierte Sequenzen auch für weitere Module (z. B. CINE in langen Achsen, Perfusion, ggf. Mapping) verwendet werden. Sind die initialen CINE-SSFP-Aufnahmen artefaktreich, können oben genannte Korrekturtechniken (z. B. Frequenzverschiebung) versucht werden. Häufig ist es jedoch effizienter, direkt auf SGRE-basierte Techniken zu wechseln. Für die LGE-Bilder sollte – wenn verfügbar – die Breitbandtechnik zum Einsatz kommen. Da bei ICD-Trägern die Artefakte häufig sehr ausgeprägt sind, empfiehlt es sich, hier direkt das SGRE-basierte Protokoll zu wählen.

Checkliste

Um einen einheitlichen Standard bei der Durchführung von kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM oder ICD zu gewährleisten, wird empfohlen, eine entsprechende Checkliste zu führen. Ein Vorschlag wird in **Tab. 2** gegeben.

Fazit

Die Indikation zu kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit HSM und ICD ist weiterhin streng zu stellen unter Berücksichtigung alternativer diagnostischer Verfahren und unter sorgfältiger Abwägung von Nutzen und Risiko. Dennoch unterstreichen neue Erkenntnisse, dass heute eine kardiale MRT-Untersuchung auch bei Patienten mit HSM und ICD mit hoher Patientensicherheit sowie suffizienter Bildqualität durchgeführt werden kann. Dieser Anspruch erfordert jedoch eine präzise

Patientenselektion und -vorbereitung, ein kontinuierliches Monitoring während der kardialen MRT-Untersuchung, eine effiziente Untersuchungsplanung und Adjustierung der MRT-Parameter sowie eine sorgfältige Patientennachsorge. Im Sinne einer höchstmöglichen Patientensicherheit wird geraten, diese komplexen Untersuchungen in erfahrenen Zentren und bei Verfügbarkeit von entsprechend qualifiziertem ärztlichen Fachpersonal durchzuführen.

Korrespondenzadresse

PD Dr. F. von Knobelsdorff-Brenkenhoff
Klinik für Innere Medizin – Kardiologie,
Krankenhaus Agatharied, Akademisches
Lehrkrankenhaus der Ludwig-Maximilians-
Universität München
Norbert-Kerkel-Platz, Agatharied, Deutschland
florian.vonknobelsdorff@khangatharied.de

Interessenkonflikt. J. Schulz-Menger ist Advisor von Bayer Healthcare. P. Sommer hat Vortragshonorare von Siemens erhalten. F. von Knobelsdorff-Brenkenhoff, W.R. Bauer, T. Deneke, E. Fleck, A. Rolf, C. Tillmanns und I. Eitel geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- Sommer T, Bauer W, Fischbach K, Kolb C, Luechinger R, Wiegand U, Lotz J, Eitel I, Gutberlet M, Thiele H, Schild HH, Kelm M, Quick H, Schulz-Menger J, Barkhausen J, Bänsch D (2017) MR-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren. *Kardiologie* 11:17
- von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Schulz-Menger J (2016) Role of cardiovascular magnetic resonance in the guidelines of the European Society of Cardiology. *J Cardiovasc Magn Reson* 18:6
- Sommer T, Luechinger R, Barkhausen J, Gutberlet M, Quick HH, Fischbach K, Working Group on Cardiovascular Imaging GRS (2015) German roentgen society statement on MR imaging of patients with cardiac pacemakers. *Rofo* 187:777–787
- Hilbert S, Weber A, Nehrke K, Bornert P, Schnackenburg B, Oebel S, Spaminato R, Rogge C, Richter S, Hindricks G, Paetsch I, Jahnke C (2018) Artefact-free late gadolinium enhancement imaging in patients with implanted cardiac devices using a modified broadband sequence: current strategies and results from a real-world patient cohort. *Europace* 20:801–807
- Naehle CP, Kreuz J, Strach K, Schwab JO, Pingel S, Luechinger R, Fimmers R, Schild H, Thomas D (2011) Safety, feasibility, and diagnostic value of cardiac magnetic resonance imaging in patients with cardiac pacemakers and implantable cardioverters/defibrillators at 1.5T. *Am Heart J* 161:1096–1105
- Kaasalainen T, Kivisto S, Holmstrom M, Peltonen J, Pakarinen S, Hanninen H, Sipilä O (2016) Cardiac MRI in patients with cardiac pacemakers: practical

- methods for reducing susceptibility artifacts and optimizing image quality. *Acta radiol* 57:178–187
7. Schwitler J, Gold MR, Al Fajih A, Lee S, Peterson M, Ciuffo A, Zhang Y, Kristiansen N, Kanal E, Sommer T, Evera-MRI Study Investigators (2016) Image quality of cardiac magnetic resonance imaging in patients with an Implantable Cardioverter Defibrillator system designed for the magnetic resonance imaging environment. *Circ Cardiovasc Imaging*. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.115.004025>
 8. Hilbert S, Jahnke C, Loebe S, Oebel S, Weber A, Spampinato R, Richter S, Doering M, Bollmann A, Sommer P, Hindricks G, Paetsch I (2018) Cardiovascular magnetic resonance imaging in patients with cardiac implantable electronic devices: a device-dependent imaging strategy for improved image quality. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 19:1051–1061
 9. Sasaki T, Hansford R, Zviman MM, Kolandaivelu A, Bluemke DA, Berger RD, Calkins H, Halperin HR, Nazarian S (2011) Quantitative assessment of artifacts on cardiac magnetic resonance imaging of patients with pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators. *Circ Cardiovasc Imaging* 4:662–670
 10. Rashid S, Rapacchi S, Vaseghi M, Tung R, Shivkumar K, Finn JP, Hu P (2014) Improved late gadolinium enhancement MR imaging for patients with implanted cardiac devices. *Radiology* 270:269–274
 11. Kellman P, Arai AE (2007) Imaging sequences for first pass perfusion—a review. *J Cardiovasc Magn Reson* 9:525–537
 12. Klein-Wiele O, Garmer M, Urbien R, Busch M, Kara K, Mateiescu S, Gronemeyer D, Schulte-Hermes M, Garbrecht M, Hailer B (2015) Feasibility and safety of adenosine cardiovascular magnetic resonance in patients with MR conditional pacemaker systems at 1.5 Tesla. *J Cardiovasc Magn Reson* 17:112
 13. Klein-Wiele O, Garmer M, Busch M, Mateiescu S, Urbien R, Barbone G, Kara K, Schulte-Hermes M, Metz F, Hailer B, Gronemeyer D (2017) Cardiovascular magnetic resonance in patients with magnetic resonance conditional pacemaker systems at 1.5 T: influence of pacemaker related artifacts on image quality including first pass perfusion, aortic and mitral valve assessment, flow measurement, short tau inversion recovery and T1-weighted imaging. *Int J Cardiovasc Imaging* 33:383–394
 14. Richau J, Dieringer MA, Traber J, von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Greiser A, Schwenke C, Schulz-Menger J (2017) Effects of heart valve prostheses on phase contrast flow measurements in Cardiovascular Magnetic Resonance—a phantom study. *J Cardiovasc Magn Reson* 19:5
 15. Hong K, Jeong EK, Wall TS, Drakos SG, Kim D (2015) Wideband arrhythmia-Insensitive-rapid (AIR) pulse sequence for cardiac T1 mapping without image artifacts induced by an implantable-cardioverter-defibrillator. *Magn Reson Med* 74:336–345
 16. Shao J, Rashid S, Renella P, Nguyen KL, Hu P (2017) Myocardial T1 mapping for patients with implanted cardiac devices using wideband inversion recovery spoiled gradient echo readout. *Magn Reson Med* 77:1495–1504