

Kardiologie

<https://doi.org/10.1007/s12181-021-00474-9>

Angenommen: 24. Februar 2021

© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung e.V. Published by Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature – all rights reserved 2021



Florian von Knobelsdorff<sup>1</sup> · W. R. Bauer<sup>2</sup> · S. Busch<sup>3</sup> · I. Eitel<sup>4</sup> · C. Jensen<sup>5,6</sup> · N. Marx<sup>7,8</sup> · M. Neizel-Wittke<sup>9</sup> · U. K. Radunski<sup>10</sup> · A. Schuster<sup>11,12</sup> · A. Rolf<sup>13</sup>

<sup>1</sup> KIZ – Kardiologie im Zentrum, München, Deutschland

<sup>2</sup> Medizinische Klinik und Poliklinik I, Universitätsklinikums Würzburg, Würzburg, Deutschland

<sup>3</sup> II. Medizinische Klinik, Klinikum Coburg, Coburg, Deutschland

<sup>4</sup> Medizinische Klinik II – Kardiologie, Angiologie, Intensivmedizin, Universitäres Herzzentrum Lübeck, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Lübeck, Deutschland

<sup>5</sup> B. Braun Ambulantes Herzzentrum Kassel MVZ GmbH, Kassel, Deutschland

<sup>6</sup> Ruhr Universität Bochum, Bochum, Deutschland

<sup>7</sup> Klinik für Kardiologie, Angiologie und Internistische Intensivmedizin (Medizinische Klinik I), Universitätsklinikum Aachen, Aachen, Deutschland

<sup>8</sup> Kommission für Klinische Kardiovaskuläre Medizin, Deutsche Gesellschaft für Kardiologie, Düsseldorf, Deutschland

<sup>9</sup> Klinik für Kardiologie und Angiologie, Städtische Kliniken Mönchengladbach, Mönchengladbach, Deutschland

<sup>10</sup> Klinik für Kardiologie und Angiologie, Regio Kliniken, Elmshorn und Pinneberg, Deutschland

<sup>11</sup> Herzzentrum, Klinik für Kardiologie und Pneumologie, Universitätsmedizin Göttingen, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Deutschland

<sup>12</sup> Deutsches Zentrum für Herz-Kreislauf-Forschung, Partner Site Göttingen, Göttingen, Deutschland

<sup>13</sup> Herz-, Lungen-, Gefäß- und Rheumazentrum, Abteilung Kardiologie, Kerckhoff-Klinik, Bad Nauheim, Deutschland

## Sicherheit von nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten bei MRT-Untersuchungen – Update 2021

### Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung

#### Einleitung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist eine zentrale diagnostische Methode in der Medizin. Während die MRT im Allgemeinen als sichere Methode gilt, können die magnetischen Felder für Patienten mit *aktiven* und *nicht-aktiven* Implantaten ein Risiko bedeuten. In der kardiovaskulären Medizin zählen zu den *aktiven* Implantaten z. B. ein Herzschritt-

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit und Verständlichkeit der Texte wird in Springer-Publikationen in der Regel das generische Maskulinum als geschlechtsneutrale Form verwendet. Diese Form impliziert immer alle Geschlechter.

macher, implantierbarer Defibrillator oder Eventrecorder. Dagegen gehören zu den *nicht-aktiven* Implantaten (auch „*passive*“ Implantate genannt) z. B. Gefäßstents und Herzklappenprothesen. Mit dem Fortschritt in der kardiovaskulären Medizin nimmt die Zahl der Patienten mit kardiovaskulären Implantaten stetig zu. Im klinischen Alltag besteht daher nicht selten Unsicherheit über mögliche implantatbezogene Gefahren bei einer MRT-Untersuchung.

Zur Etablierung der Sicherheit der MRT-Umgebung im klinischen Alltag wurden in der Vergangenheit deutsche, europäische und internationale Normen aufgestellt [1–5]. Danach werden aktive

und nicht-aktive Implantate hinsichtlich der MRT-Sicherheit in 3 Kategorien eingeteilt:

- Als „*MR safe*“ (MR sicher) werden Implantate bezeichnet, für die aufgrund ihrer Eigenschaften (nicht leitend, nicht metallisch, nicht magnetisch) kein Risiko im MRT-Umfeld bekannt ist.
- Als „*MR conditional*“ (bedingt MR-sicher) werden Implantate eingestuft, die nur unter definierten Bedingungen kein Risiko im MRT-Umfeld darstellen. Zu diesen Bedingungen zählen vor allem technische Parameter des MRT-Gerätes, wie die Magnetfeldstärke, die Stärke und

## Empfehlungen und Stellungnahmen

Dynamik des Gradientensystems, die Hochfrequenzfelder sowie die spezifische Absorptionsrate (SAR). Überdies können die Bedingungen den Untersuchungsablauf betreffen und z. B. Vorgaben zur untersuchten Körperregion, zum Abstand zwischen Implantat und MRT-Zielgebiet sowie zur maximalen Untersuchungsdauer enthalten. Schließlich können sich die Bedingungen auf das Implantat selbst beziehen und z. B. im Falle eines Herzschrittmachers notwendige Einstellungen definieren.

- Als „MR unsafe“ (MR unsicher) werden Implantate bezeichnet, die in jeder MRT-Umgebung eine Gefahr bedeuten.

Die entsprechende MRT-Kennzeichnung eines Implantates wird von den Herstellern des Implantates ausgegeben.

Dem Umgang mit *aktiven* kardiovaskulären Implantaten bei MRT-Untersuchungen im Allgemeinen sowie bei einer Herz-MRT-Untersuchung im Speziellen widmeten sich 2017 bzw. 2019 entsprechende Stellungnahmen der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) [6, 7]). Zum Umgang mit *nicht-aktiven* bzw. *passiven* kardiovaskulären Implantaten in der MRT äußerte sich die DGK in einer 2015 erschienenen Stellungnahme [8].

Das hier vorliegende Papier stellt nun ein Update der letztgenannten Stellungnahme dar und fasst Informationen und Empfehlungen zum Umgang mit nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten bei MRT-Untersuchungen zusammen.

### Physikalischer Hintergrund möglicher Risiken von nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten im MRT

Wesentliche Teile entsprechen den Risiken, die bereits in den Stellungnahmen zu aktiven kardiovaskulären Implantaten beschrieben wurden [6, 7].

Sicherheitsrisiken ergeben sich aus der Wechselwirkung des Implantates mit den elektromagnetischen Feldern des MR-Tomographen, also dem *statischen Magnetfeld*, den *Gradientenfeldern* und den *Hochfrequenzfeldern* [9, 10].

Das *statische Magnetfeld* (1,5–3,0 T) erzeugt über Polarisation der Wasserstoffprotonen die Magnetisierung für das eigentliche MR-Signal. Dieses Feld ist um ein Vielfaches, also 25.000–50.000 mal stärker als das Erdmagnetfeld ( $<60 \mu\text{T}$ ) und wirkt auf die ferromagnetischen Komponenten des Implantates, was außerhalb des Tomographen in einer Zugkraft bzw. innerhalb des Tomographen in einer Drehkraft resultiert. Ferromagnetische Materialien werden in einigen Stents und Herzklappenprothesen verwendet, jedoch sind die Kräfte meist zu gering, als dass eine Gefährdung bestünde und viel geringer als die mechanischen Kräfte durch Blutdruck und Herzaktion. Eine weitere potenzielle Interaktion basiert auf dem Prinzip der Wirbelstrombremse. Durch die Bewegung metallischer Implantate im statischen Magnetfeld werden durch die Lorentzkraft Ströme induziert. Als Wirbelströme erzeugen sie selbst ein die Bewegung bremsendes Magnetfeld und könnten theoretisch die Herz-/Klappenmechanik beeinflussen. Dies ist bislang aber bei den üblichen Feldstärken nicht beobachtet worden.

Die *Gradientenfelder* ( $\sim 40 \text{ mT}$ ) sind notwendig, um eine räumliche Zuordnung des MR-Signals zu ermöglichen. Diese werden ein- und ausgeschaltet, sind also zeitabhängig und somit in der Lage, Spannungspulse zu induzieren. Die Größe der Spannungspulse hängt dabei von der Fläche ab, welche das zeitabhängige Magnetfeld angrenzend an den Leiter durchsetzt. Bei kleineren Implantaten ist dies also zu vernachlässigen.

Die *Hochfrequenzfelder* (64 MHz bei 1,5 T bzw. 128 MHz bei 3 T) drehen die Kernmagnetisierung, wobei dann deren zum äußeren Magnetfeld senkrechte Komponente das eigentliche MR-Signal erzeugt. Als elektromagnetische Wellen besitzen diese Hochfrequenzfelder eine elektrische Feldkomponente, die auf elektrisch leitende Implantate einwirken kann. Die Wellenlängen liegen aufgrund der hohen Dielektrizitätskonstante im menschlichen Körper bei ca. 50 cm (1,5 T) bzw. 25 cm (3 T), sodass Resonanzen bei den meisten kleineren Implantaten unwahrscheinlich sind. Für längere Implantate, ab der halben Wellenlänge, können jedoch Resonanzen

auftreten, d. h. das leitende Implantat wirkt wie eine abgestimmte Antenne, die das Hochfrequenzsignal auffangen, lokal verstärken und dessen Energie an den Enden abgeben und ggf. thermisch schädigen kann.

### Risikoeinschätzung verschiedener nicht-aktiver kardiovaskulärer Implantate

In den folgenden Abschnitten werden für verschiedene Implantatgruppen Informationen zur Risikoeinschätzung und zum Umgang bei einer MRT-Untersuchung gegeben.

#### Gefäßimplantate

Gefäßimplantate bestehen mehrheitlich aus nicht oder schwach ferromagnetischen Materialien, und die meisten auf dem Markt befindlichen koronaren und peripher-vaskulären Stents sowie Embolisationsspiralen („coils“), Vena-cava-Filter und Portkathetersysteme sind auf Wechselwirkungen im MRT-System bei einer Feldstärke von 1,5 T und, seltener, 3 T getestet [11, 12]. Viele Gefäßimplantate, wie z. B. Stents oder Vena-cava-Filter, werden während der Implantation mit Druck an die Gefäßwand gepresst und/oder mechanisch verankert. Beides wirkt einer Torsion und Migration des Implantates entgegen. Zusätzlich bedingen das Einwachsen des Implantates in das umliegende Gewebe und die Endothelialisierung während der ersten Wochen nach Implantation eine weitere Fixierung. Somit sind Torsion und Migration selbst schwach ferromagnetischer Implantate, die in der Testung Magnetfeldwechselwirkungen zeigen, bei einer Feldstärke von 1,5 T oder weniger unwahrscheinlich. Insofern können Patienten mit nicht-ferromagnetischem Implantaten (z. B. Titan, Titanlegierungen oder Nitinol) einer MRT-Untersuchung sofort nach Implantation unterzogen werden [12, 13]. Neben der Dislokation kann für bestimmte Typen und Formen von Coils, Stents und Filtern theoretisch auch die MRT-bedingte Erwärmung relevant sein. Bisher ist jedoch kein Fall übermäßiger Erwärmung im Zusammenhang mit ei-

nem der getesteten Implantate bekannt [12].

### Stents in Koronararterien, peripheren Gefäßen und Aorta

Die meisten koronaren und peripher-vaskulären Gefäßstents sind aus nicht oder schwach ferromagnetischen Materialien und werden überwiegend aus Metalllegierungen wie reinem oder beschichtetem Edelstahl, Tantal, einer Kobalt-Chrom-Legierung, einem Biopolymer oder einer Nickel-Titan-Legierung (Nitinol) hergestellt [14]. Von den derzeit am Markt befindlichen peripher-vaskulären Koronar- und Aortenstents wurden alle im MRT-System getestet als „MR safe“ oder „MR conditional“ eingestuft [11, 12]. Auch die in der DGK-Stellungnahme aus 2015 [8] noch als „MR unsafe“ erwähnten Iliakal- und Aortenstents Zenith Spiral bzw. Flex (Cookmedical, USA) wurden inzwischen als „MR conditional“ eingeordnet.

Alle Patienten mit Stents aus nicht-ferromagnetischem Material können sofort nach Implantation bei  $\leq 3$  T untersucht werden [15, 16], während eine Untersuchung bei Patienten mit peripher-vaskulären Stents oder Aortenstents aus schwach ferromagnetischem Material innerhalb der ersten 6–8 Wochen nach kritischer Risiko-Nutzen-Abwägung erfolgen sollte [13]. Für viele Koronarstents bestehen Herstellerinformationen zur MRT-Tauglichkeit bei 1,5 T und 3 T [11, 12]. Vor dem Hintergrund der guten Datenlage zur Sicherheit von Koronarstents im MRT erscheint es möglich, bei Patienten mit Koronarstents auch ohne Vorliegen der stentspezifischen Herstellerinformationen zur MRT-Tauglichkeit eine MRT-Untersuchung durchzuführen. Folgende allgemeine Empfehlungen dienen dabei als Grundlage [17]:

- Patienten mit Koronarstents können bei 1,5 T/64 MHz oder 3 T/128 MHz gescannt werden, unabhängig von der Stärke des räumlichen Gradientenmagnetfelds.
- Patienten mit Koronarstents können sich sofort nach Stentimplantation einer MRT-Untersuchung unterziehen.
- Die MRT-Untersuchung soll mit folgenden Parametern durchgeführt werden:

## Zusammenfassung · Abstract

Kardiologie <https://doi.org/10.1007/s12181-021-00474-9>

© Deutsche Gesellschaft für Kardiologie - Herz- und Kreislaufforschung e.V. Published by Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature - all rights reserved 2021

F. von Knobelsdorff · W. R. Bauer · S. Busch · I. Eitel · C. Jensen · N. Marx · M. Neizel-Wittke · U. K. Radunski · A. Schuster · A. Rolf

### Sicherheit von nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten bei MRT-Untersuchungen – Update 2021. Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung

#### Zusammenfassung

Diese Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie fasst Informationen und Empfehlungen zum Umgang mit nicht-aktiven (auch genannt „passiven“) kardiovaskulären Implantaten (z. B. Koronarstents) bei der Magnetresonanztomographie (MRT) zusammen. Es wird empfohlen, bei jedem Patienten vor einer MRT-Untersuchung das Vorhandensein von nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten zu erfragen, gegebenenfalls detaillierte Implantat-Informationen einzuholen und schließlich unter individueller Nutzen-Risiko-Abwägung die Entscheidung für oder gegen die MRT-Untersuchung zu treffen. Bei der MRT-Untersuchung sind gegebenenfalls Anpassungen der technischen MRT-Parameter oder des Untersuchungsablaufs zu berücksichtigen.

Diese Aufgaben obliegen dem die MRT-Untersuchung durchführenden Arzt. Er wird unterstützt, indem der Patient selbst sowie der überweisende Arzt die notwendigen Informationen rechtzeitig zur Verfügung stellen. Dabei ist die Verwendung von Implantatpässen und Implantatdatenbanken hilfreich. Werden diese Vorsichtsmaßnahmen berücksichtigt, sind nach derzeitigem Kenntnisstand MRT-Untersuchungen bei Patienten mit nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten im Allgemeinen ohne gravierende Sicherheitsbedenken durchführbar.

#### Schlüsselwörter

Magnetresonanztomographie · Sicherheit · Implantate · Kardiovaskulär

### Safety of non-active cardiovascular implants in MRI examinations: Update 2021. Statement of the German Cardiac Society

#### Abstract

This statement of the German Cardiac Society summarizes information and recommendations how to deal with non-active (i.e. passive) cardiovascular implants (e.g. coronary stents) in magnetic resonance imaging (MRI). It is recommended to check for the presence of any non-active cardiovascular implant in every patient before MRI, to seek for detailed implant-specific information if appropriate and finally to decide in favour or against the MRI after careful risk-benefit analysis. When performing the MRI, modifications of the technical MRI parameters and of the course of the exam may be necessary. The physician who performs the MRI is responsible for these

tasks and should be supported by the patient and by the referring physician by providing all relevant information in time. The use of implant passes and implant databases may help to keep the procedure efficient and safe. Under consideration of these precautionary measures, MRI exams can be generally performed without serious safety concerns in patients with non-active cardiovascular implants.

#### Keywords

Magnetic resonance imaging · Safety · Implants · Cardiovascular

- $B_0$ -Feldstärke  $\leq 3$  T
- Ganzkörper-SAR  $\leq 2$  W/kg Körpergewicht (entspricht dem normalen Betriebsmodus eines MRT-Systems)
- Bildgebungszeit  $\leq 15$  min pro Pulssequenz (mehrere Pulssequenzen sind erlaubt)

Die Empfehlung zur Ganzkörper-SAR steht unter Umständen im Gegensatz zum MRT-Betrieb in der täglichen Praxis und bedarf einer zusätzlichen Erläuterung: SAR ist ein Maß für die Absorption von elektromagnetischen Feldern. Entsprechend den einleitend erwähnten Normen ist die Ganzkörper-SAR für die normale MRT-Betriebsart

## Empfehlungen und Stellungnahmen

auf  $\leq 2$  W/kg festgelegt, für die erste Stufe der kontrollierten Betriebsart auf  $\leq 4$  W/kg und für die zweite Stufe der kontrollierten Betriebsart auf  $> 4$  W/kg. Die normale Betriebsart und die erste Stufe der kontrollierten Betriebsart sind für die Patientenversorgung zugelassen. Im klinischen Alltag werden gerade bei der kardialen MRT einige Untersuchungsteile in der ersten Stufe der kontrollierten Betriebsart durchgeführt, so dass das oben genannte Ganzkörper-SAR-Limit von  $\leq 2$  W/kg unter Umständen momentan überschritten wird, auch bei Patienten mit Koronarstents. Komplikationen durch MRT-Untersuchungen in der ersten Stufe der kontrollierten Betriebsart bei Patienten mit Koronarstents wurden bislang nicht berichtet. Die nur kurzen Bildakquisitionen im Wechsel mit Phasen ohne Bildakquisition sowie die rasche Wärmeableitung im Bereich von Koronarstents durch den Blutfluss dürften einer relevanten Erwärmung entgegenwirken. Zusammenfassend entspricht in diesem Fall die oben zitierte Empfehlung zur Ganzkörper-SAR nicht der gängigen Praxis. Die Autoren der Taskforce halten letztlich eine MRT-Untersuchung in der ersten Stufe der kontrollierten Betriebsart bei Patienten mit Koronarstents für vertretbar. Sicherlich empfehlenswert sind jedoch die entsprechende Aufklärung des Patienten über diesen Sachverhalt sowie der Versuch des Untersucherteams, durch Modifikation der Scanparameter (z. B. Reduktion des Flipwinkels, Reduktion der Schichtanzahl pro Atemanhalte) in der normalen Betriebsart zu bleiben.

### Vena-cava-Filter

Die meisten Vena-cava-Filter sind aus nicht-ferromagnetischen und nur wenige aus schwach ferromagnetischen Materialien hergestellt. Demnach wurden die meisten im MR-System getesteten Vena-cava-Filter als „MR safe“ und der Rest als „MR conditional“ eingestuft [11, 12]. Sie werden mithilfe von Haken verankert, verwachsen mit der Gefäßwand und endothelialisieren innerhalb von ca. 4–6 Wochen nach Implantation. Weder bei Tieren noch bei Menschen mit implantierten Vena-cava-Filtern wurde eine Filterverschiebung oder eine ande-

re Komplikation aufgrund einer MRT-Untersuchung bei  $\leq 1,5$  T beobachtet [18–23]. Patienten mit Vena-cava-Filtern aus nicht-ferromagnetischem Material können sofort nach Implantation mit einem MRT-System ( $\leq 3$  T) untersucht werden, während die Untersuchung von Patienten mit Vena-cava-Filtern aus schwach ferromagnetischem Material innerhalb der ersten 6–8 Wochen nach Implantation nach kritischer Risiko-Nutzen-Abwägung erfolgen sollte [13].

### Coils

Die ersten und seit den 1970er-Jahren verwendeten Coils waren aus rostfreiem Edelstahl, während neuere Coils eher aus Platin oder anderen Legierungen hergestellt werden [13]. Alle im MRT-System getesteten Coils sind aus nicht oder schwach ferromagnetischem Material und wurden entweder als „MR safe“ oder „MR conditional“ eingestuft [11, 12]. Patienten mit Coils aus schwach ferromagnetischem Material sollten innerhalb der ersten 6–8 Wochen nur nach kritischer Risiko-Nutzen-Abwägung untersucht werden [13]. Es gilt zu bedenken, dass es theoretisch durch die Form bestimmter Coils während der MRT-Untersuchung zu einer Erwärmung kommen kann [13]. In einer retrospektiven Betrachtung von 297 Patienten (539 MRT-Untersuchungen) mit den früher häufiger verwendeten Coils aus rostfreiem Edelstahl zeigte sich bei einer Feldstärke von 1,5 T kein unerwünschtes klinisches Ereignis [24]. Für Coils aus Platin besteht eine gute Datenlage zur Sicherheit der Patienten bis 3 T [25–29].

### Portkathetersysteme

Portkathetersysteme können aus verschiedenen Materialien hergestellt sein, einschließlich rostfreiem Edelstahl, Titan, Silikon und Kunststoff [12]. Aufgrund der weit verbreiteten Verwendung von Portkathetersystemen bei onkologischen Patienten und der hohen Wahrscheinlichkeit einer klinischen Indikation für eine MRT-Untersuchung ist die Prüfung der Portkathetersysteme auf MRT-Wechselwirkungen von großer praktischer Bedeutung. Für viele Portkathetersysteme besteht eine Hersteller-

information zur MRT-Tauglichkeit, und bisher wurden weder bei 1,5 T noch bei 3 T unerwünschte klinische Ereignisse dokumentiert [11, 12, 30]. Vor dem Hintergrund der vorhandenen Literatur zur Sicherheit von Portkathetersystemen im MRT erscheint es daher nicht notwendig, Patienten mit Portkathetersystemen eine MRT-Untersuchung vorzuenthalten, wenn die produktspezifischen Herstellerinformationen zur MRT-Tauglichkeit nicht vorliegen. Dabei sollten folgende Voraussetzungen beachtet werden [30]:

- Patienten mit Portkathetersystemen können mit 1,5 T/64 MHz oder 3 T/128 MHz gescannt werden, unabhängig von der Stärke des räumlichen Gradientenmagnetfelds.
- Patienten mit Portkathetersystemen können sich sofort nach Implantation einer MRT-Untersuchung unterziehen.
- Die MRT-Untersuchung sollte mit folgenden Parametern durchgeführt werden:
  - $B_0$ -Feldstärke  $\leq 3$  T
  - Ganzkörper-SAR  $\leq 2$  W/kg Körpergewicht (entspricht dem normalen Betriebsmodus eines MRT-Systems; Zur Einordnung dieser Bedingung: siehe Abschnitt zu Koronarstents)
  - Bildgebungszeit  $\leq 15$  min pro Pulssequenz (mehrere Pulssequenzen sind erlaubt)

## Herzklappenimplantate

### Chirurgische Herzklappenprothesen und -ringe

Die chirurgische Herzklappentherapie umfasst den operativen Herzklappenersatz mittels mechanischer oder biologischer Prothesen sowie die Herzklappenrekonstruktion mittels Anuloplastierungen. Für die meisten der dazu eingesetzten Implantate existiert die Einordnung als „MR conditional“. Im Detail kann diese Information entsprechenden Herstellerangaben und Datenbanken entnommen werden [12]. Unter Beachtung der Sicherheitshinweise wurden bis heute keine signifikanten Komplikationen bei MRT-Untersuchungen bis 3 T berichtet [11, 13].

Bei den mechanischen Klappenprothesen werden aktuell fast ausschließlich zweiflügelige Prothesen implantiert. Es finden sich jedoch weiterhin Patienten mit implantierten älteren Modellen, wie einflügeligen Prothesen oder Kugelkämpfprothesen. Mechanische Klappenprothesen können ferromagnetisches Material enthalten. Die Klappenbestandteile mit Blutkontakt bestehen typischerweise aus pyrolysiertem Kohlenstoff [13]. Einige biologische Klappenprothesen und Anuloplastieringe enthalten ebenfalls meist in geringem Maße ferromagnetische Bestandteile [13]. Die Interaktion des Prothesenmaterials mit den Magnetfeldern des MRT ist jedoch so gering, dass sie nicht für eine Dislokation oder strukturelle Beschädigung der Prothesen ausreicht. Auch eine relevante Erwärmung konnte bisher in keinem Fall nachgewiesen werden [31–41]. Eine Klappendysfunktion durch den Lenzeffekt, der auf einer Bewegung ferromagnetischen Materials durch das statische Magnetfeld wie z. B. einer Klappenprothese durch die Herzaktion beruht, ist in vivo bisher nicht nachweisbar gewesen – dies könnte theoretisch bei sehr hoher MRT-Feldstärke relevant werden [13, 42–44].

Neben diesen kardiovaskulären Implantaten im engeren Sinne können bei kardiochirurgischen Eingriffen weitere Implantate kurzzeitig oder dauerhaft im Körper verbleiben (z. B. passagere Schrittmacherelektroden, Sternalcerclagen). Diese sind ebenso hinsichtlich der Sicherheit im MRT-Umfeld zu berücksichtigen. Sternalcerclagen stellen keine sicherheitsrelevante Einschränkung im MRT dar.

Folgende allgemeine Empfehlungen können für Patienten mit Herzklappenprothesen und Anuloplastierungen gegeben werden [45]:

- B<sub>0</sub>-Feldstärke 1,5 T (64 MHz) oder 3 T (128 MHz)
- Keine Einschränkung hinsichtlich des räumlichen Gradientenmagnetfeldes
- Keine Einschränkung hinsichtlich des Zeitpunktes des MRT (direkt nach Implantation möglich)
- Ganzkörper-SAR ≤ 2 W/kg Körpergewicht (entspricht dem normalen Betriebsmodus eines MRT-Systems,

Zur Einordnung dieser Bedingung: siehe Abschnitt zu Koronarsten

- Maximal 15 min MRT-Scanning pro Pulssequenz (mehrere Pulssequenzen pro Patient sind erlaubt)

### Interventionelle Herzklappenprothesen

Die interventionelle Therapie von Herzklappen beinhaltet die kathetergestützte Implantation von Klappenprothesen und die perkutane Herzklappenrekonstruktion. Seit der Einführung der kathetergestützten Aortenklappenimplantationen (TAVI) 2002 und der perkutanen Edge-to-Edge-Mitralklappenrekonstruktion 2008 nimmt die interventionelle Therapie in der Versorgung kardiologischer Patienten an Bedeutung zu. Numerisch hat die kathetergestützte Implantation von Aortenklappenprothesen inzwischen den herzchirurgischen Aortenklappenersatz insbesondere bei älteren Patienten und Patienten mit relevanten Komorbiditäten übertroffen.

Bei den perkutanen Aortenklappenprothesen werden selbstexpandierende und ballonexpandierende unterschieden. Selbstexpandierende Prothesen bestehen überwiegend aus Nitinol (eine äquiatomare Legierung aus Titan und Nickel). Ballonexpandierende Prothesen bestehen aus einer Kobalt-Chrom-Legierung (Sapien XT, Sapien 3, Edwards Lifesciences, Irvine, USA). Die erste Generation der Sapien-Prothese bestand aus rostfreiem Stahl – sie wird nicht mehr implantiert [12].

Zur interventionellen Mitralklappenprothese kommen verschiedene Techniken infrage. Zum einen können die Mitralklappensegel mittels Clips adaptiert werden (MitraClip® Abbott Vascular, Chicago, USA; Pascal® Edwards Lifescience), zum anderen lässt sich der Mitralklappenring modifizieren (Carillon, Cardiac Dimensions, Kirkland, USA; Cardioband Edwards Lifescience).

In den letzten Jahren ist zudem die interventionelle Therapie der Trikuspidalklappeninsuffizienz (TriClip, Abbott Vascular; Pascal, Edwards Lifescience; Cardioband, Edwards Lifescience) in den Fokus gerückt. Außerdem existieren interventionelle Klappenprothesen für die Pulmonalklappenposition (Melody,

Medtronic, Minneapolis, USA; Sapien XT pulmonic, Edwards Lifescience).

Alle bisher getesteten TAVI-Prothesen, MitraClip, Pascal, Carillon, Cardioband und TriClip und die interventionellen Pulmonalklappenprothesen zeigten keine relevanten Magnetfeldinteraktionen oder eine relevante Erhitzung unter standardisierten Untersuchungsbedingungen bis zu einem statischen Magnetfeld von 3 T [12]. Entsprechend der oben genannten Nomenklatur werden diese Produkte überwiegend als „MR conditional“ eingestuft.

Eine Sondersituation stellt die Implantation von interventionellen Klappenprothesen in eine z. B. degenerativ veränderte Herzklappenprothese (sog. Valve-in-Valve-Prozedur) dar. Die MRT-Sicherheit dieser Konstellation ist nicht explizit getestet, sodass hier die Durchführung einer MRT-Untersuchung eine Einzelfallentscheidung darstellt.

Als Allgemeinempfehlungen zur Durchführung einer MRT nach einer interventionellen Klappentherapie können die oben für herzchirurgische Klappenprothesen genannten Angaben herangezogen werden [45]. Die interventionelle Klappentherapie ist jedoch ein sehr dynamisches Feld mit einer wachsenden Produktvielfalt, so dass im Idealfall vor einer MRT-Untersuchung die MRT-Sicherheit individuell evaluiert wird.

### Vorhofohrimplantate

#### Chirurgischer Verschluss des linken Vorhofohres

Ein chirurgischer Verschluss des linken Vorhofohres kann bei Patienten mit Vorhofflimmern, die sich einer Herzoperation oder einer thorakoskopischen Ablation unterziehen, zur Thromboembolieprophylaxe durchgeführt werden. Von den verschiedenen operativen Techniken (Ausschluss oder Exzision) ist im Rahmen einer MRT-Untersuchung vor allem der Ausschluss mittels AtriClip (Atricure Inc., Mason, USA) von Bedeutung. Dieser Clip wird unter Sicht von außen auf das linke Vorhofsohr aufgebracht, verschließt so den Eingang zum Vorhofsohr und isoliert dieses elektrisch [46]. Das AtriClip-System wurde als „MR Con-

## Empfehlungen und Stellungnahmen

ditional“ eingestuft. Eine MRT-Untersuchung ist sofort nach Implantation unter den folgenden Bedingungen möglich [47]:

- $B_0$ -Feldstärke  $\leq 3$  T
- Maximaler Wert des räumlichen Gradientenmagnetfelds  $\leq 4000$  Gauss/cm (40 T/m)
- Ganzkörper-SAR  $\leq 4$  W/kg Körpergewicht für maximal 15 min MRT-Scanning pro Pulssequenz (entspricht der ersten Stufe des kontrollierten Betriebsmodus eines MRT-Systems)

### Kathetergestützter Verschluss des linken Vorhofohres

Zunehmend häufiger werden Vorhofverschlusssysteme zur Thromboembolieprophylaxe bei Vorhofflimmern kathetergestützt eingesetzt [48]. Die beiden derzeit am häufigsten interventionell implantierten Systeme sind Watchman bzw. die neue Generation Watchman FLX (Boston Scientific, Marlborough, USA) sowie Amplatzer Amulet (Abbott, Chicago, USA; [49, 50]). Die Verschlusssysteme bestehen in der Regel aus Nitinol [12], das elastische Eigenschaften und Formgedächtnis ermöglicht. Die interventionellen Okkluder-Systeme wurden als „MR conditional“ eingestuft. Eine MRT-Untersuchung kann sofort nach Implantation durchgeführt werden. Artefakte können die Beurteilung der kardialen Strukturen in Nachbarschaft des Devices (z. B. Pulmonalvenen vor einer Pulmonalvenenisolation) ungünstig beeinflussen.

Für das Watchman System gilt die MRT-Tauglichkeit unter folgenden Bedingungen [51]:

- $B_0$ -Feldstärke  $\leq 3$  T
- Maximaler Wert des räumlichen Gradientenmagnetfelds  $\leq 2500$  Gauss/cm
- Ganzkörper-SAR  $\leq 2$  W/kg Körpergewicht bei 15 min MRT-Scanning (entspricht dem normalen Betriebsmodus eines MRT-Systems; zur Einordnung dieser Bedingung: siehe Abschnitt Koronarstents)

Für das Amulet-System gilt die MRT-Tauglichkeit unter folgenden Bedingungen [52]:

- $B_0$ -Feldstärke  $\leq 3$  T
- Maximaler Wert des räumlichen Gradientenmagnetfelds  $\leq 720$  Gauss/cm
- Ganzkörper-SAR  $\leq 3$  W/kg Körpergewicht bei 15 min MRT-Scanning (zur Einordnung dieser Bedingung: siehe Abschnitt Koronarstents)

### PFO-ASD-VSD-Implantate

Bei Patienten mit atrialem oder ventrikulärem Septumdefekt kann ein interventioneller Verschluss mittels kathetergeführter Okkluderimplantation erfolgen. Bei Patienten mit persistierendem Foramen ovale (PFO) und kryptogenem Schlaganfall ist ein interventioneller Verschluss des PFO mit einem Okkludersystem zur Vermeidung eines Rezidivs möglich und die Effektivität durch aktuelle Studien belegt [53].

Es gibt einige unterschiedliche Okkludersysteme von verschiedenen Herstellern. Die Okkluder, die mittlerweile am häufigsten eingesetzt werden, bestehen aus einem nicht-ferromagnetischen Drahtgeflecht aus Nitinol, Titan oder Titanlegierungen (z. B. MP35N [Nickel-Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung; [13]). Diese gelten bei 1,5-T- und 3-T-MRT-Systemen als mindestens „MR conditional“ [54]. Patienten, bei denen ein Okkluder aus diesem Material eingesetzt wurde (z. B. Amplatzer, Occlutech, Helsingborg, Schweden), können direkt nach der Implantation mittels MRT unter Beachtung der definierten Bedingungen untersucht werden.

Okkluder, die auf einer Edelstahlbasis hergestellt wurden (z. B. 316L und 304V), wurden als schwach ferromagnetisch bei 1,5 T und 3 T beschrieben [33, 55]. Patienten mit einem solchen Okkluder sollten mindestens die ersten 6 Wochen nach Implantation nicht in einem MRT-Scanner untersucht werden. Anschließend sorgt die Endothelialisierung für eine ausreichende Stabilität des Implantates [56]. Die MRT-Bildqualität kann in der Nähe des implantierten Okkluders beeinträchtigt sein, dennoch ist meist eine sinnvolle Gesamtbeurteilung möglich [57].

### Sonstige kardiovaskuläre Implantate

Der Reducer (Neovasc, Toronto, Canada) ist ein ballonexpandierbarer, im Koronarvenensinus zu platzierender Stent aus rostfreiem Edelstahl, der bei Patienten mit koronarer Herzerkrankung und therapierefraktärer Angina pectoris eingesetzt werden kann. Der sanduhrförmige Stent führt zu einer Verengung des Koronarvenensinus und konsekutiver Drucksteigerung im myokardialen Kapillarbett mit dem Ziel einer Verbesserung des subendokardialen Blutflusses [58]. Das Gefäßimplantat wird mit Druck an die Gefäßwand gepresst; zusätzlich wirkt die nach Implantation anzunehmende Endothelialisierung einer Torsion und Migration entgegen. Das Implantat wird als „MR conditional“ eingestuft bei 1,5 und 3 T [11, 12].

Das Revivent-TC-System (Bioventrix, San Ramon, USA) dient dem Zweck, akinetische Myokardnarben auszuschließen, die ventrikuläre Geometrie wiederherzustellen und das ventrikuläre Volumen zu reduzieren [59]. Es besteht aus polyesterbeschichteten Titanankerpaaren und wurde als „MR conditional“ bei 1,5 und 3 T eingestuft [11, 12].

### Übersicht von nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten der Kategorie „MR conditional“

Die exakten MRT-Kennzeichnungen werden für jedes Implantat von den Herstellern ausgegeben. Die Informationen können in der Regel den Herstellerwebseiten sowie speziellen Datenbanken (z. B. [www.magresource.eu](http://www.magresource.eu), [www.mrisafety.com](http://www.mrisafety.com)) entnommen werden. Angesichts der Vielzahl der Implantate und der Dynamik der Implantatentwicklung ist es unmöglich, hier eine umfassende tabellarische Übersicht zu geben. Dennoch soll **Tab. 1** zumindest eine Übersicht gängiger kardiovaskulärer Implantate geben, die das Label „MR conditional“ haben. Die detaillierten MRT-Bedingungen müssen den Herstellerinformationen entnommen werden. Implantatgruppen mit hoher Vielfalt (z. B. Koronarstents) erscheinen nicht in der Tabelle.

**Tab. 1** Auswahl nicht-aktiver kardiovaskulärer Implantate der Kategorie „MR (magnetic resonance) conditional“ bei  $\leq 3$  Tesla Magnetfeldstärke. Die dedizierten MRT-Bedingungen müssen den Herstellerinformationen entnommen werden

Kategorie	Produktbezeichnung
Herzchirurgische biologische Herzklappenprothesen	Carpentier-Edwards, Perimount, Intuity (Edwards)
	Hancock, Intact, Mosaic (Medtronic)
	Soprano, Mitroflow (Sorin)
	Biocor, Epic Trifecta (St. Jude Medical)
Herzchirurgische mechanische Herzklappenprothesen	MIRA, Duromedics, TEKNA, Starr-Edwards Kugelventilprothese (Edwards)
	Hall, Advantage, Open Pivot (Medtronic)
	Carbomedics, Bicarbon (Sorin)
	Regent, Masters (St. Jude Medical)
	IMR ETlogix, Geoform, Physio (Edwards)
Herzchirurgische Herzklappenringe	Profile D, Tri-Ad (Medtronic)
	Memo 3D, Carbomedics Annuloflo (Sorin)
	Tailor, Seguin, RSAR (St. Jude Medical)
	IMR ETlogix, Geoform, Physio (Edwards)
Interventionelle Aortenklappenbioprothesen	Cribier-Edwards, Sapien, Sapien XT (Edwards)
	Corevalve, Corevalve Evolut Pro, Corevalve Evolut R (Medtronic)
	Portico (St. Jude Medical)
	Accurate Neo TF/TA (Boston Scientific)
Interventionelle Pulmonalklappenbioprothesen	Melody Transkatheter Pulmonalklappe (Medtronic)
	Sapien XT pulmonic (Edwards)
Interventionelle Mitralklappentherapie	MitraClip, MitraClip NTR, MitraClip XTR, Mitraclip G4 (Abbott Vascular)
	Pascal (Edwards)
	Cardioband (Edwards)
	Carillon (Cardiac Dimensions)
Interventionelle Trikuspidalklappen-Therapie	Pascal (Edwards)
Herzchirurgische LAA-Occluder	TriClip (Abbott Vascular)
Herzchirurgische LAA-Occluder	AtriClip (Atricure)
Interventionelle LAA-Occluder	Watchman und Watchman FLX (Boston Scientific)
	Amplatzer A-mulet (Abbott)
PFO/ASD/VSD-Occluder	Amplatzer PFO/ASD/VSD (Abbott)
	Figulla Flex II PFO/ASD (Occlutech International)
	Gore Cardioform septal occluder (Gore Medical)
	STARFlex Septal Repair (NMT Medical)
	Atrisept II (Cardia)
Sonstiges: Koronarvenensinusstent	Reduce (Neovasc)
Sonstiges: Reduktionsplastik des linken Ventrikels	Revivent TC (Bioventrix)

## Empfehlungen für die Praxis

Um die Sicherheit für Patienten mit nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten, die einer MRT-Untersuchung zugeführt werden, zu gewährleisten, ist es wichtig, die MRT-Tauglichkeit des Implantates vor der MRT-Untersuchung zu prüfen und darauf basierend eine Nutzen-Risiko-Entscheidung zu treffen.

Diese Überprüfung gestaltet sich in der Praxis nicht immer einfach, da dem Patienten und/oder den involvierten Ärzten nicht selten Informationen über das Vorhandensein und die Eigenschaften eines Implantates fehlen. Zusätzlich können Zeitvorgaben im MRT-Betrieb sowie fehlende Erfahrung mit speziellen kardiovaskulären Implantaten Abläufe beeinflussen.

Daher erscheint es sinnvoll, für die Patienten und das medizinische Personal Strukturen zu schaffen, die eine rasche Einordnung der MRT-Sicherheit eines nicht-aktiven kardiovaskulären Implantates erlauben. Auf Patientenseite ist dies neben der Aufklärung über das Vorhandensein eines nicht-aktiven kardiovaskulären Implantates das Mitführen eines Implantatausweises. Für das medizinische Personal sind Nachschlagetabellen (wie in diesem Artikel enthalten) sowie ständig aktualisierte, digitale Datenbanken (wie z.B. [www.magresource.eu](http://www.magresource.eu), [www.mrisafety.com](http://www.mrisafety.com)) oder Internetseiten der entsprechenden Fachgesellschaften (ISMRM, International Society for Magnetic Resonance in Medicine, <https://www.ismrm.org/mr-safety-links>) wichtige Hilfsmittel, die in einer MRT-Einheit vor Ort verfügbar sein sollten.

Im Allgemeinen gilt, dass nicht-aktive kardiovaskuläre Implantate meist „MR safe“ oder „MR conditional“ sind. Im Falle von „MR conditional“ sind die definierten Bedingungen und die Möglichkeit, diese manuell am MRT-Scanner einstellen zu können, zu prüfen. Falls spezielle Maßnahmen ergriffen werden, um die Vorgaben für „MR conditional“ zu erreichen, sollten diese protokolliert werden.

Neben dem Sicherheitsaspekt können nicht-aktive kardiovaskuläre Implantate zu Bildartefakten führen. Diese können in manchen Fällen durch Anpassung der Bildparameter und Einsatz spezieller Pulssequenzen beeinflusst werden. Dieser Aspekt ist jenseits des Inhalts dieser Stellungnahme.

## Fazit

Diese Stellungnahme fasst Informationen und Empfehlungen zum Umgang mit nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten bei MRT-Untersuchungen zusammen und stellt ein Update der ursprünglichen Stellungnahme aus 2015 dar [8]. Die Grundaussagen haben sich im Vergleich zu 2015 nicht geändert.

Es gilt, vor einer MRT-Untersuchung zu prüfen, ob ein nicht-aktives kardiovaskuläres Implantat vorliegt und wie dieses hinsichtlich der MRT-Sicherheit eingestuft wird („MR safe“, „MR conditional“).

## Empfehlungen und Stellungnahmen

„MR unsafe“). Dabei helfen z. B. Patientenausweise, digitale Datenbanken sowie die Übersichtstabelle dieser Stellungnahme weiter.

Die Entscheidung für oder gegen die MRT-Untersuchung folgt schließlich einer individuellen Abwägung von Nutzen und Risiko, wobei im Allgemeinen das Risiko bei den meisten nicht-aktiven kardiovaskulären Implantaten als niedrig eingestuft werden kann.

### Korrespondenzadresse

**Prof. Dr. med. Florian von Knobelsdorff**

KIZ – Kardiologie im Zentrum  
Eisenmannstr. 4, 80331 München, Deutschland  
von-knobelsdorff@kiz-muenchen.de

**Interessenkonflikt.** F. von Knobelsdorff, W. R. Bauer, S. Busch, I. Eitel, C. Jensen, N. Marx, M. Neizel-Wittke, U. K. Radunski, A. Schuster und A. Rolf geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

### Literatur

- Mühlenweg M, Schaefers G (2015) MR implant labelling and its use in clinical MRI practice. *Radiologe* 55:682–690
- Schaefers G (2019) Test methods to determine magnetic resonance (MR) safety and MR image compatibility of implants/devices. *Radiologe* 59:875–884
- EN IEC 60601-2-33 (2010) Medical electrical equipment – Part 2–33: Particular requirements for the basic safety and essential performance of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. IEC, Geneva
- DIN 6876:2019-05 (2019) Operation of medical magnetic resonance systems. German Institute for Standardization, Berlin
- IEC 62570 (2014) Standard practice for marking medical devices and other items for safety in the magnetic resonance environment. IEC, Geneva
- Sommer T, Bauer W, Fischbach K, Kolb C, Luechinger R, Wiegand U et al (2017) MR-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren. Konsensuspapier der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) und der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG). *Kardiologie* 11:97–113
- von Knobelsdorff F, Bauer W, Deneke T, Fleck E, Rolf A, Schulz-Menger J et al (2019) Empfehlungen zu kardialen MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren. *Kardiologie* 13:75–86
- Müllerleile K, Kolb C, Rittger H, Rybak K, Tillmanns C, Wiegand U et al (2015) Passive kardiovaskuläre Implantate in der Magnetresonanztomographie. Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie – Herz- und Kreislaufforschung zur Sicherheit der Magnetresonanztomographie. *Kardiologie* 9:303–309
- Mühlenweg M, Schaefers G, Trattning S (2015) Physical interactions in MRI: some rules of thumb for their reduction. *Radiologe* 55:638–648
- Schick F (2019) MRI-Interactions with magnetically active and electrically conductive material. *Radiologe* 59:860–868
- Shellock FG (2020) Reference manual for magnetic resonance safety, implants, and devices: 2020 edition
- MRI Safety (2021) Webpräsenz. <http://www.mrisafety.com>. Zugegriffen: 30 Nov 2020
- Levine GN, Gomes AS, Arai AE, Bluemke DA, Flamm SD, Kanal E et al (2007) Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiovascular devices: an American Heart Association scientific statement from the Committee on Diagnostic and Interventional Cardiac Catheterization, Council on Clinical Cardiology, and the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention: endorsed by the American College of Cardiology Foundation, the North American Society for Cardiac Imaging, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *Circulation* 116:2878–2891
- Beshchasna N, Saqib M, Kraskiewicz H, Wasyluk Ł, Kuzmin O, Duta OC et al (2020) Recent advances in manufacturing innovative stents. *Pharmaceutics* 13:349
- Gerber TC, Fasseas P, Lennon RJ, Valeti VU, Wood CP, Breen JF et al (2003) Clinical safety of magnetic resonance imaging early after coronary artery stent placement. *J Am Coll Cardiol* 42:1295–1298
- Porto I, Selvanayagam J, Ashar V, Neubauer S, Banning AP (2005) Safety of magnetic resonance imaging one to three days after bare metal and drug-eluting stent implantation. *Am J Cardiol* 96:366–368
- Shellock FG (2017) Guidelines for the management of patients with coronary artery stents referred for MRI procedures
- Watanabe AT, Teitelbaum GP, Gomes AS, Roehm JO (1990) MR imaging of the bird's nest filter. *Radiology* 177:578–579
- Kiproff PM, Deeb ZL, Contractor FM, Khoury MB (1991) Magnetic resonance characteristics of the LGM vena cava filter: technical note. *Cardiovasc Intervent Radiol* 14:254–255
- Kim D, Edelman RR, Margolin CJ, Porter DH, McArdle CR, Schlam BW et al (1992) The Simon nitinol filter: evaluation by MR and ultrasound. *Angiology* 43:541–548
- Grassi CJ, Matsumoto AH, Teitelbaum GP (1992) Vena caval occlusion after Simon nitinol filter placement: identification with MR imaging in patients with malignancy. *J Vasc Interv Radiol* 3:535–539
- Bartels LW, Bakker CJ, Vieregger MA (2002) Improved lumen visualization in metallic vascular implants by reducing RF artifacts. *Magn Reson Med* 47:171–180
- Liebman CE, Messersmith RN, Levin DN, Lu CT (1988) MR imaging of inferior vena caval filters: safety and artifacts. *AJR Am J Roentgenol* 150:1174–1176
- Slesnick TC, Schreiber J, Soriano BD, Kutty S, Nutting AC, Kim DW et al (2016) Safety of magnetic resonance imaging after implantation of stainless steel embolization coils. *Pediatr Cardiol* 37(1):62–67
- Shellock FG, Detrick MS, Brant-Zawadski MN (1997) MR compatibility of Guglielmi detachable coils. *Radiology* 203:568–570
- Marshall MW, Teitelbaum GP, Kim HS, Deveikis J (1991) Ferromagnetism and magnetic resonance artifacts of platinum embolization microcoils. *Cardiovasc Intervent Radiol* 14:163–166
- Hartman J, Nguyen T, Larsen D, Teitelbaum GP (1997) MR artifacts, heat production, and ferromagnetism of Guglielmi detachable coils. *AJNR Am J Neuroradiol* 18:497–501
- Hennemeyer CT, Wicklow K, Feinberg DA, Derdeyn CP (2001) In vitro evaluation of platinum Guglielmi detachable coils at 3 T with a porcine model: safety issues and artifacts. *Radiology* 2019:732–737
- Shellock FG, Gounis M, Wakhloo A (2005) Detachable coil for cerebral aneurysms: in vitro evaluation of magnetic field interactions, heating, and artifacts at 3 T. *AJNR Am J Neuroradiol* 26:363–366
- Shellock FG (2019) Guidelines for the management of patients with vascular access ports referred for MRI procedures
- Shellock FG, Morisoli SM (1994) Ex vivo evaluation of ferromagnetism, heating, and artifacts produced by heart valve prostheses exposed to a 1.5-T MR system. *J Magn Reson Imaging* 4:756–758
- Walsh EG, Brott BC, Johnson VY, Venugopalan R, Anayiotos A (2008) Assessment of passive cardiovascular implant devices for MRI compatibility. *Technol Health Care* 16:233–245
- Shellock FG (2002) Biomedical implants and devices: assessment of magnetic field interactions with a 3.0-Tesla MR system. *J Magn Reson Imaging* 16:721–732
- Shellock FG (2001) Prosthetic heart valves and annuloplasty rings: assessment of magnetic field interactions, heating, and artifacts at 1.5 T. *J Cardiovasc Magn Reson* 3:317–324
- Shellock FG, Crues JV (2004) MR procedures: biologic effects, safety, and patient care. *Radiology* 232:635–652
- Edwards MB, Ordidge RJ, Hand JW, Taylor KM, Young IR (2005) Assessment of magnetic field (4.7 T) induced forces on prosthetic heart valves and annuloplasty rings. *J Magn Reson Imaging* 22:311–317
- Edwards MB, Ordidge RJ, Thomas DL, Hand JW, Taylor KM (2002) Translational and rotational forces on heart valve prostheses subjected ex vivo to a 4.7-T MR system. *J Magn Reson Imaging* 16:653–659
- Hassler M, Le Bas JF, Wolf JE, Contamin C, Waksman B, Coulomb M (1986) Effects of the magnetic field in magnetic resonance imaging on 15 tested cardiac valve prostheses. *J Radiol* 67:661–666
- Prasad SK, Pennell DJ (2004) Safety of cardiovascular magnetic resonance in patients with cardiovascular implants and devices. *Heart* 90:1241–1244
- Pruefer D, Kalden P, Schreiber W, Dahm M, Buerke M, Thelen M et al (2001) In vitro investigation of prosthetic heart valves in magnetic resonance imaging: evaluation of potential hazards. *J Heart Valve Dis* 10:410–414
- Randall PA, Kohman LJ, Scalzetti EM, Szeverenyi NM, Panicek DM (1988) Magnetic resonance imaging of prosthetic cardiac valves in vitro and in vivo. *Am J Cardiol* 62:973–976
- Condon B, Hadley DM (2000) Potenzial MR hazard to patients with metallic heart valves: the Lenz effect. *J Magn Reson Imaging* 12:171–176
- Edwards MB, McLean J, Solomonidis S, Condon B, Gourlay T (2015) In vitro assessment of the Lenz effect on heart valve prostheses at 1.5 T. *J Magn Reson Imaging* 41:74–82
- Robertson NM, Diaz-Gomez M, Condon B (2000) Estimation of torque on mechanical heart valves due to magnetic resonance imaging including an estimation of the significance of the Lenz effect

- using a computational model. *Phys Med Biol* 45:3793–3807
45. Shellock FG (2019) Guidelines for managing patients with heart valve prostheses and annuloplasty rings with unknown labeling information referred for MRI procedures
  46. Starck CT, Steffel J, Emmert MY, Plass A, Mahapatra S, Falk V et al (2012) Epicardial left atrial appendage clip occlusion also provides the electrical isolation of the left atrial appendage. *Interact CardioVasc Thorac Surg* 15:416–418
  47. AtriCure (2021) Left atrial appendage management. <https://www.atricure.com/atrial-occlusion>. Zugegriffen: 30 Nov 2020
  48. Nentwich K, Ene E, Halbfass P, Sonne K, Berkowitz A, Kerber S et al (2019) Verschluss des linken Herzohrs als therapeutische Alternative. *Kardiologie* 13:161–172
  49. Reddy VY, Doshi SK, Kar S, Gibson DN, Price MJ, Huber K et al (2017) 5-year outcomes after left atrial appendage closure: from the PREVAIL and PROTECT AF trials. *J Am Coll Cardiol* 70:2964–2975
  50. Osmancik P, Tousek P, Herman D, Neuzil P, Hala P, Stasek J et al (2017) Interventional left atrial appendage closure vs novel anticoagulation agents in patients with atrial fibrillation indicated for long-term anticoagulation (PRAGUE-17 study). *Am Heart J* 183:108–114
  51. Boston Scientific (2021) Watchman. <https://www.watchman.com>. Zugegriffen: 30 Nov 2020
  52. Informationen von Abbott Medical GmbH vom 9. Nov. 2020.
  53. Ghanem A, Liebetrau C, Diener HC, Elsässer A, Grau A, Gröschel K et al (2018) Interventioneller PFO-Verschluss. *Kardiologie* 12:415–423
  54. Shellock FG, Valencerina S (2005) Septal repair implants: evaluation of magnetic resonance imaging safety at 3 T. *Magn Reson Imaging* 23:1021–1025
  55. Shellock FG, Morisoli SM (1994) Ex vivo evaluation of ferromagnetism and artifacts of cardiac occluders exposed to a 1.5-T MR system. *J Magn Reson Imaging* 4:213–215
  56. Shellock FG (2014) MRI bioeffects, safety, and patient management. Biomedical Research Publishing Group, Los Angeles
  57. Bock M, Mohrs OK, Voigtlaender T, Kauczor HU, Semmler W (2006) MRT Sicherheitsaspekte und Artefakte von Vorhofseptum-Okkludersystemen bei 1,5 T. *Rof* 178:272–277
  58. Engstrom T, Labinaz M, de Silva R, Schwartz M, Meyten N, Uren NG et al (2015) Efficacy of a device to narrow the coronary sinus in refractory angina. *N Engl J Med* 372:519–527
  59. Wechsler AS, Sadowski J, Kapelak B, Bartus K, Kalinauskas G, Rucinskas K et al (2013) Durability of epicardial ventricular restoration without ventriculotomy. *Eur J Cardiothorac Surg* 44:189–192