

Perfusion und Late-Gadolinium-Enhancement im Kardio-MRT: Durchführung und typische Muster

Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler, Würzburg; PD Dr. med. Djawid Hashemi, MSc, Berlin

Zusammenfassung

Die kardiale Magnetresonanztomografie (CMR) hat das Verständnis und die Diagnostik von Herzkrankheiten revolutioniert, insbesondere durch die Nutzung des Late Gadolinium Enhancement (LGE). Das LGE ermöglicht die Visualisierung eines erweiterten Extrazellulär-raumes, der infolge von Fibrose und Ödembildung entstehen kann. Verschiedene Herz-erkrankungen unterscheiden sich hinsichtlich des LGE-Verteilungsmusters im Myokard, wodurch dieses diagnostisch genutzt werden kann.

Auch die prognostische Aussagekraft des LGE wird zunehmend deutlich. Daher hat die LGE-Beurteilung in neuen Leitlinien zur CMR einen großen Stellenwert. Die Kombination aus LGE und Perfusionsdarstellung ermöglicht eine verbesserte diagnostische und prognostische Beurteilung bei myokardialer Ischämie und hat einen zunehmend großen Stellenwert für die Therapieplanung. Die Aussagekraft dieser Ischämiediagnostik kann durch eine Stresstestung mit Adenosin oder Regadenoson erhöht werden. Die Integration von LGE in die klinische Routine sollte weiter vorangetrieben werden und erfordert eine breitere Verfügbarkeit und Anwendung, um sowohl mehr klinische als auch weitere wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen.

LERNZIELE

Am Ende dieser Fortbildung kennen Sie ...

- ✓ wichtige technische Grundlagen der kardialen Perfusions-Magnetresonanztomografie,
- ✓ die diagnostische und prognostische Bedeutung des Late Gadolinium Enhancements (LGE),
- ✓ diagnostisch wegweisende LGE-Verteilungsmuster anhand praktischer Beispiele,
- ✓ praktische Schritte zur Optimierung der kardialen Ischämiediagnostik durch Kombination von Perfusionsbildgebung, LGE und Stresstestung.

Teilnahmemöglichkeiten

Diese Fortbildung steht als Webinar-Aufzeichnung und zusätzlich als Fachartikel zum Download zur Verfügung. Die Teilnahme ist kostenfrei. Die abschließende Lernerfolgskontrolle kann nur online erfolgen. Bitte registrieren Sie sich dazu kostenlos auf: www.cme-kurs.de

Zertifizierung

Diese Fortbildung wurde nach den Fortbildungsrichtlinien der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz von der Akademie für Ärztliche Fortbildung in RLP mit 2 CME-Punkten zertifiziert (Kategorie D). Sie gilt für das Fortbildungszertifikat der Ärztekammern.

Die erworbenen CME-Punkte werden gemäß § 14 Abs. 4 Diplom-Fortbildungs-Programm der Österreichischen Ärztekammer (DFP) im gleichen Umfang als DFP-Punkte anerkannt.

Fortbildungspartner

Bayer Vital GmbH



EINLEITUNG

Die kardiale Magnetresonanztomografie (englisch „cardiovascular magnetic resonance“, CMR; auf Deutsch auch als Kardio-MRT abgekürzt) hat das Verständnis und die diagnostischen Abläufe verschiedener Herzerkrankungen transformiert, insbesondere durch den Einsatz von Late Gadolinium Enhancement (LGE) zur Gewebecharakterisierung. Zusätzlich wird die prognostische Aussagekraft des LGE zunehmend wichtig, was sich in der wachsenden Anzahl expliziter Empfehlungen in den Leitlinien der letzten Jahre widerspiegelt [1, 2, 3]. Unterschiedliche Herzerkrankungen verursachen unterschiedliche Verteilungsmuster und unterschiedliche Ausmaße von LGE. Daher müssen das Verteilungsmuster und die Gesamtlast von LGE als Risikomarker für jede Herzerkrankung separat betrachtet werden und können nicht verallgemeinert werden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass jede Veränderung der extrazellulären Matrix aufgrund jeglicher Ursache ein potenzieller Ursprung von LGE sein kann. Die gängige Vorstellung, dass LGE gleichbedeutend mit Fibrose und daher mit abgestorbenem Gewebe ist, stellt daher eine zu starke Vereinfachung dar. Die neue Leitlinie der European Society of Cardiology (ESC) für das Management von Kardiomyopathien stützt die neue phänotypische Beschreibung von Kardiomyopathien auf die LGE-basierte Narbenbewertung [1]. Insbesondere bei Kardiomyopathien sind traditionelle Risikofaktoren von begrenzter prognostischer Aussagekraft, da sie keine pathogenetische Korrelation aufweisen. Hingegen wurden die Präsenz, die Lokalisation, das Muster sowie die Ausdehnung des LGE als zuverlässige prospektive Risikomarker für die Entwicklung einer symptomatischen Kardiomyopathie und für Komplikationen etabliert [4]. Die Stress-CMR hat sich in der Koronardiagnostik im Vergleich zur Einzelphotonen-Emissionscomputertomografie als sensitiver erwiesen [5]. Die Stress-CMR ist besonders geeignet für die Untersuchung von Patienten mit bis zu 85%iger Prätestwahrscheinlichkeit für eine stabile ischämische Herzerkrankung sowie für Patienten mit Faktoren, die die alternative Untersuchung erschweren, darunter Frauen (erhöhtes Brustkrebsrisiko durch ionisierende Strahlung [6]), Patienten mit vorheriger Revascularisation sowie Patienten mit linksventrikulärer Dysfunktion. Diese Fortbildung gibt einen Überblick über die Grundprinzipien der Stress-CMR mit LGE, über die Datenlage zu ihrer klinischen Anwendung, die Bewertung der Myokardfunktion und -vitalität mittels LGE und über den Mehrwert der Quantifizierung der Myokardperfusion.

TECHNIKEN IN DER STRESS-KARDIO-MAGNETRESONANZTOMOGRAFIE

Late Gadolinium Enhancement

In der MRT wird üblicherweise an Chelatoren gebundenes Gadolinium als Kontrastmittel (KM) verwendet. Aufgrund seiner paramagnetischen Eigenschaften verkürzt Gadolinium die Relaxationszeit umgebender Protonen, was zu einem verstärkten Kontrast führt [7]. Es werden Gadoliniumchelate verwendet, die sich aufgrund ihrer inertten Eigenschaften im Extrazellulärraum anreichern. Im gesunden Myokard ist aufgrund der hohen Zelldichte und des damit verbundenen geringen Extrazellulärraumes das Volumen, in dem sich Gadolinium verteilt, gering [8]. Bei einer myokardialen Schädigung geht die Zellmembranintegrität verloren, was dazu führt, dass das Kontrastmittel in den zuvor intrazellulären Raum diffundiert. Zusätzlich kommt es zu einem interstitiellen Ödem, das ebenfalls das Verteilungsvolumen erhöht. Bei der Substitution von Kardiomyozyten durch Narbengewebe wird auch das Interstitium erweitert, was ebenfalls zu einer vermehrten Anreicherung des Kontrastmittels führen kann [9–12]. Die gesteigerte Anreicherung in Verbindung mit einer verzögerten Auswaschkinetik führt dazu, dass zehn bis 15 Minuten nach der Gabe des Kontrastmittels das Late Gadolinium Enhancement (LGE) als späte Signalanhebung erfasst wird [13].

Eine definitive Diagnosestellung erfolgt oftmals erst im Follow-up, da eine akute Myokarditis nicht unmittelbar zu einer Narbenbildung führt, sondern erst im späteren Krankheitsverlauf. Der Unterschied zwischen akuter Entzündung und Vernarbung ist allerdings anhand einer einzigen Aufnahme nicht immer sicher beurteilbar. Daher kann auch das LGE nach Abheilen einer Entzündung im weiteren Verlauf nicht mehr nachweisbar sein. Dies muss berücksichtigt werden, da LGE oft fälschlicherweise allein mit der Darstellung von Vernarbung assoziiert wird, was dem Verfahren nicht gerecht wird [14].

Kardio-Stress-MRT und Kardio-Perfusions-MRT

Die kardiale MRT-Untersuchung ermöglicht die Bewertung möglicher Durchblutungsstörungen, entweder als Kardio-Stress-MRT oder als Kardio-Perfusions-MRT. Die Kombination der Kardio-Perfusions-MRT mit LGE ermöglicht eine Ischämiediagnostik, die sowohl die Erfassung der funktionellen Dynamik als auch der Myokardvitalität berücksichtigt [15]. Dies ist bedeutsam für die Risikostratifikation und Therapieplanung, da Personen, die sowohl ein Perfusionsdefizit als auch ein LGE aufweisen, das höchste Risiko für zukünftige Ischämieereignisse aufweisen [16, 17]. In der prognostischen Beurteilung und Therapieplanung lauten die Leitfragen daher: Gibt es Hinweise auf eine Ischämie? Und gibt es Anzeichen für einen irreversiblen Schaden?

Die Perfusionsbildgebung erfolgt in Echtzeit und erlaubt eine quantitative Einschätzung hinsichtlich der Ausdehnung des Perfusionsdefizites. Diese Technik hat sich als wesentlich für die Diagnose der koronaren Herzkrankheit etabliert und spielt eine zunehmend wichtige Rolle im klinischen Alltag [18]. Die kardiale Durchblutung kann sowohl im Ruhezustand als auch unter Stressbelastung untersucht werden, wodurch eine Belastungsischämie aufgedeckt werden kann. Wichtige Indikationen für die Kardio-Perfusions-MRT sind [19]

- Abklärung bei Verdacht auf koronare Herzkrankheit (KHK),
- Beurteilung des Therapieergebnisses nach koronarer Revaskularisierung und
- Bewertung der Vaskularität und Ätiologie von Herztumoren.

Bei der Evaluation des Behandlungsergebnisses nach revaskularisierenden Maßnahmen wird vor allem beurteilt, ob eine Verbesserung des Perfusionsdefizits erreicht werden konnte oder ob zumindest eine Verlangsamung des Fortschreitens der KHK zu beobachten ist. Herztumoren sind ein gutes Beispiel dafür, dass die Perfusionsbildgebung nicht allein für die Koronardiagnostik relevant ist.

Die Stressbildgebung ist von zentraler Bedeutung, wenn es um die Diagnose einer koronaren Minderperfusion geht. Im Gegensatz zur Dobutamin-Stressechokardiografie oder anderen Verfahren, bei denen Dobutamin verabreicht wird, basiert die hier vorgestellte Stressbildgebung auf der Methode der Vasodilatation, was bedeutet, dass primär eine Veränderung der koronaren Perfusion stattfindet und nicht primär eine Überbelastung des Herzens. Dafür werden hauptsächlich zwei Medikamente verwendet: Adenosin, eine Substanz mit kurzer Halbwertszeit, die kontinuierlich infundiert werden muss, und Regadenoson, eine Substanz mit langer Halbwertszeit, die als Bolus verabreicht wird [20]. Die Dosierung von Adenosin erfolgt entsprechend dem Körpergewicht, während Regadenoson unabhängig vom Körpergewicht verabreicht wird. Die Auswahl des Stressprotokolls sollte immer unter Berücksichtigung des individuellen Risikoprofils und der Komorbiditäten der Patienten erfolgen.

Dabei gelten die folgenden Empfehlungen:

Kontrastmitteldosierung

- Perfusion: Die Standarddosis beträgt 0,05 bis 0,1 mmol/kg Körpergewicht.
- Late Gadolinium Enhancement (LGE): Die Standarddosis beträgt 0,1 bis 0,2 mmol/kg Körpergewicht.
- Praxis: Zur Stressperfusion werden 0,05 mmol/kg verabreicht, gefolgt von weiteren 0,05 mmol/kg für die Ruheperfusion. Ein Bolus wird für die LGE verwendet.
- Injektionsgeschwindigkeit: Die Geschwindigkeit beträgt 3 bis 5 ml/s, gefolgt von Kochsalzlösung.
- Timing mit Stressmedikation: Die Koordination erfolgt für eine optimale Bildqualität.

Stressmedikamente

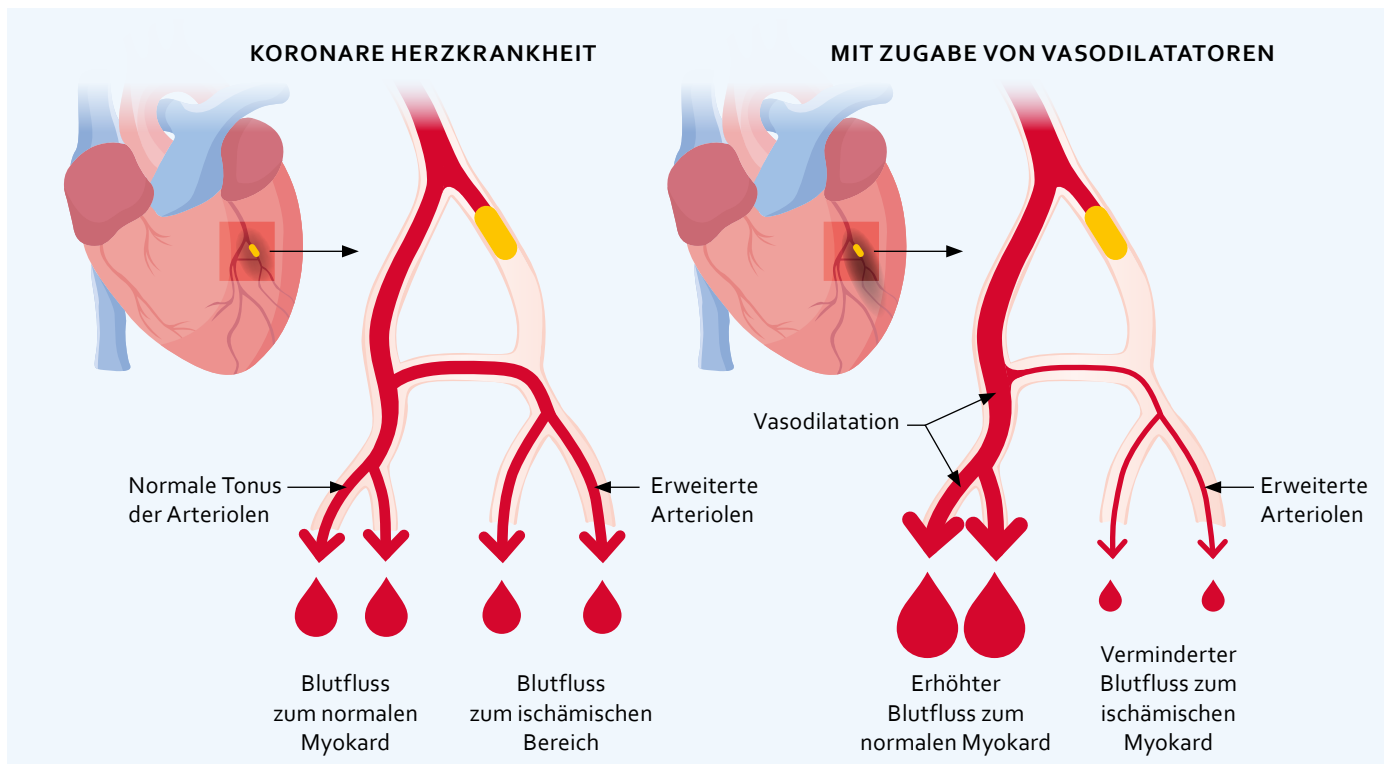
- Adenosin (140 bis 210 µg/kg/Min.) oder Regadenoson (400 µg als Bolus)
- Applikationsmethode:
 - Adenosin wird kontinuierlich über zwei bis vier Minuten infundiert (bis zu einem Anstieg der Herzfrequenz um 10/Min. oder einem Blutdruckabfall um 10 mmHg; andernfalls höhere Dosis in Betracht ziehen).
 - Regadenoson wird als Bolus verabreicht.
- Patientenvorbereitung: Nüchternheit, Verzicht auf Koffein, Aufklärung über den Ablauf der Prozedur
- Sicherheitsvorkehrungen: Bereitstellung von Notfallausrüstung, Überwachung der Vitalzeichen

Sowohl Adenosin als auch Regadenoson können zur Bronchokonstriktion führen und müssen daher bei Patienten mit obstruktiven Ventilationsstörungen (chronisch obstruktive Lungenerkrankung, Asthma bronchiale) mit Vorsicht gegeben werden [21].

Die Verabreichung der Substanzen verläuft folgendermaßen: Ein hypothetisches Bild von zwei Koronararterien, eine ohne Stenose und die andere mit Stenose, wird betrachtet. Die Durchblutung ist in beiden Bereichen in Ruhe nur geringfügig unterschiedlich. Bei Vasodilatation im gesunden Gefäß erfolgt eine deutliche Zunahme des Blutflusses, während im stenosierten Gefäß keine signifikante Mehrdurchblutung beobachtet wird. Dadurch wird der Unterschied zwischen den beiden Gefäßen darstellbar, was die Ischämie im stenosierten Bereich bestätigt (■ **Abb. 1**).

Beurteilung der Reversibilität

Wenn sich Myokardschäden oder Perfusionsdefizite in der Bildgebung als reversibel darstellen, zeigt dies das Potenzial für präventive Maßnahmen auf. Wenn irreversible Schädigungen erkennbar sind, ist eher eine aggressivere Therapie erforderlich. Die Bildgebung kann also den Behandlungsansatz entscheidend lenken. Zur Beurteilung der Reversibilität wird in der Kardio-Perfusions-MRT zunächst etwa die Hälfte der Kontrastmitteldosis verabreicht. Zuerst wird die Stressbildgebung durchgeführt. Anschließend wird die andere Hälfte des Kontrastmittels für die Ruhebildgebung und für die Perfusionsdarstellung verwendet. Falls keine separate Ruheperfusion durchgeführt wird, wird der restliche Bolus unmittelbar nach der Stressbildgebung verabreicht. Dies verkürzt die Wartezeit bis zur Durchführung der LGE-Bildgebung. Die Injektionsgeschwindigkeiten werden vorher festgelegt, sodass der Bolus des Kontrastmittels sofort verabreicht wird. Das Timing muss entsprechend mit der Stressmedikation abgestimmt sein. Die Patienten



müssen währenddessen sorgfältig überwacht werden, einschließlich Messung der Herzfrequenz. Dabei sollten die Untersuchenden neben den Patienten stehen, die sich zu diesem Zeitpunkt noch außerhalb des MRT-Gerätes befinden. Die Kontrastmittelgabe und die Bildaufnahme für die Perfusion erfolgen erst, wenn die Zielbereiche erreicht sind, wie beispielsweise ein angemessener Anstieg der Herzfrequenz. Die Perfusion mit Adenosin dauert in der Regel zwei bis vier Minuten, abhängig von der Reaktion des Patienten. Wenn kein Anstieg der Herzfrequenz zu beobachten ist, kann alternativ der Blutdruckabfall den richtigen Zeitpunkt für die Untersuchung anzeigen [22].

Bei Regadenoson ist es nicht erforderlich, neben dem Patienten zu stehen. Der Patient kann sich bereits in das MRT-Gerät begeben, während das Medikament verabreicht wird. Die Herzfrequenz wird am Monitor überwacht; wenn sie ausreichend angestiegen ist, wird mit der Kontrastmittelgabe und den Bildaufnahmen begonnen. Für das praktische Management gilt: Bei der Verwendung von Adenosin ist ein zweiter venöser Zugang erforderlich, um beide Substanzen gleichzeitig verabreichen zu können. Bei Regadenoson ist dies nicht notwendig. Der Patient muss immer entsprechend für die Untersuchung vorbereitet sein. Beide Substanzen wirken an derselben Rezeptorstelle wie Koffein und andere Methylxanthine. Daher sollten die Patienten vor der Untersuchung auf Kaffee, Tee und dunkle Schokolade verzichten. Generell sollten die Patienten nüchtern zur Untersuchung erscheinen. Sie können aber ihre üblichen Medikamente mit einem Schluck Wasser weiter einnehmen. Anders als bei Stresstests unter Verwendung von Dobutamin müssen Betablocker für die Kardio-Stress-MRT mit Adenosin und Regadenoson nicht pausiert werden. Obwohl das Risiko als gering zu bewerten ist [22], sollte man immer auf einen medizinischen Notfall vorbereitet sein. Daher ist eine kontinuierliche Überwachung der Vitalzeichen sowie die Bereitstellung eines Notfallsets mit einem Defibrillator erforderlich. Nach der Erfassung der Standardbilder und einer ersten Analyse der Herzfunktion wird die Stressperfusion durchgeführt. Wenn während der Stressperfusion ein Perfusionsdefizit festgestellt wird und keine Ruheperfusion erforderlich ist oder kein Hinweis auf ein Artefakt vorliegt, wird das Kontrastmittel sofort verabreicht. Wenn eine Ruheperfusion durchgeführt werden soll, werden zusätzliche Sine-Aufnahmen, wie beispielsweise in der kurzen

Abbildung 1

Prinzip der diagnostischen Nutzung der Vasodilatation zur Ischämiediagnostik in der CMR-Diagnostik

Achse, durchgeführt. Nachdem die Wirkung des Stressmedikaments abgeklungen ist, wird das Kontrastmittel für die Ruheperfusion verabreicht. Anschließend wird gewartet, um genügend Zeit für die Durchführung der LGE-Bildgebung zu haben.

KLINISCHE BEISPIELE

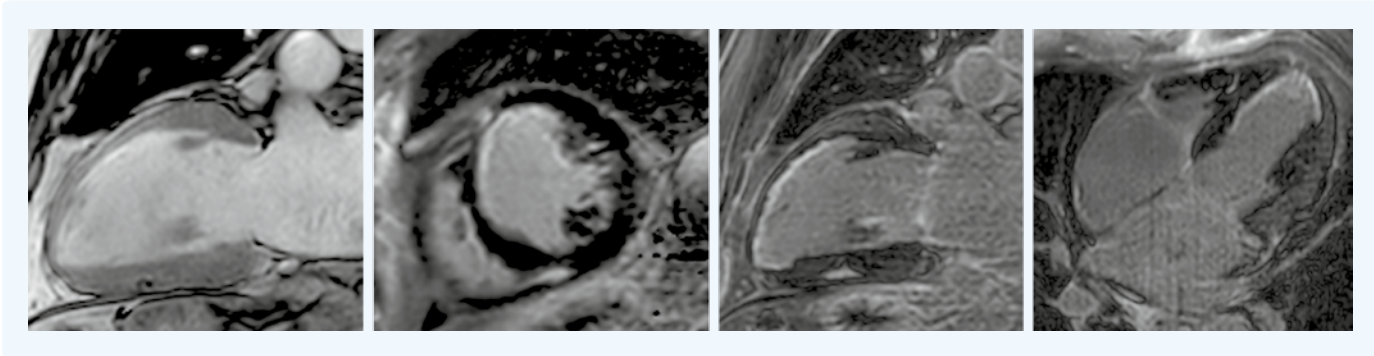
Früherkennung oder Risikostratifizierung des akuten Koronarsyndroms

Wie bereits erwähnt, sind Perfusion und LGE komplementäre Untersuchungsmodalitäten, die immer gemeinsam betrachtet werden sollten, insbesondere bei der Abklärung einer KHK. Es besteht ein diagnostisches Kontinuum, und die gewonnenen Befunde beeinflussen direkt die Behandlung. Die Gewebevernarbung muss stets in Bezug auf das Perfusionsdefizit betrachtet werden. Wenn das Perfusionsdefizit größer ist als der Bereich der Narbe, liegt ein reversibler Schaden vor, der gezielt behandelt werden kann. Auf dieser Grundlage können individuelle Behandlungsstrategien entwickelt werden, um eine maßgeschneiderte Versorgung der Patienten zu gewährleisten.

Myokardischämie

Zur Beurteilung einer Myokardischämie werden typischerweise Inversion-Recovery-Techniken verwendet, im Gegensatz zur konventionellen Spin-Echo-Sequenz, bei der es sich empfiehlt, einen zusätzlichen 180-Grad-Impuls voranzustellen, um alle Spins einmal zu invertieren. Die Wahl der Inversionszeit (englisch Inversion Time, TI) erfolgt so, dass ein optimaler Kontrast zwischen Blutpool, Herzmuskel und Narbe erzielt wird. Idealerweise wird auch eine Fettsättigung durchgeführt, um den Kontrast weiter zu steigern. Bei erfolgreicher Umsetzung dieser Schritte wird die Narbe deutlich sichtbar, insbesondere bei stark ausgeprägten Fällen wie bei Zustand nach Myokardinfarkt. Alternativ gibt es andere Sequenzen, wobei die „phase-sensitive inversion recovery“-Sequenz (PSIR) wahrscheinlich die bekannteste ist. Diese nutzt Phaseninformationen zur Generierung der Bildinformationen und ist weniger abhängig von einer optimalen Wahl der TI. Dennoch ist für eine optimale Nutzung eine gewisse Erfahrung erforderlich. Ein Nachteil ist jedoch die etwas geringere räumliche Auflösung. Die Wahl der optimalen TI ist entscheidend und wird mittels der sogenannten „look locker“-Sequenz durchgeführt. Dabei werden verschiedene T1en aufgenommen, um den besten Kontrast zwischen Narbe, Blut und Myokard zu ermitteln. Die TI muss dann bei der Akquisition der LGE-Sequenz am Scanner festgelegt werden. Dies geschieht aufgrund der variablen Gadoliniumkinetik, die sowohl technisch (Sequenzgerät etc.) als auch biologisch bedingt ist. Um bei jedem Patienten einen optimalen Kontrast zu erzielen, muss dies individuell festgelegt werden.

Die ischämische Kardiomyopathie (ICM) ist eine Unterentität der Herzinsuffizienz mit reduzierter Auswurffraktion, bei der ein Missverhältnis zwischen dem Sauerstoffbedarf des Myokards und der vaskulären Sauerstoffversorgung zu reversiblen oder irreversiblen Myokardschäden führt. Die Mehrheit der Patienten mit ICM hat entweder einen Typ-I-Myokardinfarkt aufgrund einer Plaqueruptur und Thrombusbildung in den epikardialen Leitgefäßen oder einen Typ-II-Myokardinfarkt erlebt, der durch Vasospasmus, mikrovaskuläre Dysfunktion, nicht arteriosklerotische Koronardissektion oder regionale nicht obstruktive relative Ischämie verursacht wird. Dies ist nach wie vor die vorherrschende Ursache für Herzinsuffizienz weltweit [23, 24, 25]. Die typische Verteilung von subendokardialem LGE, die einem Koronararterienterritorium entspricht, identifiziert eine ischämische Narbe, wobei die Transmuralität die verbleibende Vitalität widerspiegelt (■ **Abb. 2**) [26].



Myokarditis und Perikarditis

Patienten, bei denen der Verdacht auf Myokarditis besteht, zeigen vielfältige klinische Symptome, was die Diagnostik und das klinische Management erschwert. Obwohl virale Infektionen die Hauptursache für Myokarditis darstellen, kann sie auch durch andere Faktoren, allen voran durch bestimmte Medikamente, verursacht sein. Die CMR-Diagnostik hat insbesondere während der Pandemiezeit im Zusammenhang mit der COVID-19-assoziierten Myokarditis an Bedeutung gewonnen [27, 28, 29]. Wenn im Myokard kein Kontrastmittel zu sehen ist, deutet dies auf eine gestörte Gadoliniumkinetik hin. Dies tritt in der Regel in zwei Fällen auf: erstens, wenn das Gadolinium im Blutpool verbleibt, was typisch für die Amyloidose ist. Hier lagert es sich im Körper ab und wird so stark umverteilt, dass nach 15 Minuten kein Kontrastmittel mehr im Blutpool vorhanden ist. Zweitens kann dies auch bei Myokarditiden auftreten, insbesondere bei solchen mit systemischer Begleitentzündung. Neue Techniken wie die Dark-Blood-LGE und 3-D-Techniken können erheblich zur Verbesserung des Kontrastes beitragen. Die Dark-Blood-Technik ist besonders nützlich, da sie eine bessere Differenzierung zwischen subendokardialen Enhancement und dem Blutpool ermöglicht. Durch die Vergrauung des Blutpools wird eine deutlich verbesserte Unterscheidung ermöglicht. Diese Sequenzen sind mittlerweile gängige Anwendungen, die mit wenigen Anpassungen am Scanner umgesetzt werden können [30]. Nach mindestens zehn Minuten Wartezeit nach Kontrastmittelgabe kann mit der Bildgebung begonnen werden. Eine Ausnahme bilden Fälle mit Verdacht auf kardiale Amyloidose, bei denen eine andere Gadoliniumkinetik vorliegt. In solchen Fällen ist es ratsam, die Bildgebung früher durchzuführen, idealerweise nach fünf Minuten, um eine bessere Chance auf die Erfassung des Kontrastmittels zu haben. Falls keine klaren Ergebnisse vorliegen, kann die Bildgebung nach weiteren zehn bis 15 Minuten erneut erfolgen. Die entsprechenden Leitlinien geben detaillierte Empfehlungen, einschließlich anderer Bildgebungsmodalitäten wie Mapping und Sine-Bildgebung. Bei einer Perimyokarditis ist es oft schwierig zu bestimmen, ob die Entzündung im Perikard beginnt und sich dann auf das Myokard ausbreitet oder umgekehrt. Es gibt wahrscheinlich viele Variationen dieses Prozesses. Das Vorliegen einer Entzündung wird durch solche Befunde jedoch häufig angedeutet. Manchmal liegen auch fokale Entzündungsherde vor. Wenn diese bei der anschließenden Biopsie nicht getroffen werden, kann dies zu falsch negativen Befunden führen. Die CMR hat weitgehend die endomyokardiale Biopsie, den Goldstandard der Diagnose, ersetzt, und eine ausgedehnte LGE hat sich als prädiktiver Risikofaktor für eine ungünstige Prognose erwiesen [31]. Sinnvoll ist eine Ergänzung durch T2-STIR-Sequenzen und T2-Mapping. Diese Techniken sind sehr sensitiv in der Erkennung eines Myokardödems, das typischerweise im Rahmen einer akuten Myokarditis auftritt. Myokarditis zeigt häufig ein fleckiges, subepikardiales Muster von LGE, vorwiegend in der basalen inferolateralen Wand, obwohl auch andere Lokalisationen möglich sind (■ **Abb. 3**).

Abbildung 2

Subendokardiales LGE bei Myokardischämie

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler

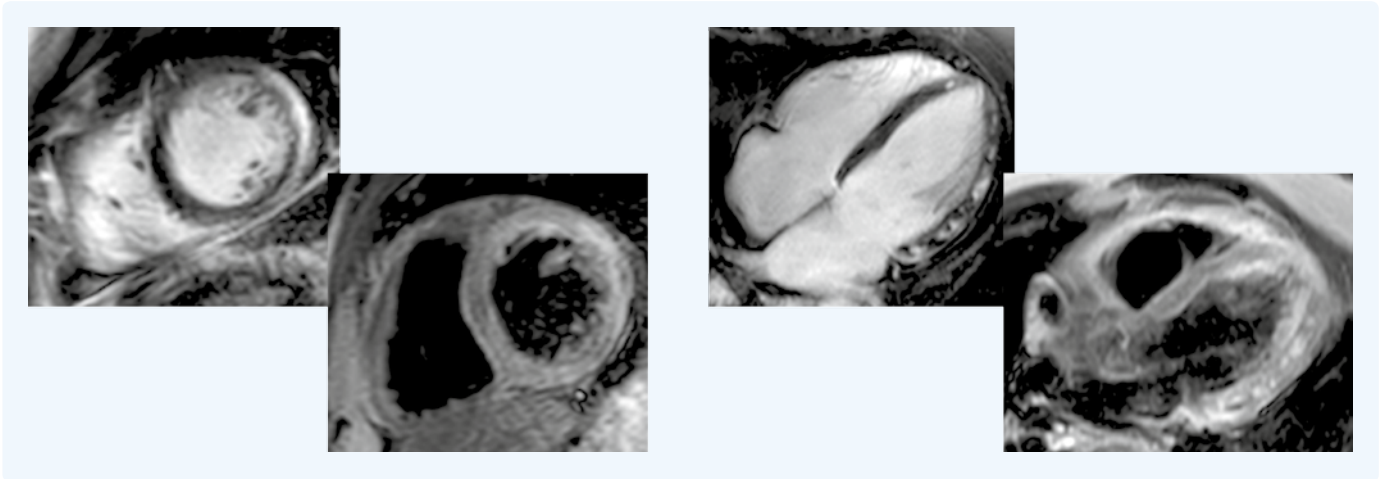


Abbildung 3

Subepikardiales und fleckiges LGE charakteristisch für eine Myokarditis

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler

Im Rahmen einer Perikarditis ist das entzündliche Ödem im Perikard sowohl in der T2-Bildgebung als auch im LGE deutlich erkennbar (■ **Abb. 4**). In der Regel geht eine Perikarditis auch mit einer Beteiligung des Myokards einher, die jedoch möglicherweise in der Bildgebung nicht sichtbar ist. Darüber hinaus kann es zu einem intramyokardialen oder intramuralen LGE kommen.

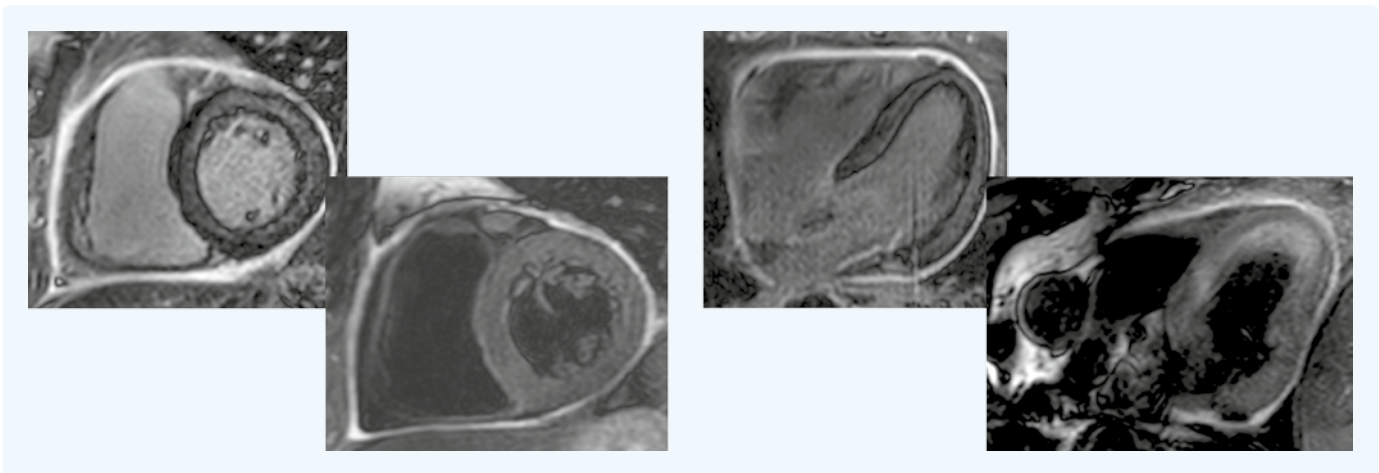


Abbildung 4

Perikardiales LGE bei Perikarditis

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler

Sarkoidose

Die Sarkoidose ist eine entzündliche, granulomatöse Erkrankung unbekannter Ursache, die hauptsächlich durch Befall der Lunge und der mediastinalen Lymphknoten gekennzeichnet ist. Eine Beteiligung des Herzens wird bei 10 bis 25 % aller Sarkoidosepatienten gefunden und kann auch in Einzelfällen isoliert auftreten. Die Beteiligung des linken ventrikulären Myokards und des Reizleitungssystems ist vorherrschend, sodass sich die betroffenen Patienten klinisch oft mit Herzrhythmusstörungen und/oder Herzinsuffizienzsymptomen vorstellen. Granulome zeigen häufig ein auffälliges LGE, das vielfältige Muster aufweisen kann. Oft findet sich ein multifokales, fleckiges Verteilungsmuster (■ **Abb. 5**). Obgleich eine kardiale Sarkoidose relativ selten auftritt, ist es wichtig, daran zu denken, da effektive Behandlungsmöglichkeiten existieren und eine korrekte Diagnosestellung daher prognostisch entscheidend sein kann. Bei entsprechendem Verdacht sollte eine zusätzliche nuklearmedizinische Bildgebung in Betracht gezogen werden.

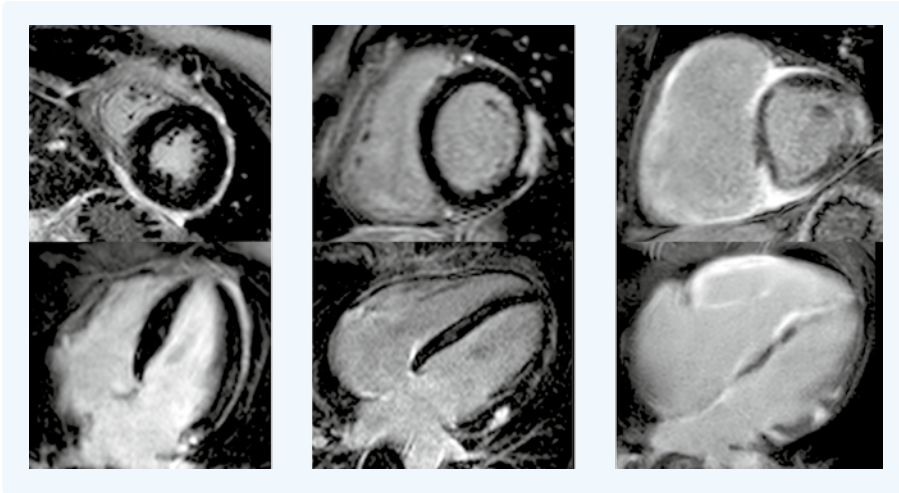
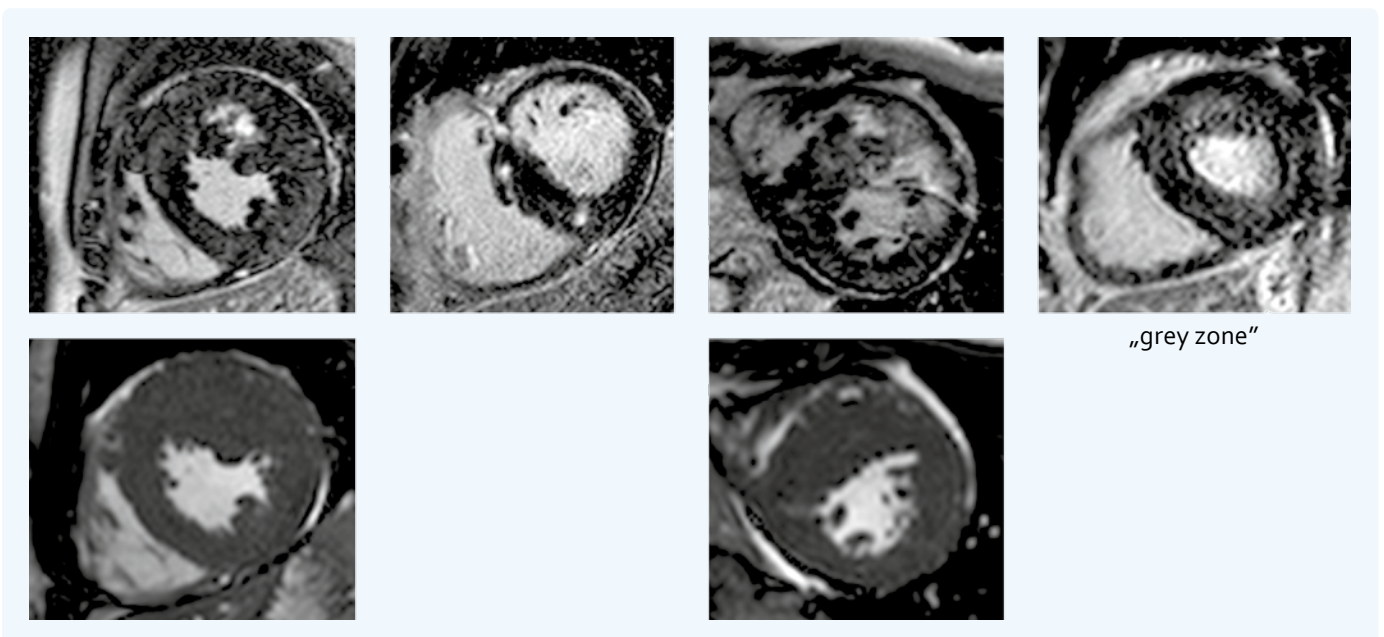


Abbildung 5
Multifokales, fleckiges Verteilungsmuster des LGE bei kardialer Sarkoidose
freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler

Hypertrophe Kardiomyopathie

Der klassische Phänotyp der hypertrophen Kardiomyopathie (HCM) ist eine fokale, asymmetrische Septumhypertrophie mit hypertropher obstruktiver Kardiomyopathie (HOCM) oder ohne Obstruktion des Ausflusstraktes, verursacht durch eine autosomal dominante Mutation in den Sarcomer-Genen, die mit einer Prävalenz von etwa 1:350 auftritt [32]. Das LGE bei HCM deutet auf eine Fibrose hin, die gesundes Herzmuskelgewebe ersetzt. Die prognostische Bedeutung dieses Befundes ist gut etabliert. Es wird bei >50 % der HCM-Patienten beobachtet und zeigt sich typischerweise als mittelschichtiges Muster innerhalb der am stärksten hypertrophierten Segmente sowie an den Eintrittspunkten des rechten Ventrikels [33]. In den fortgeschrittenen Stadien der Erkrankung kann LGE mit transmuraler Ausdehnung beobachtet werden, was eine schlechtere Prognose bedeutet, da das Ausmaß von LGE konsistent mit einer erhöhten Inzidenz von plötzlichem Herztod korreliert [34]. Nicht eindeutig interpretierbare LGE-Muster in Zusammenhang mit der HCM-Diagnostik werden auch als „grey zone“-Areale bezeichnet, was sich sowohl auf die graue Farbe als auch auf die fehlende Eindeutigkeit des Befundes bezieht (■ Abb. 6).

Abbildung 6
Intramyokardiales/intramurales LGE charakteristisch für die hypertrophe Kardiomyopathie
freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler



Weitere Herzerkrankungen

Der Morbus Fabry ist eine X-chromosomal rezessive lysosomale Speicherkrankheit. Die Erkrankung führt zu einer kardialen Hypertrophie, die auf der intrazellulären Akkumulation von Glykosphingolipiden und der daraus resultierenden Hypertrophie von Kardiomyozyten beruht. Der kardiale Befund bei Morbus Fabry ist durch Fetteinlagerungen und Fibrose gekennzeichnet, insbesondere inferolateral. Dies führt zu einer nicht kompakten Myokardstruktur, was sich in einem ausgeprägten LGE äußert. Die Non-Compaction-Kardiomyopathie ist eine umstrittene diagnostische Entität. Ein ausgeprägtes LGE kann jedoch hinweisend auf diese Diagnose angesehen werden. Die Pumpfunktion des Herzens ist in solchen Fällen in der Regel stark beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der dilatativen Kardiomyopathie (DCM) oftmals eine eingeschränkte Pumpfunktion ohne weitere signifikante strukturelle Veränderungen. Bei genauer Betrachtung sind möglicherweise „mid-wall striae“ erkennbar, eine charakteristische Form des Enhancements im Septum.

Ein ringförmiges Enhancement im subendokardialen Bereich kann auf eine Löffler-Endokarditis hindeuten, eine seltene restriktive Kardiomyopathie. Ein auffälliges LGE in einer Raumforderung könnte auf ein kardiales Fibrom hinweisen. In solchen Fällen ist das LGE diagnostisch entscheidend.

FAZIT

- In den letzten Jahren wurden bedeutende Fortschritte in der CMR-Diagnostik erzielt.
- Das LGE zeigt charakteristische Muster bei verschiedenen Herzerkrankungen und verbessert die CMR-Diagnostik.
- Das LGE-Verteilungsmuster kann bedeutende prognostische und therapeutische Implikationen haben.
- Die Kombination von Perfusions- und LGE-Bildgebung ermöglicht eine umfassende Beurteilung des Herzens.
- Perfusionsbildgebung und LGE können mit einer pharmakologischen Stresstestung kombiniert werden, um die Ischämiediagnostik zu verbessern.
- Hierdurch wird ein diagnostisches Kontinuum geschaffen, das eine präzise Therapieplanung ermöglicht.
- Durch die detaillierte CMR-Bildgebung können maßgeschneiderte Behandlungen für individuelle Patienten entwickelt werden.

LITERATUR

1. Arbelo E et al. 2023 ESC Guidelines for the management of cardiomyopathies. *Eur Heart J* 2023;44:3503–3626
2. Zeppenfeld K et al. 2022 ESC Guidelines for the management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death. *Eur Heart J* 2022;43:3997–4126
3. von Knobelsdorff-Brenkenhoff F et al. Cardiovascular magnetic resonance in the guidelines of the European Society of Cardiology: a comprehensive summary and update. *J Cardiovasc Magn Reson* 2023;25:42
4. Meier C et al. Myocardial Late Gadolinium Enhancement (LGE) in Cardiac Magnetic Resonance Imaging (CMR) – An Important Risk Marker for Cardiac Disease. *J Cardiovasc Dev Dis* 2024;11:40
5. Greenwood JP et al. Cardiovascular magnetic resonance and single-photon emission computed tomography for diagnosis of coronary heart disease (CE-MARC): a prospective trial. *Lancet* 2012;379:453–460
6. Ordovas KG et al. Cardiovascular magnetic resonance in women with cardiovascular disease: position statement from the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR). *J Cardiovasc Magn Reson* 2021;23:52
7. Zhen Z, Xie J. Development of Manganese-Based Nanoparticles as Contrast Probes for Magnetic Resonance Imaging. *Theranostics* 2012;2:45–54
8. Kim RJ et al. Relationship of Elevated ²³Na Magnetic Resonance Image Intensity to Infarct Size After Acute Reperfused Myocardial Infarction. *Circulation* 1999;100:185–192
9. Pennell D. Cardiovascular magnetic resonance. *Heart* 2001;85:581–589
10. Hombach V et al. Die Rolle der Kardio-MRT bei Diagnose und Prognosebeurteilung der Herzinsuffizienz. *Herz* 2011;36:84–93
11. Mahrholdt H et al. Delayed enhancement cardiovascular magnetic resonance assessment of non-ischaemic cardiomyopathies. *Eur Heart J* 2005;26:1461–1474
12. Bourne S et al. Shifting Paradigm from Conventional 2D to 3D-Delayed Gadolinium Enhancement Whole Heart MRI: Implications, Technical Aspects, Applications & Planning. *Am J Cardiovasc Dis Res* 2022;8:1–28
13. Patel AR et al. Stress Cardiac Magnetic Resonance Myocardial Perfusion Imaging. *J Am Coll Cardiol*. 2021;78:1655–1568
14. Liguori C et al. Myocarditis: imaging up to date. *Radiol Med* 2020;125:1124–1134
15. Bernhardt P et al. Combined Assessment of Myocardial Perfusion and Late Gadolinium Enhancement in Patients After Percutaneous Coronary Intervention or Bypass Grafts. *JACC Cardiovasc Imaging* 2009;2:1292–1300
16. Ge Y et al. Prognostic Value of Stress CMR Perfusion Imaging in Patients With Reduced Left Ventricular Function. *JACC Cardiovasc Imaging* 2020;13:2132–2145
17. Kwong RY et al. Cardiac Magnetic Resonance Stress Perfusion Imaging for Evaluation of Patients With Chest Pain. *J Am Coll Cardiol* 2019;74:1741–1755
18. Gotschy A et al. Cardiovascular magnetic resonance for the assessment of coronary artery disease. *Int J Cardiol* 2015;193:84–92
19. Bruder O et al. European cardiovascular magnetic resonance (EuroCMR) registry – multi national results from 57 centers in 15 countries. *J Cardiovasc Magn Reson* 2013;15:9
20. Kramer CM et al. Standardized cardiovascular magnetic resonance (CMR) protocols 2013 update. *J Cardiovasc Magn Reson* 2013;15:91
21. Doukky R, Golzar Y. Regadenoson use in patients with chronic obstructive pulmonary disease: the state of current knowledge. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2014;129
22. Kramer CM et al. Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson* 2020;22:17
23. Del Buono MG et al. Ischemic Cardiomyopathy and Heart Failure After Acute Myocardial Infarction. *Curr Cardiol Rep* 2022;24:1505–1515
24. Cleland JGF, McGowan J. Heart Failure due to Ischaemic Heart Disease: Epidemiology, Pathophysiology and Progression. *J Cardiovasc Pharmacol* 1999;33:517–29
25. Thygesen K et al. Fourth Universal Definition of Myocardial Infarction (2018). *Circulation* 2018;138
26. Eichstaedt HW et al. Imaging of acute myocardial infarction by magnetic resonance tomography (MRT) using the paramagnetic relaxation substance gadolinium-DTPA. *Cardiovasc Drugs Ther* 1989;3:779–788

27. Meier C et al. Serial Cardiovascular Magnetic Resonance Studies Prior to and After mRNA-Based COVID-19 Booster Vaccination to Assess Booster-Associated Cardiac Effects. *Front Cardiovasc Med* 2022;9:877183
28. Drakos S et al. A cardiovascular magnetic resonance imaging-based pilot study to assess coronary microvascular disease in COVID-19 patients. *Sci Rep*.2021;11:15667
29. Chamling B et al. Occurrence of acute infarct-like myocarditis following COVID-19 vaccination: just an accidental co-incidence or rather vaccination-associated autoimmune myocarditis? *Clin Res Cardiol* 2021;110:1850–1854
30. Edelman RR et al. Dark blood cardiovascular magnetic resonance of the heart, great vessels, and lungs using electrocardiographic-gated three-dimensional unbalanced steady-state free precession. *J Cardiovasc Magn Reson* 2021;23:127
31. Gräni C et al. Prognostic Value of Cardiac Magnetic Resonance Tissue Characterization in Risk Stratifying Patients With Suspected Myocarditis. *J Am Coll Cardiol* 2017;70:1964–1976
32. Maron BJ et al. Diagnosis and Evaluation of Hypertrophic Cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol* 2022;79:372–389
33. Chan RH et al. Prognostic Value of Quantitative Contrast-Enhanced Cardiovascular Magnetic Resonance for the Evaluation of Sudden Death Risk in Patients With Hypertrophic Cardiomyopathy. *Circulation* 2014;130:484–495
34. Casas G, Rodríguez-Palomares JF. Multimodality Cardiac Imaging in Cardiomyopathies: From Diagnosis to Prognosis. *J Clin Med* 2022;11:578

Referenten

Univ.-Prof. Dr. med. Bettina Baeßler
Leiterin Kardiovaskuläre Bildgebung und Künstliche Intelligenz
Universitätsklinikum Würzburg
Papa-Straße 3
68723 Schwetzingen

PD Dr. med. Djawid Hashemi, MSc (Oxon.)
Deutsches Herzzentrum der Charité
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Klinik für Kardiologie, Angiologie und Intensivmedizin
Campus Virchow-Klinikum
Augustenburger Platz 1
13353 Berlin

Veranstalter

CME-Verlag – Fachverlag für medizinische Fortbildung GmbH
Siebengebirgsstr. 15
53572 Bruchhausen
redaktion@cme-verlag.de

Fortbildungspartner

Bayer Vital GmbH

Transparenzinformation

Ausführliche Informationen zu Interessenkonflikten und Sponsoring sind online einsehbar unterhalb des jeweiligen Kursmoduls.

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Bildnachweis

Titelbild: Nikolai – stock.adobe.com
Abbildung 1: unter Verwendung von rosadu – stock.adobe.com

CME-Test

Die Teilnahme am CME-Test ist nur online möglich.
Scannen Sie den nebenstehenden QR-Code mit Ihrem Mobiltelefon/Tablet oder gehen Sie auf die Website: www.cme-kurs.de



CME-Fragebogen



Bitte beachten Sie:

- Die Teilnahme am nachfolgenden CME-Test ist nur online möglich unter: www.cme-kurs.de
- Diese Fortbildung ist mit 2 CME-Punkten zertifiziert.
- Es ist immer nur eine Antwortmöglichkeit richtig (keine Mehrfachnennungen).

? Welche Aussage bezüglich der kardialen Magnetresonanztomografie (CMR) und der späten Gadolinium-Anreicherung (LGE) ist richtig?

- Das Verteilungsmuster und die Gesamtlast von LGE sind bei allen Herzerkrankungen identisch.
- LGE tritt nur bei Fibrose auf.
- LGE wird in aktuellen kardiologischen Leitlinien berücksichtigt.
- Traditionelle Risikofaktoren haben bei Kardiomyopathien eine hohe prognostische Aussagekraft im Vergleich zu LGE.
- Die Stress-CMR hat sich in der Koronardiagnostik als weniger sensitiv als die Einzelphotonen-Emissionscomputertomografie erwiesen.

? Welche Aussage bezüglich der Gadolinium-basierten Kontrastmittel (KM) und des „Late Gadolinium Enhancement“ (LGE) in der MRT ist richtig?

- Gadolinium verteilt sich im gesunden Myokard aufgrund des hohen Extrazellularraumes großflächig, was zu einer verstärkten Signalanhebung führt.
- Das LGE tritt unmittelbar nach der Gabe des Kontrastmittels auf.
- Die Anreicherung von Gadolinium im lädierten Myokard erfolgt ausschließlich intrazellulär.
- Das LGE ist das Ergebnis einer verkürzten Relaxationszeit der Protonen im Extrazellularraum.
- Das LGE wird typischerweise zehn bis 15 Minuten nach der Verabreichung des Kontrastmittels erfasst.

? Welche Aussage bezüglich der kardialen MRT-Untersuchung ist falsch?

- Die Kombination der Kardio-Perfusions-MRT mit LGE ermöglicht eine Ischämiediagnostik, die sowohl die funktionelle Dynamik als auch die Myokardvitalität berücksichtigt.
- Die Kardio-Stress-MRT hat keinen Stellenwert in der Diagnostik der koronaren Herzkrankheit.

- Personen, die sowohl ein Perfusionsdefizit als auch ein LGE aufweisen, haben das höchste Risiko für zukünftige kardiale Komplikationen.
- Die Perfusionsbildgebung erfolgt in Echtzeit und erlaubt eine quantitative Einschätzung hinsichtlich der Ausdehnung des Perfusionsdefizits.
- Die kardiale Durchblutung kann sowohl im Ruhezustand als auch unter Stressbelastung untersucht werden.

? Welche Aussage bezüglich der Stressbildung bei der Kardio-Perfusions-MRT ist richtig?

- Die Stressbildung basiert auf der Verabreichung von Dobutamin.
- Die primäre Zielsetzung der Stressbildung ist die Bewertung des Herzzeitvolumens.
- Vasodilatoren werden bei der Stressbildung nicht verwendet.
- Die Dosierung von Regadenoson bei der Stressbildung richtet sich nach dem Körpergewicht.
- Die Stressbildung untersucht auch die Vasodilatation und ermöglicht somit eine Beurteilung der koronaren Perfusion unter Belastung.

? Welche Aussage bezüglich der Durchführung der Kardio-Perfusions-MRT ist richtig?

- Die Kardio-Perfusions-MRT ermöglicht die Beurteilung der Reversibilität von Myokardschäden und Perfusionsdefiziten.
- Die Herzfrequenz muss während der Stressbildung nicht überwacht werden.
- Regadenoson wird während der Stressbildung kontinuierlich infundiert.
- Patienten dürfen vor der Untersuchung Kaffee, Tee und dunkle Schokolade zu sich nehmen.
- Bei der Verwendung von Adenosin für die Stressbildung ist ein einziger venöser Zugang vollkommen ausreichend.

CME-Fragebogen (Fortsetzung)

? Welche Aussage bezüglich der Beurteilung einer Myokardischämie mittels Kardio-MRT ist richtig?

- Die Wahl der optimalen TI (Inversionszeit) wird mittels der Spin-Echo-Sequenz durchgeführt.
- Die „phase-sensitive inversion recovery“-Sequenz (PSIR) ist abhängig von einer optimalen Wahl der TI.
- Die „look locker“-Sequenz wird verwendet, um verschiedene Kontrastzeiten für die Bildgebung zu bestimmen.
- Die subendokardiale Verteilung von LGE identifiziert eine ischämische Narbe.
- Die Ischämische Kardiomyopathie zeigt typischerweise kein auffälliges LGE.

? Welche Aussage bezüglich der Diagnose von Myokarditis und Perikarditis mittels Kardio-MRT ist richtig?

- Der Einsatz der Dark-Blood-Technik führt zu einem schlechteren Gewebekontrast.
- Eine akute Myokarditis zeigt normalerweise noch keine LGE.
- Ein negatives Ergebnis in der endomyokardialen Biopsie schließt eine Myokarditis sicher aus.
- Die T2-STIR-Sequenzen und T2-Mapping sind nicht ausreichend sensitiv, um Myokardödeme bei Myokarditis zu erkennen.
- Bei Perikarditis ist das entzündliche Ödem im Perikard sowohl in der T2-Bildgebung als auch im LGE deutlich erkennbar.

? Welche Aussage bezüglich Sarkoidose und kardialer Beteiligung ist falsch?

- Die Beteiligung des linken ventrikulären Myokards und des Reizleitungssystems ist vorherrschend.
- Eine rein kardiale Sarkoidose kann auch isoliert auftreten, ohne Beteiligung anderer Organe.
- Bei Verdacht auf kardiale Sarkoidose hat die nuklearmedizinische Bildgebung keinen Zusatznutzen.
- Granulome zeigen oft ein auffälliges LGE.
- Es stehen effektive Behandlungsmöglichkeiten für die kardiale Sarkoidose zur Verfügung.

? Welche Aussage bezüglich hypertropher Kardiomyopathie (HCM) und Late Gadolinium Enhancement (LGE) ist falsch?

- Das LGE bei HCM deutet auf eine Fibrose hin, die gesundes Herzmuskelgewebe ersetzt.
- „Grey zone“-Areale deuten auf ein Perfusionsdefizit hin.
- Die prognostische Bedeutung des LGE-Befundes bei HCM ist gut etabliert.
- LGE wird bei >50 % der HCM-Patienten beobachtet.
- In fortgeschrittenen Stadien der HCM kann LGE mit transmuraler Ausdehnung auftreten.

? Welche Aussage bezüglich Late Gadolinium Enhancement (LGE) bei den folgenden Herzkrankungen ist falsch?

- Morbus Fabry zeigt oft ein ausgeprägtes LGE, das auf eine nicht kompakte Myokardstruktur hinweist.
- Bei der Non-Compaction-Kardiomyopathie kann ein ausgeprägtes LGE als Hinweis auf diese Diagnose angesehen werden.
- Die dilatative Kardiomyopathie (DCM) zeigt typischerweise „mid-wall striae“ im Septum im LGE.
- Ein ringförmiges Enhancement im subendokardialen Bereich kann auf eine Löffler-Endokarditis hindeuten.
- Ein auffälliges LGE in einer Raumforderung kann auf ein kardiales Fibrom hinweisen.