

MRT bei interstitiellen Lungenerkrankungen

Was ist möglich?

Die Magnetresonanztomographie (MRT) der Lunge hat sich zu einem vielseitigen „dritten Standbein“ der Lungendiagnostik entwickelt. Mittlerweile kann mithilfe paralleler Bildgebung, Shared-echo-Techniken und rotierender Phasenkodierung eine gute und robuste Bildqualität erreicht werden, sodass die MRT der Lunge bereits für verschiedene klinische Indikationen auf dem Gebiet der Pneumologie empfohlen werden kann. Interstitielle Lungenerkrankungen, bei denen es auf möglichst hohe Detailauflösung ankommt, stellen die größte Herausforderung dar. Hier ist die MRT der CT in der reinen Detailauflösung unterlegen. Andererseits sind es gerade die von der MRT offerierten Zusatzinformationen zu Atemmechanik, Kontrastmitteldynamik sowie Lungenventilation und -perfusion, deren klinischer Wert intensiv diskutiert und beforscht wird.

Stellenwert der MRT

Als nicht strahlenexponierende Methode ist die MRT besonders attraktiv für die Untersuchung von Kindern und Jugendlichen oder auch Schwangeren. In spezialisierten Zentren findet die MRT der Lunge bereits breiten Einsatz bei der Diagnostik der zystischen Fibrose der Lunge sowie bei akuter und chronischer Lungenembo-

lie [1, 2, 3, 4]. Gegenüber anderen Modalitäten wie Röntgen und CT bietet die MRT für diese Indikationen wertvolle Zusatzinformationen über die Atemmechanik (mit dynamischen Cinesequenzen) und über die regionale Lungenperfusion (mit zeitlich hochaufgelösten, dynamischen angiographischen Sequenzen). Für andere Indikationen wie die akute Pneumonie bei Kindern oder Tumorerkrankungen kann die MRT als Alternativverfahren zur Anwendung kommen. Ziel dieses Beitrags ist, den aktuellen Stand der Literatur zur MRT interstitieller Lungenerkrankungen zusammenzufassen und vor dem Hintergrund eigener, umfangreicher Erfahrungen mit der MRT der Lunge zu bewerten.

Technische Aspekte

In der Regel kommen Ganzkörpermagnetresonanztomographen mit einer Feldstärke von 1,5 T und Mehrkanaloberflächenpulen zum Einsatz. Vorteile höherer Feldstärken sind für die Untersuchung der Lunge bisher nicht belegt [5]. Der „Einstieg“ in die MRT der Lunge für neue Anwender wird mit standardisierten Untersuchungsprotokollen erleichtert, die auf ersten Konsensusempfehlungen einer internationalen Gruppe von Anwendern basieren und vonseiten der AG Thorax der Deutschen Röntgengesellschaft bestätigt wurden [6, 7]. Von einigen Herstel-

lern wurden diese Protokolle mittlerweile übernommen und stehen in den aktuellen Protokollisten zur Verfügung. Angepasst an die wesentlichen klinischen Fragestellungen basieren die Protokollempfehlungen jeweils auf einer Auswahl der folgenden Sequenztypen [6, 8]:

- T2-gewichtete Spinechosequenzen mit Half-Fourier- oder Partial-Fourier-Akquisition (T2-HASTE) in koronaler und transversaler Orientierung (Detektion von Infiltraten einschl. Milchglas bzw. Flüssigkeitseinlagerung, typische räumliche Auflösung von ca. 1,8×1,8×5 mm).
- Balanced-steady-state-free-precession(b-SSFP)-Sequenzen in koronaler und transversaler Orientierung (Gefäßdarstellung, Detektion von Infiltraten und soliden Befunden, typische räumliche Auflösung von ca. 2,4×1,6×5 mm).
- T1-gewichtete gespoilte 3-D-Gradientenchesequenzen („gradient-recalled echo“, T1-GRE) mit Volumeninterpolation (VIBE) in koronaler und transversaler Orientierung (Detektion von Noduli und Bronchialwandveränderungen, typische räumliche Auflösung von ca. 1,5×1,5×4 mm).
- T2-gewichtete schnelle (Turbo-)Spinechesequenzen, fakultativ mit Fettunterdrückung, als STIR („short tau inversion recovery“, T2-STIR) oder mit spektraler Fettsättigung (T2-FSE/

Hier steht eine Anzeige.



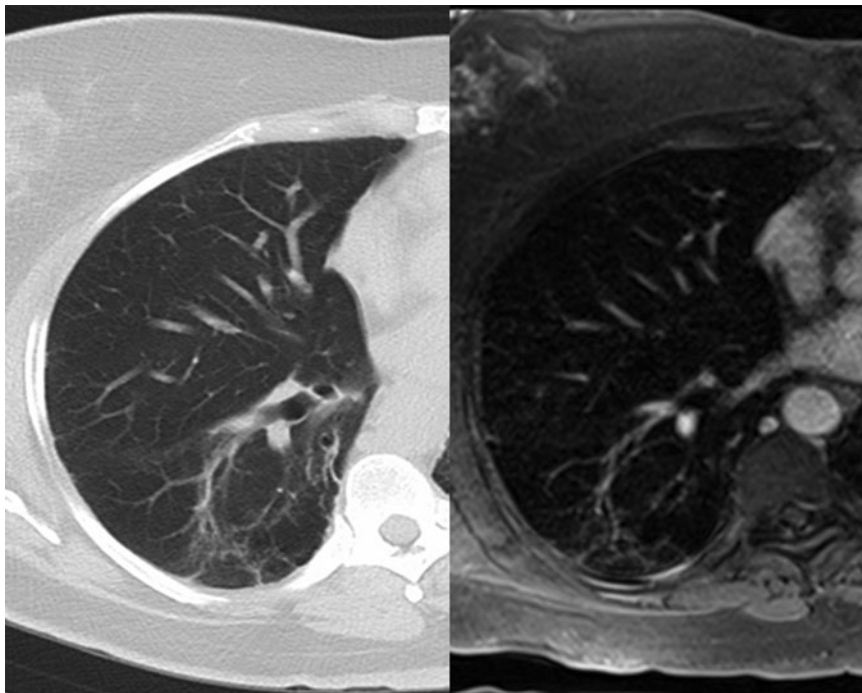


Abb. 1 ▲ Umschriebene Fibrosierung im Segment 6 des rechten Lungenunterlappens. Am Beispiel dieser umschriebenen Fibrosierung wird die geringere Detailauflösung der MRT (*rechts*) im Vergleich zur CT (*links*) deutlich. Größere Retikulationen bleiben abgrenzbar, feinere verschwimmen zu einer Art Milchglasstrübung. Gleichzeitig zeigt dieses Beispiel einer kontrastmittelverstärkten 3-D-Gradientenecho-Sequenz mit Fettsättigung (3-D-GRE/fs) die deutliche Signalanhebung des pathologischen Befundes gegenüber dem intakten Lungengewebe

fs, Detektion pulmonaler Flüssigkeitseinlagerung, mediastinale Lymphknoten, typische räumliche Auflösung von ca. 1,8×1,5×5 mm).

- T1-gewichtete gespoilte 3-D-GRE mit Fettsättigung nach Kontrastmittelgabe in 3 Varianten:
 - in gleicher Art wie die native T1-GRE, aber mit spektraler Fettsättigung und ohne Bolustiming (3-D-GRE/fs),
 - als Pulmonalisangiogramm mit hoher räumlicher Auflösung sowie Bolustiming auf den zentralen K-Raum (typisch 1,2×1×2 mm, koronale Orientierung, Akquisitionszeit ca. 20 s/Atemanhaltephase) und
 - zur zeitlich hochaufgelösten, dynamischen Darstellung der Lungenperfusion (typisch 3,5×2×5 mm, koronale Orientierung, Akquisitionszeit/Lungenvolumen 1,5–2 s).

Die Schichtdicke für 2-D-Akquisitionen liegt idealerweise bei 4–6 mm, für 3-D-Akquisitionen in transversaler Schichtung bei 3–4 mm und für koronare Pulmona-

lisangiographien bei ca. 2 mm. Alle Sequenzen können in Atemanhaltephase durchgeführt werden (10–20 s). Für unkooperative Patienten (u. a. kleine Kinder) können die T2-gewichteten Spinechosequenzen getriggert (mit Atemgurt oder Navigatortriggerung) angewendet werden (für detaillierte Protokollempfehlungen vgl. [6]). In Abhängigkeit von den Signaleigenschaften der Befunde (hohe Signalintensität flüssigkeitshaltiger Läsionen in der T2-gewichteten Bildgebung, Kontrastmittelaufnahme entzündlicher oder maligner Läsionen) liegt der Schwellenwert für die Detektion kleiner nodulärer Befunde mittels MRT bei ca. 3–4 mm [9]. Dieser Wert verdeutlicht auch die Limitationen der MRT bei der Detektion interstitieller Lungenerkrankungen, die durch kleinoduläre Befunde gekennzeichnet sind (z. B. „respiratory bronchiolitis interstitial lung disease“, RB-ILD).

Interstitielle Lungenerkrankungen

Interstitielle Lungenerkrankungen sind gekennzeichnet durch einen initialen entzündlichen Prozess, der im weiteren Verlauf zur Fibrose fortschreiten kann. Die hochauflösende Computertomographie (High-resolution[HR]-CT) erlaubt eine anatomische Kompartimentzuordnung und eine Quantifizierung des Ausmaßes der Veränderungen. Mit dem Nachweis der je nach Erkrankung mehr oder weniger spezifischen Reaktionsmuster des Lungengewebes kann die HRCT wesentlich zur Diagnosefindung beitragen [10]. Zu Anwendungen der MRT für die Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen liegen bisher nur wenige Studien vor, zumal die Thorax-MRT überhaupt erst in jüngerer Zeit eine zumindest ähnliche Detailauflösung wie die CT erreicht hat. Grundsätzlich können drei Anwendungsbereiche für die MRT bei der Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen diskutiert werden (■ **Infobox 1**):

- morphologische Analyse des Lungengewebes mit analoger Anwendung der am CT gewonnenen Erfahrungen zur Mustererkennung;
- Beurteilung der Entzündungsaktivität anhand des nativen Signalverhaltens oder Kontrastmittelaufnahme;
- Effekte der morphologischen Veränderungen auf funktionelle und mechanische Parameter wie Perfusion, Ventilation und Compliance.

MRT zur Mustererkennung

Morphologische MRT-Sequenzen wie T2-gewichtete schnelle Spinechosequenzen (T2-FSE) oder Balanced-steady-state-free precession(b-SSFP)-Sequenzen zeigen typischerweise kein Eigensignal des intakten Lungengewebes. Pathologische Veränderungen, wie sie auch im Rahmen interstitieller Lungenerkrankungen auftreten („air space disease“, „Alveolitis“, fibrotische Verdickung des Interstitiums, Fibrosestränge und Retikulierung) werden aufgrund ihrer höheren Signalintensität mit deutlichem Kontrast zum intakten Lung parenchym dargestellt. Analog zur CT, bei der feinste fibrotische Veränderungen oder Flüssigkeitseinlagerungen/alveolä-

Infobox 1 Denkbare Anwendungen für die MRT bei interstitiellen Lungenerkrankungen

- Morphologische Analyse des Lungengewebes analog zur HRCT zur Mustererkennung (klinisch bereits anwendbar)
- Beurteilung der Entzündungsaktivität anhand des nativen Signalverhaltens oder Kontrastmittelaufnahme (in der präklinischen Evaluation)
- Nachweis funktioneller und mechanischer Veränderungen des Lungparenchyms wie Perfusion, Ventilation und Compliance (in ersten experimentellen Studien)

re Hyperzellularität unterhalb der räumlichen Auflösung der CT als Milchglasstrübung („ground glass opacities“) dargestellt werden, zeigt sich für Veränderungen, die unterhalb der räumlichen Auflösung des MRT liegen, eine verwaschene Signalanhebung ohne Detailauflösung (■ **Abb. 1**).

In der MRT ist die Darstellung verdickter interlobulärer Septen möglich, während intralobuläre retikuläre Muster in der Regel nur als „Milchglasinfiltrate“ darzustellen sind [11]. Ein bronchioläres Verdichtungsmuster („tree-in-bud“) ist aufgrund seines hohen Flüssigkeitsgehalts und hinreichender Größe der einzelnen Befunde in der Regel gut zu identifizieren [11, 12, 13, 14]. Dichtere Befunde, wie Konsolidierungen, Raumforderungen oder Atelektasen sind mit der MRT klar identifizierbar [11, 15, 16]. Ebenso lassen sich andere Befunde mit angehobener Signalintensität klar identifizieren und charakterisieren, wie kurvilineare Bänder und größere Retikulationen (■ **Abb. 2**; [17, 18, 19]). Rajaram et al. [20] konnten an 236 Patienten mit Verdacht auf pulmonalen Hypertonus für SSFP-Sequenzen eine Sensitivität der MRT von 89% und eine Spezifität von 91% zur Detektion der Lungenfibrose demonstrieren. Im Vergleich zur CT zeigte die MRT 75% der Milchglasinfiltrate, 75% der pulmonalen Noduli, 100% der Pleuraergüsse und Konsolidierungen, aber nur 67% der geringen Fibrosen, 67% der Bronchiektasen und nur 16% der Emphysemareale (■ **Abb. 2**).

Insbesondere bei deutlich signalgesteigerten interlobulären Retikulationen und alveolären Flüssigkeitseinlagerungen ist differenzialdiagnostisch immer an eine

Radiologe 2014 · 54:1204–1212 DOI 10.1007/s00117-014-2738-z
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

J. Biederer · M.O. Wielpütz · B.J. Jobst · J. Dinkel

MRT bei interstitiellen Lungenerkrankungen. Was ist möglich?

Zusammenfassung

Hintergrund. Die MRT der Lunge entwickelt sich zu einer ernstzunehmenden dritten Säule der Thoraxdiagnostik neben dem Thoraxröntgen und der Computertomographie (CT). Ihr Wert in der pädiatrischen Lungendiagnostik oder für den wissenschaftlichen Einsatz, insbesondere wenn eine Strahlenexposition vermieden werden soll, ist unbestritten. Von allen Indikationen stellt die Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen die größte Herausforderung dar.

Ziel der Arbeit. Zusammenfassung des aktuellen Stands zu Möglichkeiten und Perspektiven der MRT für die Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen.

Material und Methoden. Zusammenfassung einer aktuellen Literaturrecherche und Bewertung der Ergebnisse vor dem Hintergrund eigener Erfahrungen mit der LungemRT.

Ergebnisse. Allein aufgrund der geringeren Detailauflösung und der deutlich größeren Anfälligkeit für Artefakte ist die MRT der CT bei der Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen („interstitial lung diseases“, ILD) bei feinen Mustern (feinnetzige Fibrose,

Mikronoduli) unterlegen, kann aber gröbere Fibrosen (Honigwabemuster) detektieren. Zudem wurde an kleinen Fallgruppen gezeigt, dass die MRT diagnostisch wertvolle Informationen zur regionalen Lungenfunktion (Ventilation, Perfusion, mechanische Eigenschaften) und Entzündungsaktivität (natives Signal, Kontrastmitteldynamik) liefern kann. **Diskussion.** Aktuell kann die morphologische Lungen-MRT ergänzend zur kardialen Diagnostik bei Sarkoidose für die umfassende kardiotorakale Bildgebung in einer Sitzung oder für Verlaufsbearbeitungen eingesetzt werden. Wenn sich die Möglichkeiten der MRT-basierten Lungenfunktionsdiagnostik und Beurteilung der Entzündungsaktivität klinisch robust umsetzen lassen, ist von einer deutlichen Erweiterung des Anwendungsspektrums auszugehen.

Schlüsselwörter

Regionale Lungenfunktion · Entzündungsaktivität · Anwendungsspektrum · Lungenfibrose · Funktionelle Bildgebung

MRI of interstitial lung diseases. What is possible?

Abstract

Background. Magnetic resonance imaging (MRI) of the lungs is becoming increasingly appreciated as a third diagnostic imaging modality besides chest x-ray and computed tomography (CT). Its value is well acknowledged for pediatric patients or for scientific use particularly when radiation exposure should be strictly avoided. However, the diagnosis of interstitial lung disease is the biggest challenge of all indications. The objective of this article is a summary of the current state of the art for diagnostic MRI of interstitial lung diseases.

Material and methods. This article reflects the results of a current search of the literature and discusses them against the background of the authors own experience with lung MRI.

Results. Due to its lower spatial resolution and a higher susceptibility to artefacts MRI does not achieve the sensitivity of CT for the detection of small details for pattern recognition (e.g. fine reticulation and micronod-

ules) but larger details (e.g. coarse fibrosis and honeycombing) can be clearly visualized. Moreover, it could be shown that MRI has the capability to add clinically valuable information on regional lung function (e.g. ventilation, perfusion and mechanical properties) and inflammation with native signal and contrast dynamics.

Discussion. In its present state MRI can be used for comprehensive cardiopulmonary imaging in patients with sarcoidosis or for follow-up of lung fibrosis after initial correlation with CT. Far more indications are expected when the capabilities of MRI for the assessment of regional lung function and activity of inflammation can be transferred into robust protocols for clinical use.

Keywords

Regional lung function · Inflammatory activity · Application spectrum · Lung fibrosis · Functional imaging

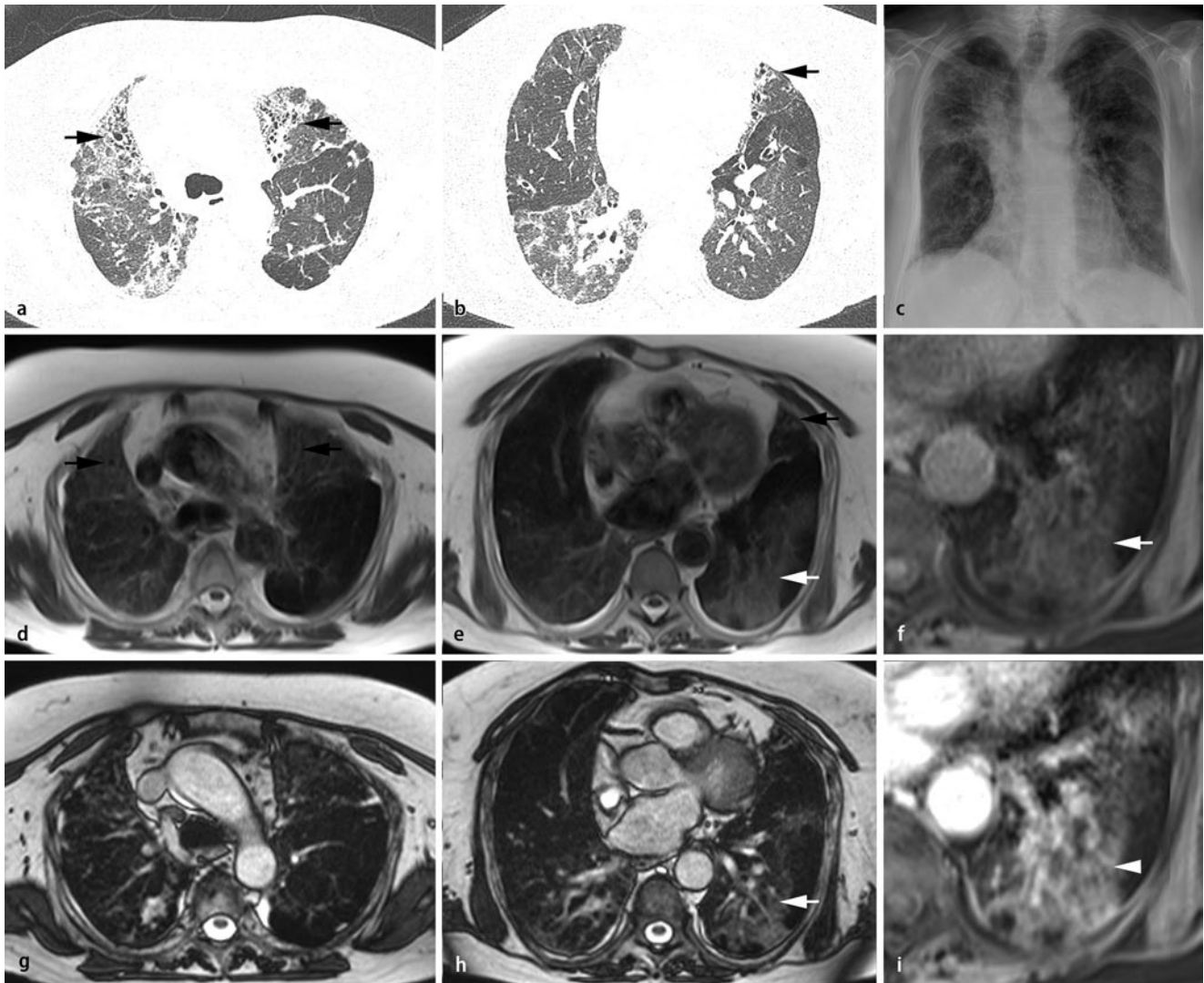


Abb. 2 ▲ Milchglastrübung bei Exazerbation einer chronischen exogenen allergischen Alveolitis (EAA), 70-jährige Patientin mit bekannter chronischer EAA. **a, b, c** Röntgenthorax und CT zeigen in verschiedenen Lungenabschnitten jeweils diffus verteilte peripher betonte fibrotische Retikulationen und eingelagert ausgeprägte Traktionsbronchiektasen (**b**, Pfeil). In den basalen Anteilen des linken Unterlappens zeigt sich eine diskrete Milchglastrübung. **d, e, f, g, h** Drei Wochen nach der CT kam es zu einer akuten Exazerbation der klinischen Symptomatik, eine erneute Bildgebung wurde nun mittels MRT durchgeführt. Diese zeigt die bekannten Retikulationen und Traktionsbronchiektasen als irreversible Veränderungen im Vergleich zur CT mit deutlich geringerer Auflösung (**d, f**). Allerdings zeigten großflächige Lungenabschnitte nun eine ausgeprägte Signalsteigerung im Sinne einer Milchglastrübung durch eine Alveolitis (weißer Pfeil) in den T1(3-D-GRE)- und T2-gewichteten (HASTE)-Sequenzen (**e, f**) sowie der SSFP (**h**). Die aktiv-entzündlichen Abschnitte weisen ebenfalls eine kräftige Kontrastmittelaufnahme auf (**i**, weißer Pfeilkopf, 3-D-GRE/fs nach i.v.-Kontrastmittelinjektion). GRE Gradientenecho, fs fettgesättigt, HASTE „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, SSFP „steady state free precession“

pulmonalvenöse Stauung bei Linksherzinsuffizienz zu denken. Hilfreich kann hier ein Abgleich mit den nativen T1-gewichteten GRE-Sequenzen sein, die im Falle reiner Flüssigkeitseinlagerungen eine nur sehr geringe Signalintensität des Lungenparenchyms und der interlobulären Septen zeigen [21]. Grundsätzlich ist am ehesten bei feinnetziger, wenig entzündlich aktiver und daher wenig flüssigkeitshaltiger Fibrosierung ohne erkenn-

bare Parenchymdistorsion (z. B. typisches NSIP-Muster [nichtspezifische interstitielle Pneumopathie]) von einer eingeschränkten Sensitivität der MRT auszugehen [22].

Mit intravenöser Kontrastmittel(KM)-Gabe lässt sich die Sensitivität der T1-gewichteten MRT für fibrotische Lungenparenchymveränderungen erheblich verbessern, die sich durch Kontrastmittelaufnahme intensiv vor dem nur minimal durch

die Kontrastmittelgabe signalangehobenen gesunden Lungengewebe demarkieren (■ **Abb. 2**; [19]). Um von der höheren räumlichen Auflösung der 3-D-GRE-Sequenzen zu profitieren, ist eine KM-Gabe zur Untersuchung interstitieller Lungenerkrankungen sinnvoll und empfehlenswert (■ **Abb. 2**). Gleichzeitig erleichtert die KM-Gabe den Nachweis eines Lungenemphysems oder anderer Befunde mit verminderter Dichte des Lungengewebes

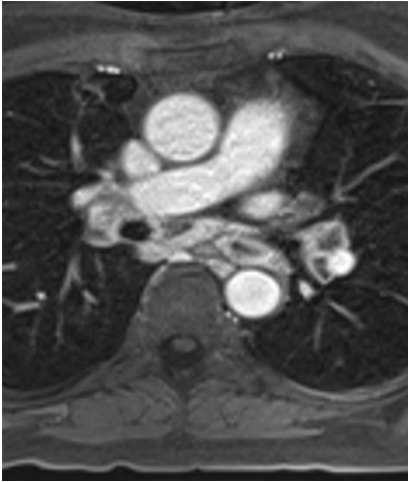


Abb. 3 ▲ Dark-lymph-node-Zeichen. Die kontrastmittelverstärkte 3-D-GRE/fs-Sequenz der bilären Lymphadenopathie eines Patienten mit Sarkoidose zeigt eine deutliche zirkuläre Signalanhebung der Lymphknoten mit zentral hypodensem, nicht oder nur wenig Kontrastmittel aufnehmendem Gewebe. GRE Gradientenecho, fs fettgesättigt

Infobox 2 Dark-lymph-node-Zeichen

Das Dark-lymph-node-Zeichen (DLNS) bei Lymphknotenvergrößerungen im Rahmen einer pulmonalen Sarkoidose zeigt sowohl in schnellen T2-gewichteten Spinechosequenzen (T2-FSE/fs) als auch in kontrastmittelverstärkten Gradientenechosequenzen (3-D-GRE/fs) eine zentrale hypointense Zone mit einem peripher hyperintensiven Saum (jeweils in Relation zum Signal der Brustwandmuskulatur). Es ist offenbar hoch spezifisch für eine Sarkoidose und scheint geeignet, eine Lymphadenopathie durch Sarkoidose von malignen Lymphomerkrankungen zu differenzieren.

wie z. B. „air trapping“ [11]. Bei Bronchiektasen erlaubt die KM-Gabe eine Differenzierung von verdickten Bronchialwänden (mit KM-Aufnahme) von Sekretverhalten [23]. Desweiteren scheinen kontrastmittelverstärkte 3-D-GRE/fs gut zur Detektion von „honeycombing“ (sog. Honigwabenmuster, einer Kombination retikulärer Fibrosierungen mit irregulären zystischen Destruktionen der Lunge in der Subpleuralregion) geeignet [19].

Ein gutes Beispiel für den möglichen klinischen Einsatz ist die kombinierte Untersuchung von Herz und Lunge bei Sarkoidose. Die Untersuchung der Lunge lässt sich mit einem zeitlichen Mehrauf-

wand von weniger als 10 min in die Herz-MRT integrieren. Chung et al. [22] verglichen ein MRT-Protokoll mit koronarer HASTE und bSSFP, transversaler T2-FSE/fs und kontrastmittelverstärkter 3-D-GRE/fs mit HRCT an 29 Patienten mit pulmonaler Sarkoidose und Herzbeteiligung. In der scorebasierten Auswertung konnten sie für Parenchymverdichtungen und Retikulationen im Vergleich zur CT Korrelation und Agreement von 0,70/0,53 (Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman) und 0,61/0,45 (Cohens „weighted kappa“) zeigen. Die geringste Übereinstimmung ergab sich für Mikronoduli (0,50/0,31). Insgesamt lagen die Korrelation bei 0,77 und das Agreement bei 0,65 im Vergleich zur CT. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Auswertungsmethoden (Globalscore vs. Einzelbefunde) sind diese Ergebnisse mit der Studie von Rajaram et al. [20] vergleichbar.

Die Sarkoidose ist gleichzeitig ein Beispiel, wie die MRT des Thorax diagnostische Zusatzinformationen bieten kann. Chung et al. [24] konnten an 25 von 51 Patienten mit pulmonaler Sarkoidose (ca. 50%) sowohl in schnellen, fettsignalsupprimierten T2-gewichteten Spinechosequenzen (T2-FSE/fs) als auch in kontrastmittelverstärkten Gradientenechosequenzen (3-D-GRE/fs) in den befallenen Lymphknoten eine zentrale hypointense Zone mit einem peripher hyperintensiven Saum (jeweils in Relation zum Signal der Brustwandmuskulatur) zeigen. Das sogenannte Dark-lymph-node-Zeichen („dark lymph node sign“, DLNS, **Abb. 3**) ist offenbar hoch spezifisch für eine Sarkoidose und könnte geeignet sein, eine Lymphadenopathie durch Sarkoidose von malignen Lymphomerkrankungen zu differenzieren (bisher nur in vorläufigen Auswertungen aktueller Studien bestätigt, **Infobox 2**).

Ein neuer Ansatz ist die Anwendung von Sequenzen mit ultrakurzen Echozeiten deutlich unter 1 ms („ultra-short echo“, UTE), mit denen eine bessere Ausbeute des nativen Lungenparenchymsignals erreicht werden kann. Der resultierende Kontrast nähert sich dem Bildeindruck der CT und ist daher besonders für den Einsatz bei ILD interessant [25, 26]. Erste vorläufige Ergebnisse bei der Darstellung des Usual-interstitial-pneumonia(UIP)-Musters sind vielversprechend

und könnten die Sensitivität der MRT weiter erhöhen [25].

Beurteilung der Entzündungsaktivität

Eine der wichtigsten klinischen Fragestellungen im Zusammenhang mit interstitiellen Lungenerkrankungen ist die Frage nach der entzündlichen Aktivität. Eine Differenzierung aktiver entzündlicher Veränderungen von irreversibler Fibrose ist sowohl für die Prognose des Therapieerfolgs als auch die Gesamtprognose von Bedeutung. Diese Diskussion wurde durch neue Medikamente (z. B. Pirfenidon) belebt, die erstmals eine effiziente Behandlung der idiopathischen Lungenfibrose ermöglichen [27]. In diesem Zusammenhang wurden bislang sowohl das native MRT-Signal als auch das KM-Verhalten von Entzündung und Fibrose untersucht. Trotz anfangs deutlich limitierter Bildqualität konnte schon früh gezeigt werden, dass eine Differenzierung von Entzündung und Fibrose anhand des nativen Signalverhaltens und der KM-Aufnahme prinzipiell möglich ist (**Abb. 2**; [28, 29, 30]). Eine aktuellere Studie hat in diesem Zusammenhang die prinzipiell höhere Sensitivität der Hochfeld-MRT (bei 3 T) für Unterschiede in der Protonendichte genutzt [19]. Hierbei war das MRT-Signal narbig-fibrotischer Veränderungen isointens zur Brustwandmuskulatur, während aktiv entzündliche Läsionen aufgrund ihres erhöhten Flüssigkeitsgehalts deutlich signalintensiver als die Muskulatur dargestellt wurden. In den kontrastmittelverstärkten dynamischen Sequenzen hatte das Muster einer frühen KM-Aufnahme mit einem Peak nach 1–3 min mit anschließendem Auswaschen des Kontrastmittels einen positiven bzw. negativen prädiktiven Wert von 82 bzw. 92% für das Vorliegen einer aktiven pulmonalen Inflammation. Als Ursache wurde eine erhöhte Kapillarpermeabilität in den aktiv entzündeten Geweben angenommen.

Wichtige Erkenntnisse zur Bildgebung der Lungenfibrose wurden an Kleintieren mit Bleomycin-induzierter Lungenfibrose gewonnen. Jacob et al. [31] quantifizierten die Protonendichte und T2-Relaxationszeiten in Bleomycin-manipulier-

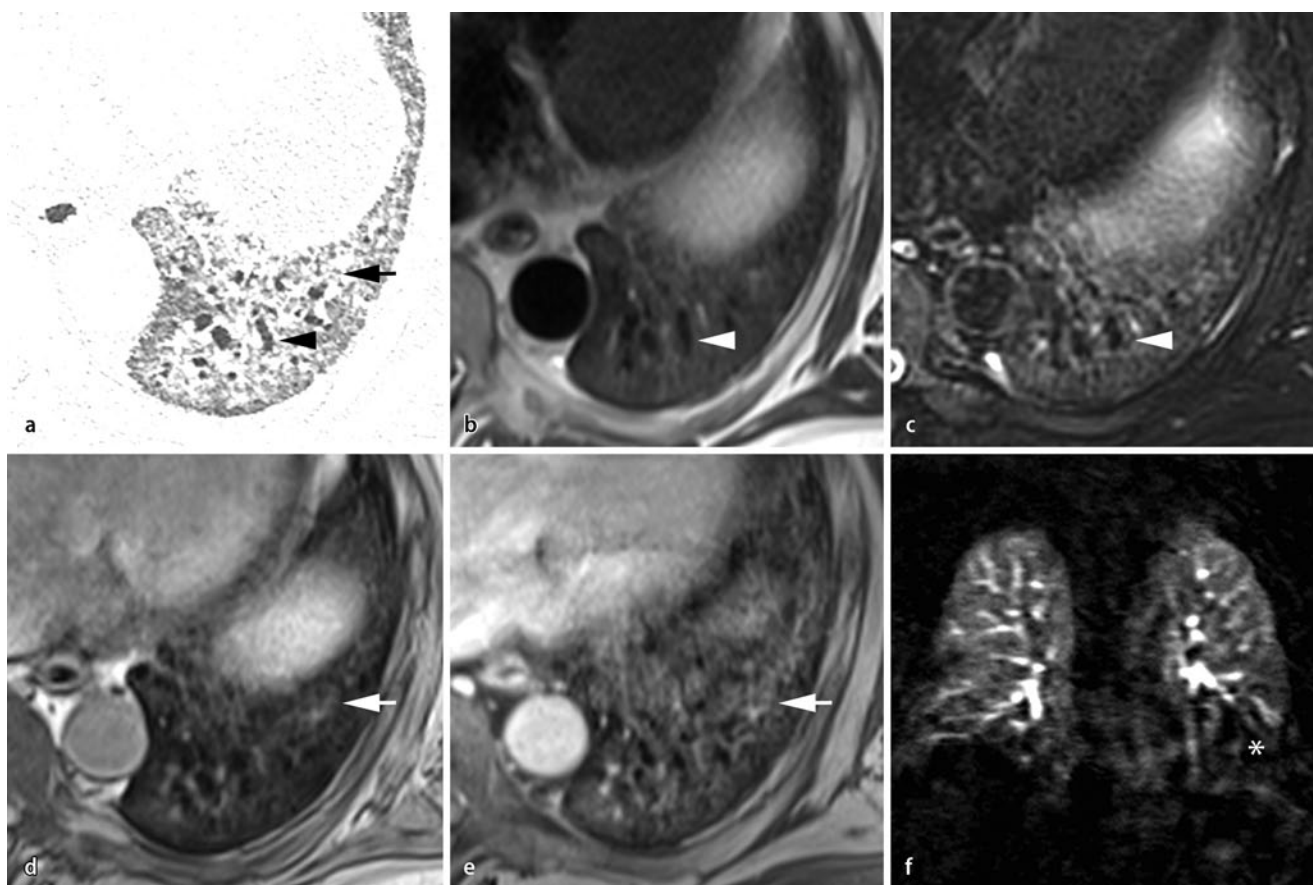


Abb. 4 ▲ Retikulation und Traktionsbronchiektasen, 60-jähriger Patient mit UIP-Muster. Die CT zeigt eine basal-peripher prädominante Fibrose. Feine Retikulationen (Pfeil) und eingelagerte Traktionsbronchiektasen (Pfeilspitze) sind deutlich erkennbar (a). Die T2-gewichteten Sequenzen (HASTE, BLADE) zeigen in diesem Bereich aufgrund der geringeren Auflösung eine flächige Signalsteigerung, die Traktionsbronchiektasen sind jedoch deutlich erkennbar (b, c, weiße Pfeilspitze). Aufgrund besserer Auflösung bilden sich die Retikulationen besser in der T1-gewichteten 3-D-GRE-Sequenz vor und insbesondere nach KM-Gabe ab (d, e, weißer Pfeil). Die Perfusionsbildgebung ergab eine korrespondierende Perfusionsstörung des linken Unterlappens (*, FLASH-3-D-Sequenz, subtrahiert, f). UIP „usual interstitial pneumonia“, HASTE „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, GRE Gradientenecho, KM Kontrastmittel, FLASH „fast low angle shot“

ten Kleintierlungen und verglichen sie mit dem postmortal ermittelten Wasser- und Kollagengehalt. In diesen Untersuchungen erwiesen sich Protonendichte und T2-Relaxationszeiten als geeignet, um Entzündung und Fibrose zu differenzieren.

Funktionelle Bildgebung

Die zurzeit robusteste und am besten etablierte MRT-Technik zur funktionellen Bildgebung der Lunge ist die dynamische Bildgebung mit zeitlich aufgelösten zwei- oder dreidimensionalen GRE-Sequenzen („dynamic contrast-enhanced MRI“, „first pass perfusion MRI“). Neben der naheliegenden Anwendung für die Diagnostik der akuten und chronischen Lungenarterienembolie findet sie Einsatz zur Beurteilung der Lungenperfusion bei Atem-

wegs- und Parenchymerkrankungen [32]. Ein prominentes Beispiel ist die Beurteilung der Lungenperfusion von Kindern mit zystischer Fibrose. Eichinger et al. [13] konnten zeigen, dass die durch Sekretretention, Bronchusverlegung und hypoxische Vasokonstriktion ausgelösten Perfusionsdefekte unter erfolgreicher Therapie reversibel sind [14]. Lokale Veränderungen der Lungenperfusion lassen sich auch bei interstitiellen Lungenerkrankungen nachweisen, der klinische Stellenwert des Verfahrens ist jedoch noch unklar (■ Abb. 4 und 5).

Während KM-Dynamik, Protonendichtebestimmungen und Relaxationszeitmessungen bei erfolgreichen Tests auf absehbare Zeit Eingang in die Routinediagnostik finden könnten, sind andere, höchst interessante wissenschaftliche An-

wendungen hiervon noch weit entfernt. Einige wenige Beispiele genügen, um das theoretische Potenzial der Lungen-MRT für die Diagnostik der interstitiellen Lungenerkrankungen zu beleuchten:

Ein Beispiel ist die Ventilations-MRT mit hyperpolarisiertem Xenon-129. Das Edelgas wird nicht nur inhaliert, sondern geht auch in Blut und Gewebe des Patienten über (u. a. sind anästhetische Effekte des inhalierten Gases bekannt). Als hyperpolarisiertes Xenon-129 lässt sich das Gas mittels spektroskopischer MRT-Sequenztechnik direkt nachweisen und kann genutzt werden, um sowohl die Ventilation der Luftwege als auch die Diffusionsleistung der Lunge zu quantifizieren. Hierbei werden die unterschiedlichen Resonanzfrequenzen des Edelgases in Luft, festem Gewebe und in Blutzellen genutzt

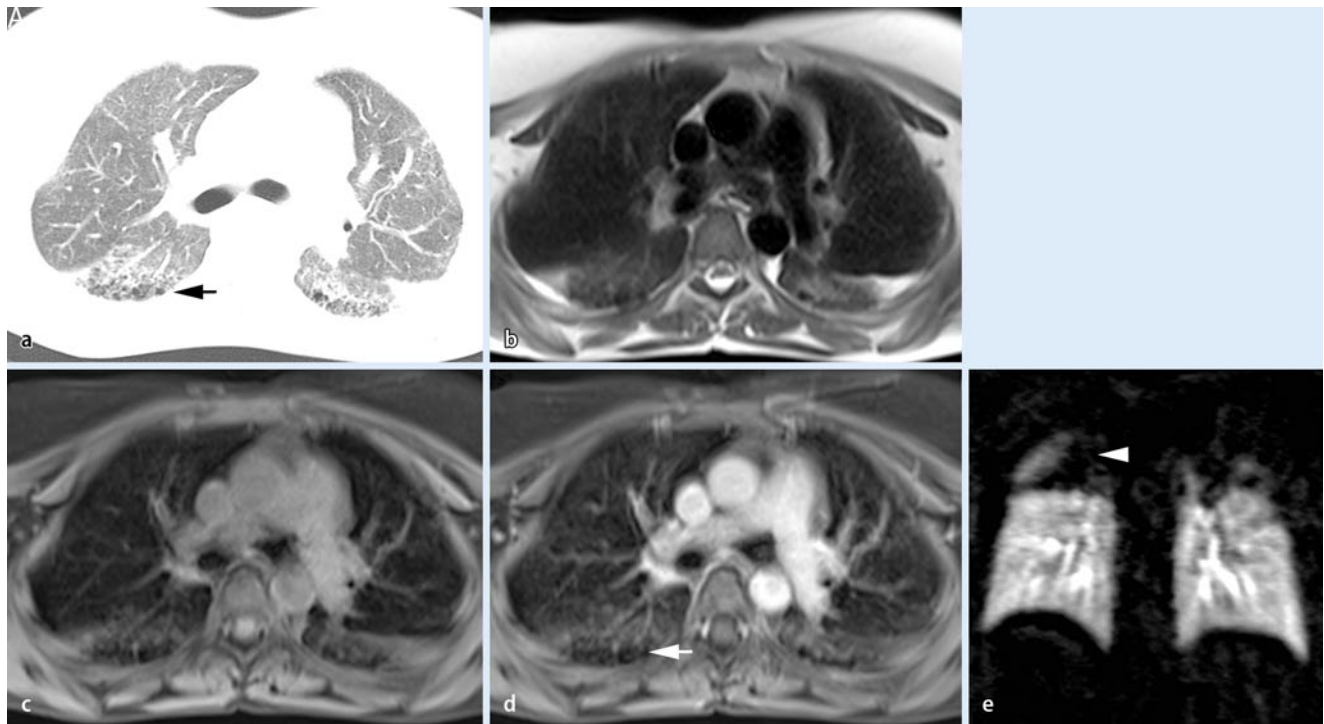


Abb. 5 ▲ Zysten, 26-jährige Patientin mit subpleuralen Honigwaben insbesondere im Segment 6 beidseits (Pfeil) bei NSIP dokumentiert durch die CT (a). Da es sich hierbei um eine sog. Minuspathologie (verminderte Protonendichte) handelt, ist diese in der nativen MRT schwierig zu erkennen (HASTE, 3-D-GRE, b, c). Die i.v.-KM-Gabe führt zu einem höheren Signal des Lungenparenchyms und kann daher die Honigwaben hervorheben (d, weißer Pfeil). Die Perfusions-MRT zeigt die zystischen Destruktionen in Form von Perfusionsausfällen in den apikalen Unterlappen beidseits (e, weißer Pfeilkopf). NSIP nichtspezifische interstitielle Pneumopathie, HASTE „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, GRE Gradientenecho, KM Kontrastmittel

[33]. Kaushik et al. [34] konnten für 6 Patienten mit idiopathischer Lungenfibrose anhand der Verzögerung der spektralen Verschiebung eine deutlich erhöhte Diffusionsbarriere im Vergleich zu 11 gesunden Probanden zeigen.

Andere Gruppen haben die Machbarkeit der Elastographie zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften des Lungengewebes nachgewiesen. Mittels schneller Spinecho-echo-planar-imaging-Sequenzen (SE-EPI) mit sehr kurzer Echozeit und einem 50-Hz-Vibrationsgeber konnten sie an gesunden Probanden Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Lungengewebes (Elastizität/„stiffness“) in Abhängigkeit von der Atemlage nachweisen. Erwartungsgemäß ließ sich auch eine geringere Elastizität (höhere „stiffness“) an einem Patienten mit Lungenfibrose zeigen [35, 36].

Erste Ansätze zur molekularen Bildgebung der Lungenfibrose wurden für einen Marker für Typ-I-Kollagen gezeigt, mit dem sich an der Bleomycin-induzier-

ten Lungenfibrose der Ratte eine 2-fach höhere Anreicherung im Vergleich zu gesunden Tieren zeigen ließ ($p < 0,0001$). Der Signalanstieg korrelierte hierbei mit dem Hydroxyprolinegehalt des Gewebes ($r = 0,72$ [37]).

Fazit für die Praxis

- Während die MRT auf anderen Gebieten mittlerweile eine zunehmende Konkurrenz zur Röntgen- und CT-Diagnostik darstellt, ist sie für die Diagnostik interstitieller Lungenerkrankungen bislang von untergeordneter Bedeutung.
- Bei der Darstellung subtiler Parenchymveränderungen (feinretikuläre Fibrose, Mikronoduli) erreicht die MRT nicht die Detailauflösung der CT, dürfte der einfachen Röntgenübersicht (mit Ausnahme kalzifizierter Befunde) aber überlegen sein.

- Wie am Beispiel der Sarkoidose diskutiert, gibt es klinische Fragestellungen, in denen der Einsatz der MRT sinnvoll erscheint (All-in-one-Untersuchung von Herz und Lungen mittels MRT, Abgrenzung zu Lymphom-erkrankungen).
- In Einzelfällen, wie mit dem Nachweis des Dark-lymph-node-Zeichens bei der Sarkoidose, kann die MRT auch entscheidende Hinweise für die klinische Differenzialdiagnose geben.
- Überwiegend dürften es wissenschaftliche Fragestellungen sein, bei denen die MRT ihren Wert als strahlungsfreie Alternative ausspielen kann.
- Während das Potenzial der CT in der Lungenparenchymfeindarstellung weitgehend ausgeschöpft ist, sind vonseiten der MRT-Technik mit bewegungskorrigierten, selbstnavigierten Sequenzen, ultrakurzen Echozeiten und verfeinerten Auswertemethoden

noch erhebliche Verbesserungen zu erwarten.

- Sollte sich in naher Zukunft auch im klinischen Einsatz bestätigen, dass die MRT geeignet ist, den Aktivitätsgrad interstitieller Lungenerkrankungen einzuschätzen, eröffnen sich gänzlich neue Perspektiven – insbesondere im Hinblick auf die Verlaufsbeurteilung unter Therapie mit den neu verfügbaren Medikamenten zur Behandlung der idiopathischen Lungenfibrose.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. J. Biederer

Radiologie Darmstadt, Kreisklinik Groß-Gerau, Wilhelm-Seipp-Str. 3, 64521 Groß-Gerau
biederer@radiologie-darmstadt.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. J. Biederer, M.O. Wielpütz, B.J. Jobst und J. Dinkel geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Wielpütz MO, Heußel CP, Herth FJF, Kauczor H-U (2014) Radiological diagnosis in lung disease: factoring treatment options into the choice of diagnostic modality. *Dtsch Arztebl Int* 111:181–187. doi:10.3238/arztebl.2014.0181
- Wielpütz MO, Eichinger M, Puderbach M (2013) Magnetic resonance imaging of cystic fibrosis lung disease. *J Thorac Imaging* 28:151–159. doi:10.1097/RTI.0b013e31828d40d4
- Schiebler ML, Bhalla S, Runo J et al (2013) Magnetic resonance and computed tomography imaging of the structural and functional changes of pulmonary arterial hypertension. *J Thorac Imaging* 28:178–193. doi:10.1097/RTI.0b013e31828d5c48
- Rajaram S, Swift AJ, Telfer A et al (2013) 3D contrast-enhanced lung perfusion MRI is an effective screening tool for chronic thromboembolic pulmonary hypertension: results from the ASPIRE registry. *Thorax* 68:677–678. doi:10.1136/thoraxjnl-2012-203020
- Lutterbey G, Gieseke J, Falkenhausen M von et al (2005) Lung MRI at 3.0 T: a comparison of helical CT and high-field MRI in the detection of diffuse lung disease. *Eur Radiol* 15:324–328. doi:10.1007/s00330-004-2548-1
- Biederer J, Beer M, Hirsch W et al (2012) MRI of the lung (2/3). Why – when – how? *Insights Imaging*. doi:10.1007/s13244-011-0146-8
- Wild JM, Marshall H, Bock M et al (2012) MRI of the lung (1/3): methods. *Insights Imaging*. doi:10.1007/s13244-012-0176-x
- Sommer G, Koenigkam-Santos M, Biederer J, Puderbach M (2014) Role of MRI for detection and characterization of pulmonary nodules. *Radiologe* 54:470–477. doi:10.1007/s00117-013-2604-4
- Biederer J, Hintze C, Fabel M (2008) MRI of pulmonary nodules: technique and diagnostic value. *Cancer Imaging* 8:125–130. doi:PMC2413430
- Travis WD, Costabel U, Hansell DM et al (2013) An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: update of the international multidisciplinary classification of the idiopathic interstitial pneumonias. *Am J Respir Crit Care Med* 188:733–748. doi:10.1164/rccm.201308-1483ST
- Barreto MM, Rafful PP, Rodrigues RS et al (2013) Correlation between computed tomographic and magnetic resonance imaging findings of parenchymal lung diseases. *Eur J Radiol* 82:e492–e501. doi:10.1016/j.ejrad.2013.04.037
- Rizzi EB, Schinina V, Cristofaro M et al (2011) Detection of pulmonary tuberculosis: comparing MR imaging with HRCT. *BMC Infect Dis* 11:243. doi:10.1186/1471-2334-11-243
- Eichinger M, Optazait D-E, Kopp-Schneider A et al (2012) Morphologic and functional scoring of cystic fibrosis lung disease using MRI. *Eur J Radiol* 81:1321–1329. doi:10.1016/j.ejrad.2011.02.045
- Wielpütz MO, Puderbach M, Kopp-Schneider A et al (2014) Magnetic resonance imaging detects changes in structure and perfusion, and response to therapy in early cystic fibrosis lung disease. *Am J Respir Crit Care Med* 189:956–965. doi:10.1164/rccm.201309-1659OC
- Wielpütz M, Kauczor H-U (2012) MRI of the lung: state of the art. *Diagn Interv Radiol* 18:344–353. doi:10.4261/1305-3825.DIR.5365-11.0
- Rieger C, Herzog P, Eibel R et al (2008) Pulmonary MRI – a new approach for the evaluation of febrile neutropenic patients with malignancies. *Support Care Cancer* 16:599–606. doi:10.1007/s00520-007-0346-4
- Lutterbey G, Gieseke J, Falkenhausen M von et al (2005) Lung MRI at 3.0 T: a comparison of helical CT and high-field MRI in the detection of diffuse lung disease. *Eur Radiol* 15:324–328. doi:10.1007/s00330-004-2548-1
- Lutterbey G, Grohé C, Gieseke J et al (2007) Initial experience with lung-MRI at 3.0 T: Comparison with CT and clinical data in the evaluation of interstitial lung disease activity. *Eur J Radiol* 61:256–261. doi:10.1016/j.ejrad.2006.09.005
- Yi CA, Lee KS, Han J et al (2008) 3-T MRI for differentiating inflammation- and fibrosis-predominant lesions of usual and nonspecific interstitial pneumonia: comparison study with pathologic correlation. *AJR Am J Roentgenol* 190:878–885. doi:10.2214/AJR.07.2833
- Rajaram S, Swift AJ, Capener D et al (2012) Lung morphology assessment with balanced steady-state free precession MR imaging compared with CT. *Radiology* 263:569–577. doi:10.1148/radiol.12110990
- Biederer J, Busse I, Grimm J et al (2002) Sensitivity of MRI in detecting alveolar infiltrates: experimental studies. *Rofo* 174:1033–1039. doi:12142984
- Chung JH, Little BP, Forssen AV et al (2013) Proton MRI in the evaluation of pulmonary sarcoidosis: comparison to chest CT. *Eur J Radiol* 82:2378–2385. doi:10.1016/j.ejrad.2013.08.019
- Puderbach M, Eichinger M, Gahr J et al (2007) Proton MRI appearance of cystic fibrosis: comparison to CT. *Eur Radiol* 17:716–724. doi:10.1007/s00330-006-0373-4
- Chung JH, Cox CW, Forssen AV et al (2013) The dark lymph node sign on magnetic resonance imaging: a novel finding in patients with sarcoidosis. *J Thorac Imaging*. doi:10.1097/RTI.0b013e3182a4378b
- Johnson KM, Fain SB, Schiebler ML, Nagle S (2013) Optimized 3D ultrashort echo time pulmonary MRI. *Magn Reson Med* 70:1241–1250. doi:10.1002/mrm.24570
- Bergin CJ, Glover GH, Pauly JM (1991) Lung parenchyma: magnetic susceptibility in MR imaging. *Radiology* 180:845–848. doi:10.1148/radiology.180.3.1871305
- Iwasawa T, Ogura T, Sakai F et al (2014) CT analysis of the effect of pirfenidone in patients with idiopathic pulmonary fibrosis. *Eur J Radiol* 83:32–38. doi:10.1016/j.ejrad.2012.02.014
- McFadden RG, Carr TJ, Wood TE (1987) Proton magnetic resonance imaging to stage activity of interstitial lung disease. *Chest* 92:31–39
- Berthezène Y, Vexler V, Kuwatsuru R et al (1992) Differentiation of alveolitis and pulmonary fibrosis with a macromolecular MR imaging contrast agent. *Radiology* 185:97–103
- Gaeta M, Blandino A, Scribano E et al (2000) Chronic infiltrative lung diseases: value of gadolinium-enhanced MRI in the evaluation of disease activity – early report. *Chest* 117:1173–1178
- Jacob RE, Amidan BG, Soelberg J, Minard KR (2010) In vivo MRI of altered proton signal intensity and T2 relaxation in a bleomycin model of pulmonary inflammation and fibrosis. *J Magn Reson Imaging* 31:1091–1099. doi:10.1002/jmri.22166
- Biederer J, Bauman G, Hintze C et al (2011) Magnetresonanztomographie. *Pneumologie* 8:234–242. doi:10.1007/s10405-010-0440-z
- Cleveland ZI, Virgincar RS, Qi Y et al (2014) 3D MRI of impaired hyperpolarized (129)Xe uptake in a rat model of pulmonary fibrosis. *NMR Biomed*. doi:10.1002/nbm.3127
- Kaushik SS, Freeman MS, Yoon SW et al (2014) Measuring diffusion-limitation with a perfusion-limited gas-hyperpolarized 129Xe gas-transfer spectroscopy in patients with idiopathic pulmonary fibrosis. *J Appl Physiol* (1985). doi:10.1152/jap-physiol.00326.2014
- Mariappan YK, Glaser KJ, Levin DL et al (2013) Estimation of the absolute shear stiffness of human lung parenchyma using (1)H spin echo, echo planar MR elastography. *J Magn Reson Imaging*. doi:10.1002/jmri.24479
- Hirsch S, Posnansky O, Papazoglou S et al (2013) Measurement of vibration-induced volumetric strain in the human lung. *Magn Reson Med* 69:667–674. doi:10.1002/mrm.24294
- Caravan P, Yang Y, Zachariah R et al (2013) Molecular magnetic resonance imaging of pulmonary fibrosis in mice. *Am J Respir Cell Mol Biol* 49:1120–1126. doi:10.1165/rccb.2013-0039OC



Kommentieren Sie diesen Beitrag auf springermedizin.de

► Geben Sie hierzu den Beitragstitel in die Suche ein und nutzen Sie anschließend die Kommentarfunktion am Beitragsende.