

Radiologe 2022 · 62:418–428  
<https://doi.org/10.1007/s00117-022-00996-7>  
Angenommen: 14. März 2022  
Online publiziert: 13. April 2022  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022



# Lungenbildgebung in der Niederfeld-Magnetresonanztomographie

Maximilian Hinsen<sup>1</sup> · Rafael Heiss<sup>1,2</sup> · Armin M. Nagel<sup>1,3</sup> · Simon Lévy<sup>1</sup> · Michael Uder<sup>1,2</sup> · Sebastian Bickelhaupt<sup>1</sup> · Matthias S. May<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Radiologisches Institut, Universitätsklinikum Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Deutschland

<sup>2</sup> Imaging Science Institute, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen, Deutschland

<sup>3</sup> Division of Medical Physics in Radiology, German Cancer Research Center (DKFZ), Heidelberg, Deutschland

## In diesem Beitrag

- Niederfeld-MRT
- Morphologische Lungendarstellung
- Funktionelle Lungenbildgebung
- Personalisierte Lungendarstellung

## Zusammenfassung

**Hintergrund:** Die Untersuchung der Lunge mit der Magnetresonanztomographie (MRT) geht mit hohen Herausforderungen einher und konnte sich im klinischen Alltag bisher nicht durchsetzen. Aktuelle Entwicklungen der Niederfeld-MRT, in Kombination mit neuen computergestützten Aufnahme- und Auswertungsalgorithmen, versprechen neue Perspektiven für die bildgebende Diagnostik pulmonaler Erkrankungen.

**Ziel dieser Arbeit:** Diese Übersichtsarbeit soll ein Verständnis der physikalischen Vorteile der Niederfeld-MRT für die Lungenbildgebung vermitteln, einen Überblick über die spärlich vorhandenen Vorkenntnisse aus der Literatur bieten und erste Ergebnisse eines neu entwickelten Niederfeld-MRT präsentieren.

**Methoden:** Inhalte dieses Artikels basieren auf physikalischen Grundlagen, Recherchen in Literaturdatenbanken und eigenen Erfahrungen in der Lungenbildgebung mit einem modernen 0,55-T-MRT.

**Schlussfolgerung:** Die Niederfeld-MRT (< 1 T) kann technische und ökonomische Vorteile gegenüber höheren Feldstärken für die Lungenbildgebung haben. Die physikalischen Voraussetzungen sind aufgrund geringerer Suszeptibilitätseffekte, längerer transversaler Relaxationszeiten und niedrigerer spezifischer Absorptionsraten besonders für die Anatomie der Lunge vorteilhaft. Die geringeren Anschaffungs- und Betriebskosten haben zudem ein großes Potenzial, die Verfügbarkeit zu erhöhen und gleichzeitig die Nachhaltigkeit zu verbessern. Durch die Kombination moderner Sequenzen und computergestützter Auswertungen kann die morphologische Bildgebung um orts- und zeitaufgelöste funktionelle Untersuchungen der Lunge ohne Strahlenbelastung ergänzt werden. Sowohl für kritische Szenarien, wie Screening und engmaschiges Therapiemonitoring, als auch für besonders gefährdete Patientengruppen könnten Lücken geschlossen werden. Dazu gehören beispielsweise akute und chronische Lungenerkrankungen bei Kindern oder die Abklärung einer Lungenembolie bei Schwangeren.

## Schlüsselwörter

Lungenbildgebung · Feldstärke · Niederfeldsystem · Bildqualität · Funktionelle Analyse



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Die radiologische Untersuchung der Lunge ist eine der klassischen bildgebenden Routineuntersuchungen des klinischen Alltags. Die Computertomographie (CT) und die Röntgenuntersuchung machen über 90% der Untersuchungen des Thorax aus, gehen jedoch immer mit einer Strahlenbelastung für

den Patienten einher und sind limitiert in Bezug auf funktionelle Beurteilungen. Die Magnetresonanztomographie (MRT) bietet hingegen das Potenzial der dreidimensionalen morphologischen und funktionellen Darstellung ohne Einsatz ionisierender Strahlung. Die Niederfeld-MRT hat dabei aufgrund physikalischer

Hier steht eine Anzeige.



### Vorteile besonders gute Voraussetzungen.

Die diagnostische Bildgebung des Thorax stellt nach wie vor die zweithäufigste Routineuntersuchung in der klinischen Praxis dar [1]. Wichtige Indikationen für die Durchführung einer solchen Untersuchung umfassen Infektionen, Tumoren und Fibrosen. Dazu müssen Rundherde, Konsolidierungen, Milchglasverdichtungen, Retikulationen und Narbenstränge detektiert und differenziert werden. Gegenüber der klassischen Projektionsradiographie der Lunge zeigen die modernen Verfahren der Schnittbildgebung diagnostische Vorteile, z. B. in Bezug auf die dreidimensionale Charakterisierung und Zuordnung von Pathologien, sodass eine deutlich höhere Inter-Reader Reliabilität erreicht wird [2]. Die CT ist dabei der aktuelle Goldstandard und ermöglicht schnell und zuverlässig hochaufgelöste Darstellungen zur Beurteilung von Pathologien im Thorax.

Die Gesamtanzahl der MRT-Untersuchungen ist in den letzten Jahren stark angewachsen und hat in verschiedenen klinischen Anwendungsgebieten, wie in der onkologischen, muskuloskeletalen oder zentralnervösen Bildgebung einen hohen Stellenwert. In der Thoraxradiologie konnte sie sich dagegen bislang nicht als primäre Untersuchungsmodalität etablieren [3]. Der limitierte Stellenwert der MRT für die Bildgebung der Lunge hat hierbei physikalische, technische und organisatorische Gründe. Der geringe Wassergehalt und die ultrakurzen transversalen Relaxationszeiten des Lungengewebes führen zu sehr niedrigen Signalintensitäten, sodass die Lunge in der MRT-Bildgebung oftmals als *schwarzes Loch* bezeichnet wird. Um dies zumindest teilweise auszugleichen, können längere Messzeiten, geringere räumliche Auflösungen und spezielle Messtechniken, die ultrakurze Echozeiten ermöglichen, verwendet werden. Da sich die Thoraxorgane kontinuierlich bewegen, sind jedoch zusätzliche Trigger- bzw. Kompensationstechniken oder kurze Akquisitionszeiten zur Vermeidung von Bildartefakten nötig. Daraus resultieren entweder lange Messzeiten oder eine reduzierte räumliche Auflösung. Zudem treten Suszeptibilitätsartefakte besonders

an Luft-Gewebe-Grenzflächen auf, wie sie in der Lunge zahlreich vorhanden sind.

Die Computertomographie vereint hingegen kurze Untersuchungszeiten und eine hohe Auflösung und hat ihre intrinsische Stärke an Luft-Gewebe-Grenzen. Die CT ist weltweit relativ breit verfügbar, auch wenn erhebliche nationale und regionale Unterschiede bestehen. Die Stärken der MRT, die strahlungsfrei multiparametrische Sequenzen und funktionelle Analysen erlaubt, werden daher bislang wenig genutzt.

Moderne Niederfeld-MRT-Geräte haben das Potenzial, die physikalisch-technischen Limitationen der MRT bei der Bildgebung der Lunge deutlich zu reduzieren, darüber hinaus die Kosteneffizienz der MRT-Diagnostik insgesamt zu verbessern und damit eine breitere Verfügbarkeit zu ermöglichen. Die Kombination mit den neuesten softwarebasierten Untersuchungsunterstützungen und Auswerteverfahren könnte die Bedeutung der Lungen-MRT in der klinischen Praxis stärken und neue Möglichkeiten für Diagnostik- und Behandlungsprozesse schaffen. Seit November 2020 wird am Universitätsklinikum Erlangen ein neu entwickeltes 0,55-T-MRT mit supraleitendem Magneten (MAGNETOM Free.Max; Siemens Healthcare GmbH, Erlangen) verwendet.

Dieser Artikel soll einen Überblick über die potenziellen physikalischen Vorteile eines Niederfeldsystems ( $< 1,0\text{T}$ ) für die Lungenbildgebung, die aktuelle Studienlage über die Lungen-MRT und erste eigene Erfahrungen mit der neuesten Generation der supraleitenden Niederfeld-MRT geben.

### Niederfeld-MRT

Die klassische Herausforderung der Lungen-MRT ist im anatomischen Aufbau des Lungengewebes begründet. Die Lungenstruktur mit Alveolen, Acini und sekundären Lobuli bedingt eine geringe lokale Protonendichte in den abgebildeten Voxeln des Lungengewebes, sehr kurze transversale Relaxationszeiten sowie daraus resultierend ein sehr geringes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR; [4]). Eine etablierte Möglichkeit, das schnell zerfallende Signal des Lungengewebes in der Hochfeld-MRT besser zu detektieren, sind

spezielle Messtechniken, die ultrakurze Echozeiten (UTE) ermöglichen [5]. Diese sind grundsätzlich auf die Niederfeld-MRT übertragbar. Wielpütz et al. (2018) konnten bei 3 T noduläre Läsionen der Lunge ab einer Größe von 4 mm mit hoher Sensitivität nachweisen. Die Akquisitionszeiten der UTE-Sequenzen betragen maximal 20 s und konnten innerhalb einer Atempause erfolgen [6]. Bei der Niederfeld-MRT sind die transversalen Relaxationszeiten des Lungengewebes deutlich länger ( $T2^*$  bei 0,55 T:  $10 \pm 2\text{ ms}$  vs. 1,5 T:  $1\text{--}2\text{ ms}$ ; [7]). Infolgedessen lässt sich das Signal im Lungengewebe grundsätzlich auch mit konventionellen Messtechniken effizient detektieren. Die Auswahl an Sequenzen ist daher bei niedrigeren Feldstärken potenziell größer. Trotz dieser günstigeren Voraussetzungen sind auch in der Niederfeld-MRT meist zusätzlich wiederholte Mittelungen nötig, um das niedrige SNR teilweise zu kompensieren. Die dafür benötigte Verlängerung der Akquisitionszeit führt in der Lunge wiederum zu einer erhöhten Anfälligkeit für Atem- und Pulsationsartefakte. Zudem ist die Akquisitionszeit für Aufnahmen, die in einer Atemphase durchgeführt werden sollen, auf ca. 15–20 s begrenzt. Bei schwerer Vorschädigung der Lunge kann dieses Akquisitionsfenster noch deutlich kürzer sein. Daher ist auch in der Niederfeld-MRT häufig eine klinische Abwägung zwischen schnellen Sequenzen mit geringerer Bildqualität in Atemhaltetechnik und längeren Akquisitionen mit Atem-Trigger erforderlich, mit denen eine bessere Bildqualität erreicht werden kann (■ Tab. 1).

Während in den meisten anderen Körperregionen die Erhöhung der Feldstärke eine gute Möglichkeit ist, um das SNR in der Bildgebung zu erhöhen bzw. umgekehrt die Untersuchungsdauer bei unverändertem SNR zu reduzieren, trifft dies in der Lunge nicht zu. Multiple Luft-Gewebe-Grenzflächen verursachen lokale Magnetfeld-Inhomogenitäten [4]. Die hieraus resultierenden Suszeptibilitätsartefakte können die Bildqualität stark beeinträchtigen und sind bei niedrigerer Feldstärke signifikant geringer als bei den höheren Feldstärken von 1 und 3 T [7]. Das bei niedrigeren Feldstärken homogenere Magnetfeld reduziert zudem

Tab. 1 Messparameter der dargestellten Aufnahmen bei 0,55 T						
–	PDw BLADE Tra	T2w BLADE STIR Cor	T1w UTE Tra	T1w UTE Cor	T1w UTE 3D	T2w TRUFI Cor
TE(ms)	33	74	0.27	0.05	0.05	1.6
TR (ms)	3000	2500	10	9.5	6.4	292.6
TA (min)	08:50	08:00	00:19	00:18	Ca. 13:00	01:59
Nominelle Auflösung (mm)	1.3 × 1.3 × 6.0	1.5 × 1.5 × 6.0	2.1 × 2.1 × 3.0	2.1 × 2.1 × 3.0	2.0 × 2.0 × 2.0	1.7 × 1.7 × 15.0
TE Echozeit; TR Repetitionszeit; TA Messzeit; Tra transversal; Cor koronal; PDw Protonendichte-Wichtung, BLADE Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction (PROPELLER); STIR Short Tau Inversion Recovery; UTE Ultrashort TE; TRUFI True Fast Imaging with Steady State Precession						

Distorsionen. Campbell-Washburn et al. konnten zeigen, dass aufgrund dieser Effekte bei einer Feldstärke von 0,55 T eine insgesamt bessere Bildqualität, sowohl der morphologischen als auch der Ventilations-Perfusions-Messung, entsteht [7]. Anders als bei gadoliniumhaltigen klinischen Kontrastmitteln, die bei 0,55 und 1,5 T eine vergleichbare T1- und T2-Relaxivität aufweisen, ist die T1-Relaxivität von Sauerstoff bei der niedrigeren Feldstärke erhöht. Die Inhalation von reinem Sauerstoff kann daher die T1-Relaxationszeiten des Lungengewebes verkürzen und so zur zusätzlichen Kontrasterzeugung verwendet werden.

Neben den diagnostischen Leistungsparametern spielt die Verfügbarkeit der Lungen-MRT in der klinischen Routine eine wichtige Rolle. Wenn sich die Erwartung bestätigen sollte, dass es zu einer Erweiterung des Indikationsspektrums der Lungen-MRT kommt und diese Untersuchungen häufiger angefordert werden, muss auch die Effizienz und Verfügbarkeit verbessert werden. Moderne Niederfeld-MRT-Geräte haben aufgrund niedriger Anschaffungs- und Betriebskosten das Potenzial, hierzu einen wichtigen Beitrag zu leisten. Der reduzierte Helium- und Strombedarf ist zusätzlich geeignet, die Einstiegsschwelle für Neuinstallationen niedrig zu halten und eine verbesserte ökologische Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Die Integration der in den letzten Jahren mehr und mehr im Hochfeldbereich etablierten Algorithmen zur Untersuchungsunterstützung kann den Einstieg in die Durchführung der modernen Niederfeld-MRT erleichtern. Gerade für die Lungenbildgebung könnten so auf die klinische Situation des jeweiligen Patienten angepasste Untersuchungsprotokolle etabliert werden. Diese können beispielsweise Kurz-

protokolle bei Kindern als mögliche Alternative zum Röntgenbild, multiparametrische morphologische Detailuntersuchungen sowie funktionelle Abklärungen und individuelle Kombinationen beinhalten.

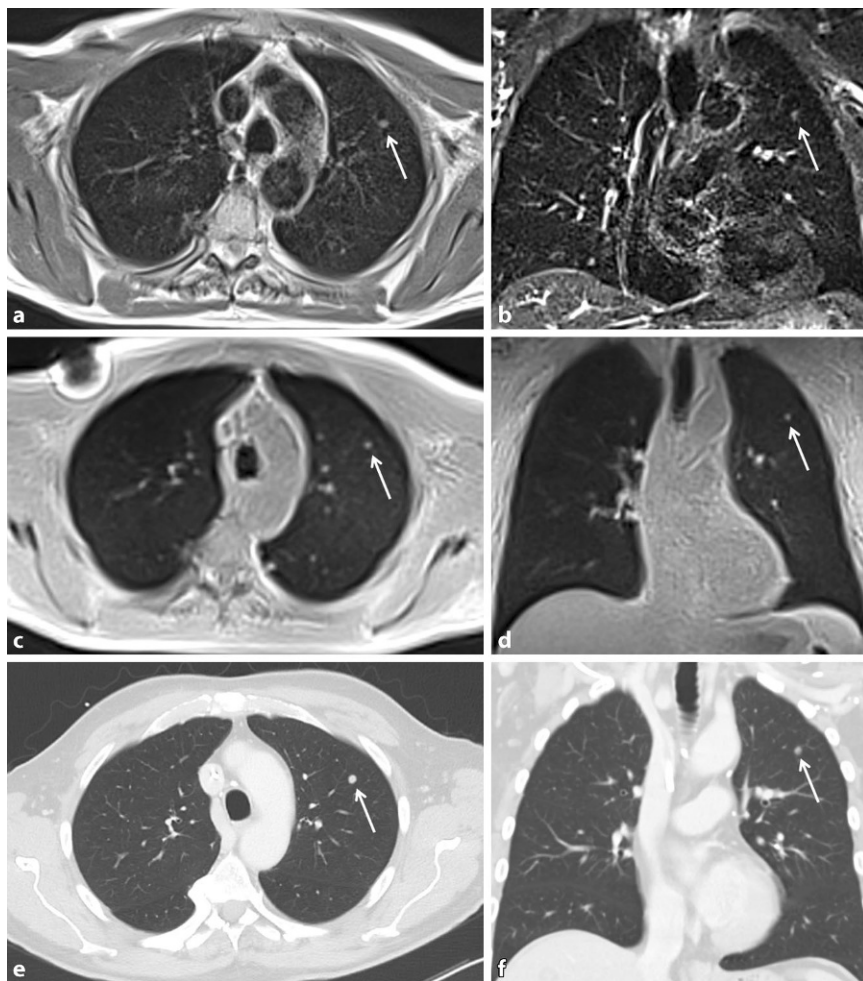
### Morphologische Lungen-darstellung

Moderne Akquisitionstechniken in der MRT, wie atemgetriggerte und artefaktreduzierende Sequenzen (z.B. Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction, PROPELLER/BLADE) oder Sequenzen mit ultrakurzer Echozeit (UTE) ermöglichen eine Untersuchung der Lunge mit einer hohen räumlichen Auflösung [8, 9]. Damit besteht grundsätzlich die Möglichkeit, auch interstitielle Lungengerüstveränderungen und Lungenrundherde zu detektieren. Für die MRT wurden hierbei Sensitivitäten von bis zu 90 % für Mikronoduli und 100 % für Rundherde ab einer Größe von 5–6 mm in Untersuchungen mit einer Feldstärke von 1,5 T beschrieben [10, 11]. Die MRT scheint daher prinzipiell auch für den Einsatz zur schnellen, strahlungsfreien Detektion von kleinen suspekten Lungenrundherden geeignet zu sein (▣ Abb. 1). Durch atemgetriggerte UTE-Sequenzen mit Scanzeiten von mehreren Minuten und modernen Rekonstruktionsverfahren können Bilddatensätze in isotroper Auflösung von 1,75 mm bei diagnostischem SNR erstellt werden. Diese können z.B. in der Diagnostik von interstitiellen Lungenerkrankungen eine Ergänzung zur hochaufgelösten CT darstellen [12].

Neben dem Einsatz in der zunehmend an Bedeutung gewinnenden onkologischen Früherkennung könnte die Technik auch einen klinischen Mehrwert für repetitive longitudinale Untersuchungen zum

Verlaufsmonitoring bieten. Die Vermeidung der kumulativen Applikation von ionisierenden Strahlen bei Verlaufsuntersuchungen akuter Infektionen, wie z.B. Patienten mit kompromittiertem Immunsystem nach Knochenmarktransplantation und chronischen Erkrankungen wie der Mukoviszidose, ist aufgrund des verhältnismäßig jungen Durchschnittsalters dieser Patientengruppen besonders attraktiv. Auch die Verlaufskontrolle pulmonaler Zufallsbefunde oder onkologischer Erkrankungen erscheint bei geeigneter Patientenselektion ebenso sinnvoll wie der Einsatz als Screening-Untersuchung bei Risikogruppen (z.B. Raucher oder nach Asbestexposition). Unsere ersten Lungenuntersuchungen an einem modernen 0,55-T-Gerät konnten dabei die vielversprechenden Ergebnisse aus der Literatur, die hierfür einen von 1 auf 0,55 T umgerüsteten MRT-Scanner verwendeten, bestätigen [7].

Anders als die CT bietet die MRT die Möglichkeit, komplementäre Bildkontraste zur weiteren Charakterisierung eines Krankheitsgeschehens einzusetzen. Bei höheren Feldstärken konnten mit diffusionsgewichteten Sequenzen intrapulmonale Rundherde von anderen Pathologien, wie Konsolidierungen und Atelektasen, differenziert werden [13]. Auch diese Funktionalität scheint auf die moderne Niederfeld-MRT übertragbar zu sein (▣ Abb. 2). Darüber hinaus stehen diffusionsgewichtete Sequenzen zur weiteren Charakterisierung von Lungenrundherden und zur Lymphknotendetektion zur Verfügung. Dabei werden durch Kartierung der Wassermolekülbewegung im Gewebe Korrelate der Zellularität bestimmt. Nach Angaben in der Literatur können Lungenrundherde ab einer Größe von 1 cm mit der diffusionsgewichteten Bild-



**Abb. 1** ▲ 77-jähriger Patient mit 6 mm großer Lungenmetastase eines Urothelkarzinoms im linken Oberlappen (Pfeile). Unterschiedliche Sequenzen bei 0,55 T erlauben einen sicheren Nachweis der Metastase: protonendichtegewichtete (PDw) BLADEtransversal (a), T2w-BLADE-STIR (Short-Tau Inversion Recovery) koronal (b), T1w-UTE („ultrashort echo time“-)Sequenzen transversal (c) und koronal (d). Multiplanare Rekonstruktion (MPR) einer Computertomographie (e, f) vom gleichen Tag (5 mm MPR, Faltungskern Br60). Die teilweise erkennbaren Suszeptibilitätsartefakte in der rechten Thoraxwand stammen von einer einliegenden Portkammer

gebung (DWI) untersucht werden [14, 15]. Die multiparametrische Kombination der komplementären Signalcharakteristiken der MRT-Bildgebung könnte in Kombination mit den klassischen morphologischen Malignitätskriterien wie Größe und Wachstumsrate zukünftig auch dazu beitragen, die Rate an Lungenbiopsien zu reduzieren [3].

Kinder sind aufgrund ihrer erhöhten Strahlensensibilität besonders durch ionisierende Strahlung gefährdet. Daher bietet sich die Niederfeld-MRT in der pädiatrischen Radiologie perspektivisch als Alternative zur klassischen Bildgebung an (Abb. 3). So konnte für die Lungen-MRT, im Vergleich zu den häufig aus Strah-

lenschutzgründen bei Kindern statt CT-Untersuchungen primär durchgeführten Röntgenaufnahmen, eine höhere diagnostische Genauigkeit in der Beurteilung der Tuberkulose gezeigt werden [16]. Nach ersten positiven Erfahrungen bei der Detektion von pulmonalen COVID-19-Pathologien bei Erwachsenen (Abb. 3) konnte diese an einem modernen 0,55-T-Gerät auch auf die Untersuchung von Kindern übertragen werden [17]. Mögliche weitere Indikationen sind chronische Erkrankungen, wie die zystische Fibrose, die Differenzialdiagnostik infektiöser Erkrankungen und die Abklärung von Komplikationen wie Ergüssen, Empyemen und Abszessen (Abb. 3, [18, 19]). Ein weiterer Vorteil der Niederfeld-

MRT für die Untersuchung von Kindern sind niedrigere spezifische Absorptionsraten (SAR). Da die geltenden SAR-Grenzwerte unabhängig von der Magnetfeldstärke sind, ist die Wahl der optimalen Sequenzparameter im Niederfeld oftmals weniger eingeschränkt [7]. Auch die Möglichkeit der offenen Gestaltung der Gantry mit Tunnelweiten bis 80 cm sollten sich positiv auf die Untersuchung von Kindern und von Patienten mit Klaustrophobie auswirken. Die geringere Geräuschbelastung kann ebenfalls zum Patientenkomfort beitragen und die Akzeptanz erhöhen. Mehrere unserer Patienten fragen aufgrund ihrer positiven Erfahrungen gezielt nach einer Folgeuntersuchung am gleichen Niederfeld-Gerät.

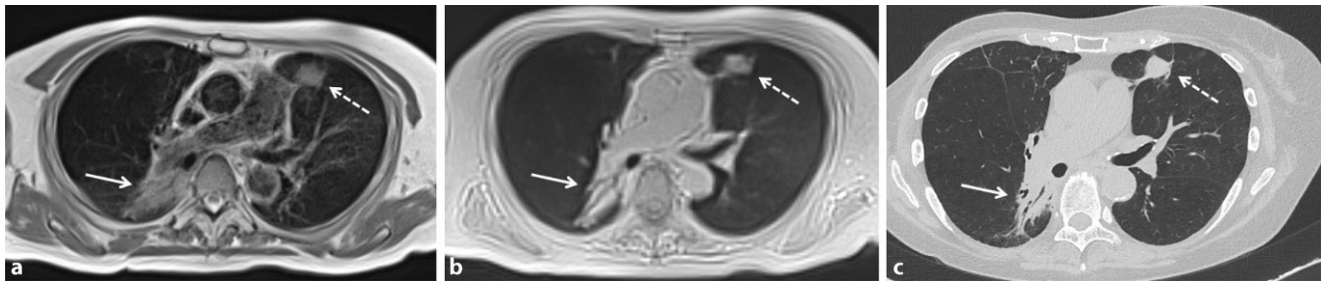
Das sehr geringe Patientenrisiko einer nativen MRT-Untersuchung könnte in Zukunft Einsatzmöglichkeiten bei besonders vulnerablen Patientengruppen und auch neue Indikationsgebiete erschließen. So wären beispielsweise engmaschige Verlaufuntersuchungen nach standardisierten Protokollen mit niedrighen Einschusskriterien möglich. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial für die translationale Forschung, z. B. in multizentrischen Studien zum pathophysiologischen Verständnis akuter und chronischer Lungenerkrankungen [20, 21].

## Funktionelle Lungenbildgebung

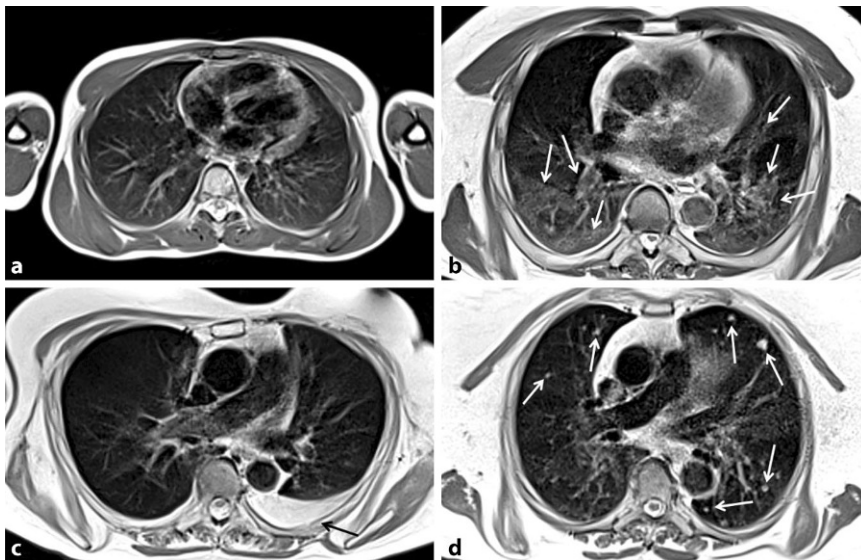
Zusätzlich zur multiparametrischen Charakterisierung der Morphologie des Lungenparenchyms bietet die MRT auch die Möglichkeit, die Gewebefunktion zu untersuchen. Die kontrastmittelgestützte MR-Angiographie der Pulmonalarterien samt Lungenperfusionssmessung bietet eine hohe Sensitivität und Spezifität für Embolien und Perfusionsdefekte. Der Einsatz moderner Verfahren der parallelen Bildgebung erhöht dabei sowohl die zeitliche als auch die räumliche Auflösung [22, 23]. Dies kann die Diagnose von Lungenarterienembolien und deren Folgen bei Patienten mit Kontraindikationen für jodhaltiges Kontrastmittel und eine strahlungsfreie Verlaufsbildgebung zur Evaluation des Therapieerfolgs mit hoher Qualität ermöglichen [24, 25]. Die Perfusion-MRT wurde als Alternative zur Single-Photonen-Emissions-Computertomographie (SPECT) beschrieben und zeigte hier eine vergleich-

Hier steht eine Anzeige.





**Abb. 2** ▲ 67-jährige Patientin mit einem Residuum eines Bronchialkarzinoms in der Lingula (*gestrichelter Pfeil*) und einer Strahlenfibrose im rechten Unterlappen (*Pfeil*) in einer transversalen protonendichtegewichteten (PDw) BLADE-Sequenz (a). Auch in der T1w-UTE („ultrashort echo time“-) Sequenz in Atemanhaltetechnik bei derselben Patientin sind die Pathologien einschließlich des Bronchopneumogramms deutlich zu erkennen und morphologisch zu differenzieren (b). Korrespondierende Computertomographie (5 mm multiplanare Rekonstruktion [MPR], Faltungskern Br60) vom gleichen Tag (c)



**Abb. 3** ▲ Differenzialdiagnose pulmonaler Erkrankungen mittels atemgetriggerten transversalen protonendichtegewichteten (PDw) BLADE-Sequenzen bei 0,55 T in freier Atmung: a unauffällige Lungen-Magnetresonanztomographie (MRT) eines 11-jährigen Jungen zum Ausschluss von Infiltraten bei Fieber unklarer Ursache. Die Eltern hatten eine Röntgen-Thorax-Untersuchung aus Sorge vor der Strahlenbelastung abgelehnt. b 74-jähriger Patient mit bipulmonalen Infiltraten (*Pfeile*) bei COVID-19-Pneumonie. c 69-jährige Patientin mit Pleuraerguss links (*Pfeil*). Die Suszeptibilitätsartefakte links mammär stammen von einer einliegenden Portkammer. d Multiple kleine Lungenmetastasen bei einer 69-jährigen Patientin mit Sigmakarzinom (*exemplarisch mit Pfeilen markiert*)

bare Genauigkeit bei höherer räumlicher Auflösung, z. B. für die Diagnose der chronisch-thrombembolischen pulmonalarteriellen Hypertonie (CTEPH; [3, 22, 26]).

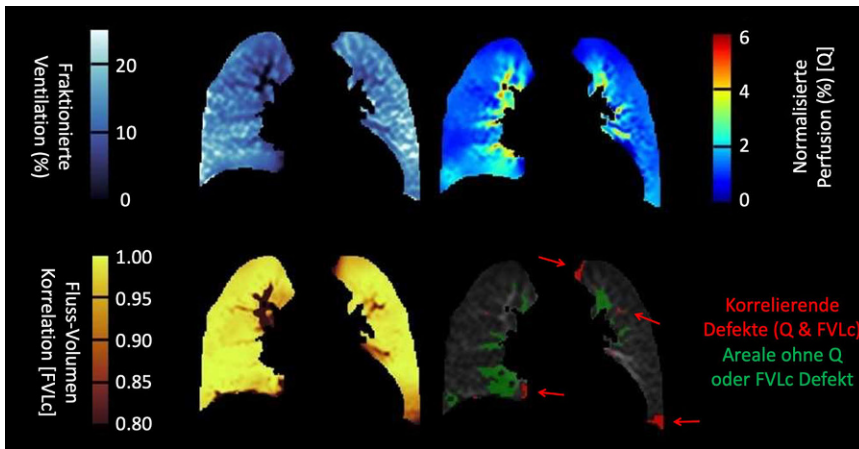
Alternativ zu intravenösem Kontrastmittel kann hyperpolarisiertes Gas (Xenon 123 und Helium 3) als inhalatives Kontrastmittel zur Darstellung der Lungenventilation und -perfusion genutzt werden [27–29]. Da die Herstellung dieser Gase aufwändig ist und die Messung spezielle Spulen benötigt, ist der klinische Stellenwert dieser Technik bisher gering [30]. Eine kostengünstige und unkomplizierte Alternative stellt die inhalative Verwendung von

Sauerstoff dar. Die höhere T1-Relaxation des Sauerstoffs bei niedrigeren Feldstärken verstärkt den Kontrast der Ventilations-Perfusions-MRT, was auch für 0,55 T in der Literatur bereits beschrieben wurde [3]. Die Untersuchung kommt dabei ohne Applikation von zusätzlichem Kontrastmittel aus und bietet die Möglichkeit einer dreidimensionalen Darstellung mit deutlich höherer Auflösung als die Lungenventilationsszintigraphie [31].

Die Fourier-Dekompositions-MRT (FD-MRT) bietet zudem eine nichtinvasive Möglichkeit der Lungenfunktionsdarstellung. Sie benötigt weder den Einsatz

eines intravenösen noch eines inhalativen Kontrastmittels. Die Untersuchung beruht auf den durch Atmung und Pulsation des Blutes verursachten regionalen Intensitätsschwankungen. Diese werden mit einer schnellen, repetitiven Bildakquisition in „steady-state free precession“ (z. B. „true fast imaging with steady-state precession“, TRUFI) oder mit „spoiled gradient echo“ (z. B. „fast low-angle shot“, FLASH) erfasst und mittels Fourier-Dekomposition voneinander getrennt. Die FD-MRT wird in wenigen Minuten in freier Atmung durchgeführt und ist deshalb auch bei niedriger Compliance des Patienten möglich. Sequenzen an modernen 0,55-T-MRT-Geräten kommen dabei mit Akquisitionszeiten von ca. 1:30 bis 1:45 min aus. Die errechneten Ergebnisse von Ventilation und Perfusion können mittels graphischer Ventilations-Perfusions-Karten visualisiert und Störungen somit auch räumlich zugeordnet werden (Abb. 4, [32, 33]).

In ersten eigenen Untersuchungen konnte die funktionelle Beurteilung des Lungenparenchyms mittels Niederfeld-MRT nach COVID-19-Infektionen bei Erwachsenen und Kindern gezeigt werden. Der Verzicht auf die Applikation von intravenösen Kontrastmitteln und ionisierender Strahlung eröffnet auch hier die Möglichkeit der repetitiven Anwendung. Daher könnten regionale Veränderungen der Perfusion und Ventilation im Lungengewebe auch im zeitlichen Verlauf überwacht und zur Stratifizierung von Therapien eingesetzt werden.



**Abb. 4** ▲ Ventilations-Perfusions-Karte einer 57-jährigen Patientin (65 kg, 1,68 m) mit verbleibenden Perfusions- und Ventilationsrestriktionen (rote Pfeile) 7 Monate nach einer COVID-19-Infektion. Zur Erstellung der Lungenfunktionskarten wurde die PREFUL („phase-resolved function lung“)-Technik auf der Basis einer zeitaufgelösten T2w-TRUFI („true fast imaging with steady state precession“)-Sequenz verwendet. Die Patientin hatte zum Zeitpunkt der Aufnahme weder Symptome noch morphologische Lungenveränderungen

## Personalisierte Lungendarstellung

Die multiparametrische und funktionelle Lungen-MRT bietet somit weit mehr als nur eine strahlungsfreie Alternative zur klassischen CT-Untersuchung. Die Vielzahl an Informationen, die über das Lungengewebe und seine Funktion erhoben werden können, kann insbesondere in der zunehmend wichtigen personalisierten Medizin einen Mehrwert generieren. So ist es perspektivisch denkbar, dass die optimale Kombination der einzelnen Sequenzen in der Lungen-MRT nicht nur für im Vorfeld festgelegte klinische Fragestellungen definiert ist.

Mithilfe von intelligenten Algorithmen könnten die Untersuchungsprotokolle direkt am Scanner auf den jeweils aktuellen Symptomkomplex der Patienten angepasst und sogar während der Untersuchung modifiziert werden. So wäre es z. B. denkbar, im Rahmen einer Screening-Untersuchung zunächst nur kurze UTE-Sequenzen auszuwählen, die nur beim Vorhandensein von Lungenläsionen um weitere Sequenzen ergänzt werden. Bei einer Kontrolle von bekannten Rundherden könnten hingegen diffusionsgewichtete Sequenzen im Falle einer Größenzunahme zur weiteren Bestimmung der Entität und zum Nachweis von Lymphknotenmetastasen ergänzt werden. Mittels künstlicher Intelligenz (KI) könnten automatisierte Detektionsalgorithmen in

Zukunft Pathologien bereits während der laufenden Untersuchung automatisiert detektieren und Sequenzen zur weiteren Differenzierung vorschlagen. Neben der Primärdiagnostik könnte dies auch in der personalisierten Therapiestratifizierung und im Therapiemonitoring eine wichtige Bedeutung erlangen. Diese automatisiert generierten Ergebnisse könnten darüber hinaus zur Prognosebeurteilung und Therapieentscheidung genutzt werden. Da dies real-time geschieht, erscheint es zudem möglich, dass diese Informationen durch die Auswahl geeigneter MRT-Sequenzen während der laufenden Untersuchung sogar Einfluss auf die Primärdaten nehmen [34, 35]. Dies kann in Zukunft dazu beitragen, medizinische Therapien engmaschig auf ihre funktionelle und morphologische Wirkung hin zu überwachen, und so stärker patientenindividuelle Stratifizierungsmöglichkeiten klinisch zu etablieren. Die translationale Forschung und Entwicklung sollte so dazu beitragen, die Diagnostik und Überwachung von Lungenerkrankungen in der Patientenversorgung weiter zu stärken.

### Fazit für die Praxis

- Die Magnetresonanztomographie (MRT) der Lunge ermöglicht eine morphologische und funktionelle Charakterisierung des Lungengewebes.
- Die Lungen-MRT könnte insbesondere bei vulnerablen Patientengruppen (Kinder,

Schwangere, repetitive Verlaufskontrollen) einen klinischen Mehrwert bieten.

- Die moderne Niederfeld-MRT profitiert von physikalischen Vorteilen und geringeren Kosten und kann so die Verfügbarkeit verbessern.
- Die Erweiterung der personalisierten Charakterisierung des Lungengewebes durch Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) wird zukünftig eine wichtige Rolle spielen.

### Korrespondenzadresse



#### PD Dr. med. Matthias S. May

Radiologisches Institut, Universitätsklinikum Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)  
Maximiliansplatz 3, 91054 Erlangen, Deutschland  
matthias.may@uk-erlangen.de

**Danksagung.** Die Autoren danken der medizinisch-technischen Radiologieassistentin Sandy Schmidt für ihren großen Einsatz und ihre herausragende technische Expertise. Weiterhin danken die Autoren dem Imaging Science Institute (ISI) Erlangen (Siemens Healthineers, Erlangen) und Dr. Hans-Peter Fautz für die zur Verfügung gestellten Messzeiten und die technische Unterstützung. Unser besonderer Dank gilt auch den Kollegen Dr. Andreas Voskrebenezv und Prof. Dr. Jens Vogel-Claussen, deren PREFUL-Algorithmus für die Auswertung der Lungenfunktionsmessungen verwendet wurde.

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** M. Hinsen, A.M. Nagel und S. Lévy geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht. R. Heiss, M.S. May, S. Bickelhaupt, M. Uder sind im Rahmen von Vortragsveranstaltungen für Siemens Healthineers tätig. Das Universitätsklinikum Erlangen erhält von Siemens Healthineers Unterstützung im Rahmen von Forschungsk Kooperationen.

Alle beschriebenen Untersuchungen am Menschen oder an menschlichem Gewebe wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethikkommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt.



## Literatur

1. Nekolla EA, Schegerer AA, Griebel J et al (2017) Frequency and doses of diagnostic and interventional X-ray applications: trends between 2007 and 2014. *Radiologe* 57:555–562. <https://doi.org/10.1007/s00117-017-0242-y>
2. Traub M, Stevenson M, McEvoy S et al (2007) The use of chest computed tomography versus chest X-ray in patients with major blunt trauma. *Injury* 38:43–47. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2006.07.006>
3. Campbell-Washburn AE (2020) 2019 American thoracic society BEAR cage winning proposal: lung imaging using high-performance low-field magnetic resonance imaging. *Am J Respir Crit Care Med* 201:1333–1336. <https://doi.org/10.1164/rccm.201912-2505ED>
4. Bergin CJ, Glover GH, Pauly JM (1991) Lung parenchyma: magnetic susceptibility in MR imaging. *Radiology* 180:845–848. <https://doi.org/10.1148/radiology.180.3.1871305>
5. Ohno Y, Koyama H, Yoshikawa T et al (2016) Pulmonary high-resolution ultrashort TE MR imaging: comparison with thin-section standard- and low-dose computed tomography for the assessment of pulmonary parenchyma diseases. *J Magn Reson Imaging* 43:512–532. <https://doi.org/10.1002/jmri.25008>
6. Wielpütz MO, Lee HY, Koyama H et al (2018) Morphologic characterization of pulmonary nodules with ultrashort TE MRI at 3T. *AJR Am J Roentgenol* 210:1216–1225. <https://doi.org/10.2214/ajr.17.18961>
7. Campbell-Washburn AE, Ramasawmy R, Restivo MC et al (2019) Opportunities in Interventional and diagnostic imaging by using high-performance low-field-strength MRI. *Radiology* 293:384–393. <https://doi.org/10.1148/radiol.2019190452>
8. Hatabu H, Ohno Y, Gefter WB et al (2020) Expanding applications of pulmonary MRI in the clinical evaluation of lung disorders: Fleischner society position paper. *Radiology* 297:286–301. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020201138>
9. Pipe JG (1999) Motion correction with PROPELLER MRI: application to head motion and free-breathing cardiac imaging. *Magn Reson Med* 42:963–969. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1522-2594\(199911\)42:5<963::aid-mrm17>3.0.co;2-I](https://doi.org/10.1002/(sici)1522-2594(199911)42:5<963::aid-mrm17>3.0.co;2-I)
10. Biederer J, Hintze C, Fabel M (2008) MRI of pulmonary nodules: technique and diagnostic value. *Cancer Imaging* 8:125–130. <https://doi.org/10.1102/1470-7330.2008.0018>
11. Meier-Schroers M, Homs R, Schild HH et al (2019) Lung cancer screening with MRI: characterization of nodules with different non-enhanced MRI sequences. *Acta Radiol* 60:168–176. <https://doi.org/10.1177/0284185118778870>
12. Javed A, Ramasawmy R, O'Brien K et al (2021) Self-gated 3D stack-of-spirals UTE pulmonary imaging at 0.55T. *Magn Reson Med*. <https://doi.org/10.1002/mrm.29079>
13. Qi LP, Zhang XP, Tang L et al (2009) Using diffusion-weighted MR imaging for tumor detection in the collapsed lung: a preliminary study. *Eur Radiol* 19:333–341. <https://doi.org/10.1007/s00330-008-1134-3>
14. Liu J, Yang X, Li F et al (2011) Preliminary study of whole-body diffusion-weighted imaging in detecting pulmonary metastatic lesions from clear cell renal cell carcinoma: comparison with CT. *Acta Radiol* 52:954–963. <https://doi.org/10.1258/ar.2011.110121>

## Imaging of the lung using low-field magnetic resonance imaging

**Background:** Lung magnetic resonance imaging (MRI) examinations are challenging and have not become established in the routine clinical setting. Recent developments in low-field MRI, combined with computer-assisted algorithms for acquisition and evaluation, promise new perspectives for imaging of pulmonary diseases.

**Objectives:** This review aims to inform about the physical advantages of low-field MRI for imaging the lungs, provide a review of the sparse literature, and present first results from a new low-field MRI scanner.

**Materials and methods:** This article provides information on the physical principles, an review of the literature, and our first experiences in lung imaging on a modern 0.55 T MRI.

**Conclusion:** Low-field MRI (< 1 T) may have technical and economic advantages over higher field strength MRI in lung imaging. The physical preconditions of low-field MRI are advantageous for imaging the lungs due to reduced susceptibility effects, increased transversal relaxation times, and lower specific absorption rates. The lower investment and operating costs may enable increased availability and sustainability. Combining modern sequences and computer-based image processing may expand beyond morphological imaging by providing spatially and temporally resolved functional examinations of the lung parenchyma without ionizing radiation. In critical scenarios, like screening and short-term follow-up examinations, and patients at risk, low-field MRI may bridge the gap. These indications may include acute and chronic pulmonary diseases in pediatric patients and suspected pulmonary embolisms in pregnant women.

## Keywords

Lung imaging · Field strength · Low-field system · Image quality · Functional analysis

15. Li B, Li Q, Chen C et al (2014) A systematic review and meta-analysis of the accuracy of diffusion-weighted MRI in the detection of malignant pulmonary nodules and masses. *Acad Radiol* 21:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2013.09.019>
16. Sodhi KS, Sharma M, Saxena AK et al (2017) MRI in thoracic tuberculosis of children. *Indian J Pediatr* 84:670–676. <https://doi.org/10.1007/s12098-017-2392-3>
17. Heiss R, Grodzki DM, Horger W et al (2021) High-performance low field MRI enables visualization of persistent pulmonary damage after COVID-19. *Magn Reson Imaging* 76:49–51. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2020.11.004>
18. Anjorin A, Schmidt H, Posselt HG et al (2008) Comparative evaluation of chest radiography, low-field MRI, the Shwachman-Kulczycki score and pulmonary function tests in patients with cystic fibrosis. *Eur Radiol* 18:1153–1161. <https://doi.org/10.1007/s00330-008-0884-2>
19. Wielpütz MO, von Stackelberg O, Stahl M et al (2018) Multicentre standardisation of chest MRI as radiation-free outcome measure of lung disease in young children with cystic fibrosis. *J Cyst Fibros* 17:518–527. <https://doi.org/10.1016/j.jcf.2018.05.003>
20. Ciet P (2021) MRI in interstitial lung disease (M-ILD): a momentum to innovate lung diagnostic. *Thorax*. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2020-216382>
21. Heiss R, Nagel AM, Laun FB et al (2021) Low-field magnetic resonance imaging: a new generation of breakthrough technology in clinical imaging. *Invest Radiol* 56:726–733. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000805>
22. Fink C, Puderbach M, Bock M et al (2004) Regional lung perfusion: assessment with partially parallel three-dimensional MR imaging. *Radiology* 231:175–184. <https://doi.org/10.1148/radiol.2311030193>
23. Leung DA, McKinnon GC, Davis CP et al (1996) Breath-hold, contrast-enhanced, three-dimensional MR angiography. *Radiology* 200:569–571. <https://doi.org/10.1148/radiology.200.2.8685359>
24. Kluge A, Gerriets T, Lange U et al (2005) MRI for short-term follow-up of acute pulmonary embolism. Assessment of thrombus appearance and pulmonary perfusion: a feasibility study. *Eur Radiol* 15:1969–1977. <https://doi.org/10.1007/s00330-005-2760-7>
25. Allen BD, Schiebler ML, François CJ (2020) Pulmonary vascular disease evaluation with magnetic resonance angiography. *Radiol Clin North Am* 58:707–719. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2020.02.006>
26. Johns CS, Swift AJ, Rajaram S et al (2017) Lung perfusion: MRI vs. SPECT for screening in suspected chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *J Magn Reson Imaging* 46:1693–1697. <https://doi.org/10.1002/jmri.25714>
27. Willmering MM, Niedbalski PJ, Wang H et al (2020) Improved pulmonary (129)Xe ventilation imaging via 3D-spiral UTE MRI. *Magn Reson Med* 84:312–320. <https://doi.org/10.1002/mrm.28114>
28. Lee EY, Sun Y, Zurakowski D et al (2009) Hyperpolarized <sup>3</sup>He MR imaging of the lung: normal range of ventilation defects and PFT correlation in young adults. *J Thorac Imaging* 24:110–114. <https://doi.org/10.1097/RTI.0b013e3181909f4a>
29. Woods JC, Conradi MS (2018) (3)He diffusion MRI in human lungs. *J Magn Reson* 292:90–98. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2018.04.007>

## Fachnachrichten

30. Altes TA, Salerno M (2004) Hyperpolarized gas MR imaging of the lung. *J Thorac Imaging* 19:250–258. <https://doi.org/10.1097/01.rti.0000142837.52729.38>
31. Ohno Y, Nishio M, Koyama H et al (2014) Oxygen-enhanced MRI for patients with connective tissue diseases: comparison with thin-section CT of capability for pulmonary functional and disease severity assessment. *Eur J Radiol* 83:391–397. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2013.11.001>
32. Bauman G, Puderbach M, Deimling M et al (2009) Non-contrast-enhanced perfusion and ventilation assessment of the human lung by means of fourier decomposition in proton MRI. *Magn Reson Med* 62:656–664. <https://doi.org/10.1002/mrm.22031>
33. Voskresbenzev A, Gutberlet M, Klimeš F et al (2018) Feasibility of quantitative regional ventilation and perfusion mapping with phase-resolved functional lung (PREFUL) MRI in healthy volunteers and COPD, CTEPH, and CF patients. *Magn Reson Med* 79:2306–2314. <https://doi.org/10.1002/mrm.26893>
34. Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H (2016) Radiomics: images are more than pictures, they are data. *Radiology* 278:563–577. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015151169>
35. Aerts HJ, Velazquez ER, Leijenaar RT et al (2014) Decoding tumour phenotype by noninvasive imaging using a quantitative radiomics approach. *Nat Commun* 5:4006. <https://doi.org/10.1038/ncomms5006>

Die Anaesthesiologie	Die Innere Medizin	Die Pathologie
Die Chirurgie	Die Kardiologie	Zeitschrift für Pneumologie
Die Dermatologie	Die MKG-Chirurgie	Die Psychotherapie
Die Diabetologie	Die Nephrologie	Die Radiologie
Die Gastroenterologie	Die Ophthalmologie	Die Unfallchirurgie
Die Gynäkologie	Die Orthopädie	Die Urologie

### Und wenn der Facharzt eine Frau ist?

**Im Zuge einer breit angelegten Gleichstellungsinitiative des Springer Medizin Verlages werden die bisherigen, auf männlichen Berufsbezeichnungen basierenden Titel durch neue, auf die Fachgebiete bezogene Titel ersetzt. Damit die Fachzeitschriften auch außen wieder up to date sind.**

Die Fachzeitschriften des Springer Medizin Verlags gehen mit den berufs- und gesellschaftspolitischen Entwicklungen und erscheinen ab ihren Juni- bzw. Juliausgaben mit neuen Titeln. Das Titelkonzept trägt auch einem geänderten Umgang mit Sprache Rechnung und verfolgt das Prinzip, dass zukünftig das Fachgebiet und nicht mehr die männliche Berufsbezeichnung im Fokus steht. So wird aus „Der Internist“ ab Juni die Fachzeitschrift „Die Innere Medizin“, oder „Der Chirurg“ heißt künftig „Die Chirurgie“. Diese Änderungen betreffen 21 Zeitschriften, die bei Springer Medizin erscheinen und Teil der Fachverlagsgruppe Springer Nature sind. Sie sind eine von vielen Maßnahmen innerhalb Springer Nature. Auf dem Portal Springer Medizin: [www.springermedizin.de/titelupdate](http://www.springermedizin.de/titelupdate) findet sich eine Übersicht aller betreffenden Zeitschriften samt detaillierten Erklärungen zu Motiven und Hintergründen.

Die Medizin ist schon lange nicht mehr männlich, wie es noch zu Gründungszeiten einiger Springer Fachzeitschriften der Fall war. Seit 1999 machen Frauen eine klare Mehrheit unter den Studierenden aus, im Jahr 2020 belief sich ihr Anteil auf knapp zwei Drittel. Im Berufsalltag liegt der Frauenanteil bei fast 50%, in einigen Bereichen auch deutlich höher. „Diesem Wandel in der Medizin werden wir Rechnung tragen“, erklärt Dr. Paul Herrmann, Director Journals und ePublishing von Springer Medizin. „Als einer der führenden Verlage in der Wissenschaftskommunikation geben wir jetzt ein klares Signal und machen Geschlech-

tergerechtigkeit in der Medizin an dieser Stelle sichtbar.“

Unverändert bleibt bei den Springer Fachzeitschriften die inhaltliche Ausrichtung; diese unterliegen weiterhin einer praxisrelevanten Aufbereitung und Kommunikation von Forschungsergebnissen in den Fachgebieten. Ebenso garantiert wird eine kontinuierliche Sichtbarkeit innerhalb der internationalen Wissenschaftscommunity: Ein intensiver Austausch mit relevanten internationalen Wissenschaftsdatenbanken sowie deren Offenheit und Support für das Thema garantiert, dass der Wechsel der Titel ohne nachteilige Konsequenzen verlaufen wird und eine Listing oder ein vorhandener Impact Factor bestehen bleibt.

Mehr zur Titeländerung finden Sie auf [www.springermedizin.de/titelupdate](http://www.springermedizin.de/titelupdate) oder direkt über diesen QR-Code:



Hier steht eine Anzeige.

