

Radiologie 2014 · 54:470–477
 DOI 10.1007/s00117-013-2604-4
 Online publiziert: 24. April 2014
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

G. Sommer¹ · M. Koenigkam-Santos² · J. Biederer³ · M. Puderbach⁴

¹ Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin, Universitätsspital Basel, Basel

² Department of Radiology, University Hospital of the

School of Medicine of Ribeirao Preto – University of Sao Paulo, Ribeirao Preto

³ Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Heidelberg, Heidelberg

⁴ Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Hufeland-Klinikum GmbH, Bad Langensalza

Rolle der MRT zur Detektion und Abklärung pulmonaler Rundherde

Die technischen Weiterentwicklungen in den vergangenen Jahren haben die MRT zu einem methodisch ausgereiften und für spezifische pulmonale Fragestellungen längst auch klinisch bewährten Untersuchungsverfahren gemacht. Entgegen der vielfach noch vertretenen Ansicht, bei niedriger Protonendichte, kurzen T2*-Relaxationszeiten des Lungenparenchyms, Magnetfeldinhomogenitäten und Bewegungsartefakten durch Herzschlag und Atmung sei die Methodik für die bildgebende Diagnostik der Lunge ungeeignet, wurden Robustheit und Reproduzierbarkeit der Bildqualität entscheidend verbessert. Ohne Strahlenexposition kombiniert die MRT morphologische und funktionelle Diagnostik und ergänzt das Spektrum der etablierten Verfahren für die bildgebende Diagnostik der Lunge in idealer Weise. Strukturierte Protokolle erlauben auch neuen Anwendern einen raschen Einstieg in die effiziente Anwendung der neuen Methodik. Mit speziellem Fokus auf die Detektion und Abklärung pulmonaler Rundherde gibt diese Arbeit einen Überblick über die aktuell verwendeten Sequenzen und Techniken und erörtert deren klinischen Stellenwert anhand der aktuellen Studienlage. In Zentrum stehen dabei die Detektion pulmonaler Metastasen, die Detektion primär pulmonaler Malignome bei Personen mit Risikoprofil (Lungenkrebscreening) und die Abklärung pulmonaler Rundherde hinsichtlich ihrer Dignität.

Technische Anmerkungen

MRT-Untersuchungen der Lunge werden bevorzugt an Ganzkörpermagnetresonanztomographen der Feldstärke 1,5 T durchgeführt. Bauformen, welche mit einer höheren Homogenität des statischen Magnetfelds und der Gradientenfelder einhergehen (kleinerer Durchmesser und größere Länge des Magneten) wirken sich dabei positiv auf die Bildqualität aus. Die Machbarkeit von Untersuchungen der Lunge wurde auch bei 3 T für alle gängigen Sequenzen gezeigt. Während v. a. Gradientenechosequenzen an Signal-zu-Rausch-Verhältnis von der höheren Feldstärke profitieren, bedeutet die höhere Feldstärke bei anderen Sequenzen aufgrund der deutlich stärker ausgeprägten Suszeptibilitäts- und Inhomogenitätseffekte eher eine Qualitätseinbuße [9]. Zur Signaldetektion werden Mehrkanaloberflächenempfangsspulen verwendet, welche in Kombination mit Methoden der parallelen Bildgebung für die meisten der aktuell verwendeten Untersuchungssequenzen die Akquisition der gesamten Lunge innerhalb eines Atemstillstands von 10–20 s erlauben.

Als standardisiertes Protokoll für die klinische Anwendung liegen mittlerweile Konsensempfehlungen eines internationalen Gremiums von Anwendern der Lungen-MRT vor [3, 30]. Demnach wird für die Detektion pulmonaler Rundherde

ein Basisprotokoll empfohlen, welches folgende Sequenzen umfasst:

- T2-gewichtete, schnelle Spinecho(SE)-Sequenzen mit Half-Fourier-acquired-single-shot-turbo-spin-echo(HASTE)- oder Partial-Fourier-Akquisition in koronaler und transversaler Orientierung;
- Balanced-steady-state-free-precession(b-SSFP)-Sequenzen in koronaler und transversaler Orientierung;
- T1-gewichtete 3-D-Gradientenecho(GRE)-Sequenzen mit Volumeninterpolation („volume interpolated breathhold examination“, VIBE) in koronaler und transversaler Orientierung;
- T2-gewichtete Turbospinechosequenzen mit Fettunterdrückung, sog. STIR („short tau inversion recovery“).

Fakultativ können mit dem Ziel einer verbesserten Gewebecharakterisierung ergänzt werden:

- Diffusionsgewichtete Sequenzen („diffusion-weighted imaging“, DWI), meist kombiniert mit STIR-Fettunterdrückung, transversale Orientierung;
- dynamische Kontrastmittelverstärkte Bildgebung (basierend auf schnellen GRE-Sequenzen);
- T1-gewichtete 3-D-GRE mit Fettsättigung nach Kontrastmittelgabe.

Für eine genauere Beschreibung der genannten Sequenzen und der üblichen

Hier steht eine Anzeige



Tab. 1 Sensitivität der MRT für die Detektion pulmonaler Rundherde in Abhängigkeit von der Läsionsgröße

Autor	Jahr	Feldstärke (T)	Sequenz	Patienten/Läsionen	Referenzstandard	Größe (mm)	Sensitivität (%)
Biederer et al. [4]	2003	1,5	2-D-GRE	-/366	Phantom	4,2	84
						5,6	94
						7	98
			3-D-GRE			4,2	88
						5,6	95
						7	98
			T2w-TSE			4,2	69
						5,6	90
						7	97
Regier et al. [20]	2007	3	3-D-GRE	-/67	Phantom	2–5	73,3–86,7
						6–10	88–96
						>10	100
			HASTE			2–5	46,7–60
						6–10	76–88
						>10	92,6–96,3
Schroeder et al. [25]	2005	1,5	HASTE	30/1102	CT	<3	73,6
						3–5	84,3
						6–10	95,7
						>10	100
						Vogt et al. [28]	2004
						11–30	97,4
						>30	100

GRE Gradientenecho, TSE Turbospinecho, HASTE „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“.

Tab. 2 Sensitivität der MRT für die Detektion pulmonaler Rundherde in Abhängigkeit von der Pulssequenz

Autor	Jahr	Feldstärke (T)	Sequenz	Patienten/Läsionen	Referenzstandard	Größe (mm)	Sensitivität (%)
Both et al. [5]	2005	1,5	VIBE	20/15	MDCT	3–21	80
			HASTE				60
			T2w-TSE (getriggert)				46,7
Bruegel et al. [7]	2007	1,5	STIR (getriggert)	28/225	MDCT	1–31	72
			STIR (ungetriggert)				63,4
			TSE				69
			VIBE				52–55,6
Frericks et al. [10]	2008	1,5	STIR	31/268	MDCT	2–75	91,1–92,5
			T2w-TSE				90,8
			VIBE				87,3
Heye et al. [12]	2012	1,5	b-SSFP	28/108	MDCT	2–25	53
			HASTE				49
			VIBE (nativ)				57
			VIBE (post KM)				59
Koyama et al. [15]	2008	1,5	T1w-SE (getriggert)	161/200	Pathologie, Verlauf	10–30	82,5
			T2w-TSE				82,5
			STIR				82,5
Koyama et al. [16]	2010	1,5	STIR-TSE	32/33	Pathologie	5–69	100
			DWI				85

VIBE „volume interpolated breathhold examination“, HASTE „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, TSE Turbospinecho, STIR „short tau inversion recovery“, MDCT Multidetector-CT, b-SSFP „balanced steady-state free precession“, KM Kontrastmittel, DWI „diffusion-weighted imaging“.

Parameter wird auf die Übersichtsarbeit von Biederer et al. [3] verwiesen. Die Gesamtdauer einer MRT-Untersuchung der Lunge variiert zwischen 15 min für rein morphologisch orientierte Untersuchungsprotokolle ohne Kontrastmittelapplikation und 30 min bei zusätzlicher Durchführung funktioneller Sequenzen (DWI, Dynamic-contrast-enhanced [DCE]-MRI) und Kontrastmittelgabe.

Detektion maligner pulmonaler Rundherde

Ein Verfahren zur Detektion maligner pulmonaler Rundherde ist v. a. im Rahmen von 2 klinischen Indikationen gefragt: Zum einen die Suche nach pulmonalen Metastasen eines bereits bekannten Malignoms im Rahmen von Staging und Nachsorge, und zum anderen die Detektion primär pulmonaler maligner Veränderungen bei Personen mit Risikoprofil im Sinne einer Früherkennung. Während sich die beiden Fragestellungen aus technischer Sicht weitgehend entsprechen (es werden jeweils Gewebeneubildungen ähnlicher Morphologie im Organ Lunge erfasst), stellen die klinischen und epidemiologischen Eckdaten beider Szenarien je nach Prävalenz pathologischer Veränderungen und der klinischen Konsequenz der realisierbaren Detektionsraten unterschiedlich Ansprüche an die Methodik. Dies hat großen Einfluss auf die Bewertung der MRT für die jeweilige Fragestellung. Ergebnisse zur Sensitivität und Spezifität einer Methode, die an einer definierten Population und Tumorentität gewonnen wurden, lassen sich nicht ohne Weiteres auf Szenarien mit anderen Prätestwahrscheinlichkeiten und Prävalenzen übertragen.

Von beiden möglichen Szenarien entsprechen die aktuell verfügbaren Daten am ehesten der Situation in einem Nachsorgekollektiv mit vergleichsweise hoher Prävalenz von Befunden. Rückschlüsse auf die Wertigkeit z. B. eines Lungenkarzinomscreenings mit MRT lassen sich aus diesen Daten nur begrenzt ableiten. Insbesondere fehlen Untersuchungen zur Rate falsch-positiver (eine weitere kostspielige Abklärung auslösender) MRT-Befunde in Niedrigprävalenzkollektiven. Gezielte Untersuchungen zu diesem besonderes

kritischen Faktor bei der Berechnung der Kosten-Nutzen-Relation von Screeningprogrammen sind dringend erforderlich.

Die technischen Möglichkeiten der heute etablierten MRT-Sequenzen (s. oben) zur Detektion von Gewebeneubildungen in der Lungen sind weitgehend bekannt. Systematische Daten wurden zunächst in Phantomstudien generiert [4, 20] und später durch klinische Daten ergänzt (■ **Tab. 1**). In Abhängigkeit von der Läsionsgröße und der eingesetzten Sequenztechnik finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben zur Sensitivität der MRT für pulmonale Noduli. Schroeder et al. [25] berichteten in einer systematischen Analyse bzgl. Abhängigkeit der Sensitivität von der Läsionsgröße für die T2-gewichtete HASTE-Bildgebung eine Sensitivität von 73% für Läsionen <3 mm, 86,3% für Läsionen zwischen 3 und 5 mm, 95,7% für Läsionen zwischen 6 und 10 mm und 100% für Läsionen >10 mm. Entsprechende Werte für die T1-gewichteten 2-D- und 3-D-GRE-Sequenzen wurden in den Ex-vivo-Phantomstudien von Biederer et al. [4] und Regier et al. [20] publiziert und lassen ebenfalls eine Abhängigkeit der Detektionsrate von der Läsionsgröße erkennen (■ **Tab. 1**).

Insgesamt wird die Sensitivität T2-gewichteter Spinecho- und Turbospinechosequenzen höher angegeben als die der T1-gewichteten GRE- und der b-SSFP-Sequenzen. Die publizierten Werte schwanken abhängig von Läsionsgröße und Studienpopulation zwischen 50 und 100% (■ **Tab. 2**). Auch wenn einzelne, kürzlich veröffentlichte Arbeiten die MRT für die Detektion maligner pulmonaler Rundherde als äquivalent zur Multidetektor-CT (MDCT) darstellen [15], lässt sich eine solche Aussage als Metaanalyse aus den vorliegenden Daten noch nicht ableiten. Die in der Literatur vorhandenen Daten wurden zum einen mit sehr unterschiedlichen Gerätegenerationen und Sequenztechniken und zum anderen an sehr unterschiedlichen, z. T. gemischten Kollektiven erhoben. Es ist naheliegend anzunehmen, dass die Sensitivität verschiedener Sequenzen für pulmonale Noduli auch von der Art und Zusammensetzung der Noduli bestimmt wird. Zum Beispiel können verkalkte Noduli aufgrund ihres

Radiologe 2014 · 54:470–477 DOI 10.1007/s00117-013-2604-4
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

G. Sommer · M. Koenigkam-Santos · J. Biederer · M. Puderbach Rolle der MRT zur Detektion und Abklärung pulmonaler Rundherde

Zusammenfassung

Hintergrund. Mit den technischen Weiterentwicklungen in den vergangenen Jahren hat sich die MRT zu einem methodisch ausgereiften und für spezifische pulmonale Fragestellungen bereits auch klinisch bewährten Untersuchungsverfahren entwickelt. Ohne Strahlenexposition kombiniert sie morphologische und funktionelle Diagnostik und ergänzt das Spektrum der etablierten Verfahren für die bildgebende Diagnostik der Lunge.

Ziel der Arbeit und Methoden. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die aktuell verwendeten Sequenzen und Techniken zur Darstellung pulmonaler Rundherde und analysiert deren klinischen Stellenwert anhand der aktuellen Studienlage. In Zentrum stehen dabei die Detektion pulmonaler Metastasen, die Detektion primär pulmonaler Malignome bei Personen mit Risikoprofil und die Abklärung pulmonaler Rundherde hinsichtlich ihrer Dignität.

Ergebnisse und Diskussion. Die MRT besitzt im Vergleich zum Referenzstandard Niedrig-

dosis-CT eine Sensitivität von ca. 80% für die Detektion maligner pulmonaler Rundherde und ist der CT damit etwas unterlegen. Vorteile der MRT gegenüber der Niedrigdosis-CT sind andererseits die höhere Spezifität bei der Differenzierung maligner und benigner pulmonaler Rundherde sowie die fehlende Strahlenexposition. Außerhalb von Studien kann ein breiter Einsatz der MRT als Screeningverfahren zur Detektion und Abklärung pulmonaler Rundherde aufgrund der noch ungenügenden Datenlage derzeit noch nicht empfohlen werden. Das diagnostische Potenzial der MRT für die Früherkennung und das Staging pulmonaler Malignome rechtfertigt aber die weitere Evaluation der MRT als sekundäre Modalität im Rahmen von Studien.

Schlüsselwörter

Bösartige Gewebeneubildungen · Bildgebende Diagnostik · Früherkennung · Tumorstaging · Zufallsbefunde

Role of MRI for detection and characterization of pulmonary nodules

Abstract

Background. Due to physical and technical limitations, magnetic resonance imaging (MRI) has hitherto played only a minor role in image-based diagnostics of the lungs. However, as a consequence of important methodological developments during recent years, MRI has developed into a technically mature and clinically well-proven method for specific pulmonary questions.

Objectives and methods. The purpose of this article is to provide an overview on the currently available sequences and techniques for assessment of pulmonary nodules and analyzes the clinical significance according to the current literature. The main focus is on the detection of lung metastases, the detection of primary pulmonary malignancies in high-risk individuals and the differentiation between pulmonary nodules of benign and malignant character.

Results and conclusion. The MRI technique has a sensitivity of approximately 80%

for detection of malignant pulmonary nodules compared to the reference standard low-dose computed tomography (CT) and is thus somewhat inferior to CT. Advantages of MRI on the other hand are a higher specificity in differentiating malignant and benign pulmonary nodules and the absence of ionizing radiation exposure. A systematic use of MRI as a primary tool for detection and characterization of pulmonary nodules is currently not recommended due to insufficient data. The diagnostic potential of MRI for early detection and staging of malignant pulmonary diseases, however, seems promising. Therefore, further evaluation of MRI as a secondary imaging modality in clinical trials is highly warranted.

Keywords

Malignant neoplasms · Imaging diagnostics · Early detection · Neoplasm staging · Incidental findings

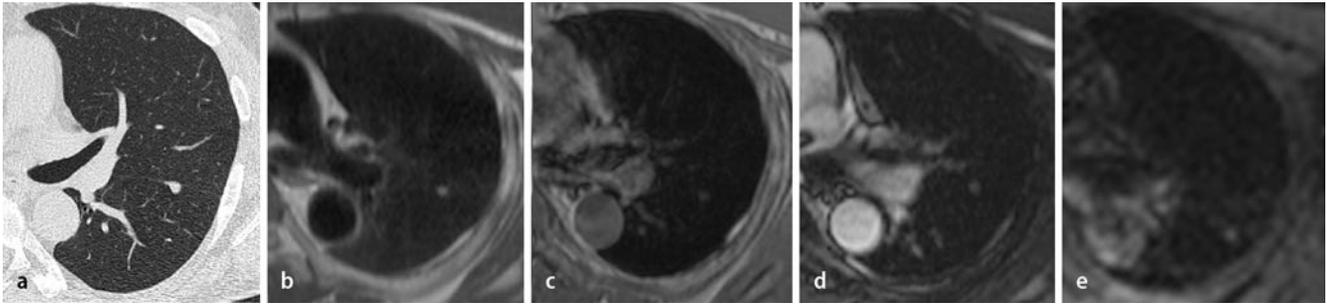


Abb. 1 ▲ Beispielhafte Darstellung eines 7 mm großen pulmonalen Rundherds in der Niedrigdosis-CT (a) und im MRT unter Verwendung verschiedener Sequenzen: **b** T2w-HASTE, **c** T1w-VIBE, **d** b-SSFP, **e** DWI mit $b=600 \text{ s/mm}^2$. Eine Größenkonstanz im Verlauf charakterisierte die Läsion letztlich als gutartig. HASTE, „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, VIBE, „volume interpolated breathhold examination“, b-SSFP, „balanced steady-state free precession“, DWI, „diffusion-weighted imaging“

geringen Signals übersehen werden. Darüber hinaus wurden in der Regel keine gesunden Individuen als Negativkontrollen in die Studien eingeschlossen. Entsprechend dem Bayes-Theorem sind daher alle Betrachtungen zum negativen prädiktiven Wert der Lungen-MRT vorsichtig zu interpretieren.

Die Anwendung der diffusionsgewichteten MRT kann mittlerweile auch außerhalb neurologischer Fragestellungen als etabliert bezeichnet werden. Verbreitet ist insbesondere die Verwendung der DWI als Ganzkörperuntersuchung im Rahmen von Staging und Nachsorge bei onkologischen Erkrankungen. In diesem Zusammenhang wurde in einzelnen Studien auch die Aussagekraft der DWI zur Detektion von Lungenrundherden untersucht. So ermittelten Koyama et al. [16] in ihrer Studie an 32 Patienten mit nichtkleinzelligem Bronchialkarzinom eine Sensitivität von 85% für die DWI, welche jedoch deutlich geringer war als die am gleichen Kollektiv ermittelten 100% mit der STIR-Sequenz. Nach derzeitiger Datenlage bietet die zusätzliche Durchführung von DWI-Sequenzen keinen Vorteil im Hinblick auf die Sensitivität der Gesamtuntersuchung.

Ein Beispiel zur Detektion eines pulmonalen Rundherds unter Verwendung der genannten Sequenzen ist in **Abb. 1** dargestellt.

Detektion primär pulmonaler Malignome bei Personen mit Risikoprofil (Screening)

Programme zum Lungenkrebscreening mithilfe bildgebender Verfahren außer-

halb der großen Studien sind bisher nicht etabliert. Neu belebt wurde die Diskussion dieser Thematik durch die jüngsten Veröffentlichungen aus groß angelegten Screeningstudien [1, 2], in welchen gezeigt wurde, dass durch die Verwendung der Niedrigdosis-MDCT eine relative Reduktion der lungenkrebspezifischen Mortalität von bis zu 20% in einem Risikokollektiv erreicht werden kann. Dieser auf den ersten Blick beeindruckenden Zahl steht jedoch für das einzelne Individuum aufgrund der häufig wiederholten Untersuchungen eine erhebliche Strahlenexposition gegenüber. Brenner [6] berechnete, dass für eine Population aktiver und ehemaliger Raucher im Alter zwischen 50 und 75 Jahren das zusätzliche Krebsrisiko durch jährliche Niedrigdosis-CT-Untersuchungen zu Screeningzwecken um 0,5–5,5% steigt. Dies ist ein keinesfalls zu vernachlässigender Effekt, der den Benefit des CT-basierten Screenings in Hinblick auf die krebspezifische Mortalität signifikant schmälert. Die Frage nach der Anwendbarkeit der MRT als Screeningverfahren, das im Gegensatz zur CT mit keinerlei strahlungsassoziiertem Krebsrisiko verbunden ist, erscheint vor diesem Hintergrund folgerichtig.

Ob die MRT geeignet ist, an Stelle der Niedrigdosis-CT als Methode der ersten Wahl innerhalb von Screeningprogrammen zu fungieren, ist in erster Linie durch ihre Sensitivität bestimmt: Die bisher einzige Studie zum Einsatz der MRT beim Screening von Risikopersonen ermittelte unter Verwendung morphologischer Sequenzen eine Sensitivität der MRT für maligne pulmonale Rundherde von 78%

[27]. Die minimal akzeptable Sensitivität und Spezifität für das Mammographie-screening wurden in einer systematischen Analyse der diagnostischen Leistungskriterien mit 75 und 88% angegeben [8]. In Anbetracht dieser Zahlen und der Tatsache, dass die MRT im Gegensatz zu den röntgenbasierten Verfahren die Möglichkeit bietet, Screeningintervalle ohne Zunahme der Strahlenbelastung zu verkürzen, erscheint die MRT durchaus als primäre Screeningmodalität geeignet. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Bestätigung, dass die postulierte Sensitivität der MRT von >75% auch in größeren Kollektiven erreicht wird.

Eine zweite mögliche Rolle der MRT innerhalb von Screeningprogrammen ist die Anwendung als Ergänzung zur Niedrigdosis-CT mit dem Ziel der Reduktion falsch-positiver Befunde. Sie betrifft im Wesentlichen die Frage der Spezifität und des PPV (positiver prädiktiver Wert). Auch hier liegen die von Sommer et al. [27] ermittelten Werte mit einer Spezifität von 88% und einem PPV von 87% im unteren akzeptablen Bereich, wobei insbesondere die Anzahl der falsch-positiven Resultate (5%) deutlich geringer ausfiel als die in der ersten Runde des NLST (National Lung Screening Trial) für die Niedrigdosis-CT berichteten Werte (23,3%). Bei diesem Vergleich müssen jedoch die unterschiedlichen Prävalenzen für maligne Herde (20% bei Sommer et al. [27] vs. 1% für ein typisches Screeningkollektiv [2]) limitierend berücksichtigt werden. Daten, welche eine Lungenkrebs-screeningsituation unter Verwendung der MRT im Verhältnis 1:1 abbilden, existie-

Tab. 3 Ausgewählte Studien zum Stellenwert der MRT für die Abklärung pulmonaler Rundherde^a

Autor	Jahr	Feldstärke (T)	Methode	Patienten/Läsionen	Größe (mm)	Sensitivität (%)	Spezifität (%)	Genauigkeit (%)
Kono et al. [14]	2007	0,5	DCE-MRI „maximum enhancement“	202/202	10–30	81	81	80,7
			„Slope of enhancement“			94	96	94,2
			„Wash-out“			83	63	80,1
Koyama et al. [15]	2008	1,5	T1w-SE (getriggert)	161/200	10–30	83,8–87,9	37,9–39,4	66,1–67,9
			T2w-TSE			80,8–86,9	37,9–48,5	67,3–67,9
			STIR			82,8–83,8	54,5–60,6	71,5–74,5
Liu et al. [17]	2010	1,5	DWI	62/66	1,6–10	83,3	74,1	n. v.
Mori et al. [18]	2008	1,5	DWI	104/140	5–70	70	97	76
Ohno et al. [19]	2008	1,5	DCE-MRI „maximum enhancement“	175/202	6–29	96	54	85,6
			„Slope of enhancement“			96	64	88,1
Satoh et al. [22]	2008	1,5	DWI	51/54	7–132	88,9	61,1	79,6
Schaefer et al. [24]	2004	1,0	DCE-MRI „maximum enhancement“	58/58	5–40	96	88	92
			„Slope of enhancement“			96	75	86
			„Wash-out“			52	100	75

^aDifferenzierung benigne vs. maligne. *DCE-MRI* „dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging“, *SE* Spinecho, *TSE* Turbospinecho, *STIR* „short tau inversion recovery“, *DWI* „diffusion-weighted imaging“.

ren aktuell nicht. Ebenso fehlen Daten zur Anwendung funktioneller MRT-Methoden wie DWI und DCE-MRI bei Screeningkollektiven.

Abklärung/Charakterisierung pulmonaler Rundherde

Die Frage der Differenzierung maligner und benigner Rundherde mithilfe bildgebender Verfahren ist von hoher klinischer Relevanz. Gefordert ist eine maximale Spezifität des Verfahrens, um die Rate invasiver Abklärungen oder multipler Verlaufskontrollen falsch-positiver Befunde (einschließlich der damit verbundenen Komplikationsraten mit Belastung der Patienten und entsprechender Kosten für das Gesundheitssystem) gering zu halten. Die allein auf morphologischen Kriterien wie Größe, Dichte, Begrenzung und Binnenstruktur basierende CT ist in ihrer Aussagekraft in Bezug auf die Dignität der Läsionen bekanntermaßen limitiert. Obgleich die Wahrscheinlichkeit für Malignität mit der Läsionsgröße steigt, liegt auch bei einer Größe über 20 mm die Prävalenz maligner Veränderungen bei lediglich 64–82% [29], sodass bei Verwendung rein CT-morphologischer Kriterien von falsch-positiven Resultaten bei bis zu einem Drittel der Fälle ausgegangen werden muss.

Die dynamische kontrastmittelgestützte CT ist nicht nur mit einer erhöhten Strahlenexposition verbunden, sondern auch in ihrer Spezifität limitiert, da auch benigne Veränderungen wie aktive Granulome ein Kontrastmittelverhalten aufweisen können, das dem maligner Tumoren ähnlich ist [29]. Die Positronenemissionstomographie (PET) mit dem Glukoseanalogon ¹⁸F-FDG (¹⁸F-Fluorodesoxyglukose) in Kombination mit der CT (FDG-PET-CT) gilt als Standardmethode für die präoperative Diagnostik des nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms („non-small cell lung cancer“, NSCLC). Dennoch ist auch diese Methode bei Adenokarzinomen mit gering ausgeprägtem Glukosemetabolismus und Herden geringer Größe in ihrer Sensitivität limitiert. Zudem kommt es durch die FDG-Positivität entzündlicher Veränderungen zu einer beträchtlichen Anzahl falsch-positiver Resultate. Nicht zuletzt geht auch die PET-CT mit einer nicht unerheblichen Strahlenexposition einher. Die Sensitivität und Spezifität der FDG-PET als alleinige Modalität werden in der Literatur mit 69 und 85% angegeben. Die Werte für die kombinierte FDG-PET-CT betragen 97 und 85% [13].

Möglichkeiten der MRT zur Differenzierung benigner und maligner pulmonaler Rundherde

Die Möglichkeiten zur Differenzierung zwischen Tumor, Nekrose und atelektatischem Lungengewebe durch Messung der T1- und T2-Relaxationszeiten in vitro wurden bereits 1988 durch Shioya et al. [26] untersucht, wobei die Autoren eine deutliche Überlappung der gemessenen Werte für die 3 Gewebetypen feststellten. Obgleich inzwischen Kriterien zur Charakterisierung bestimmter benigner Veränderungen wie muzinöser Tumoren und Hamartome basierend auf T2- und T1-gewichteten Aufnahmen beschrieben wurden [11, 21], gestaltet sich die Differenzierung zwischen malignen und benignen Herden mit Hilfe morphologischer MRT-Sequenzen auch nach neueren Studien schwierig (■ Tab. 3). Nach einer Arbeit von Koyama et al. [15] lieferte die T2w-STIR mit einer Sensitivität von 83,3%, einer Spezifität von 60,6% und einer Übereinstimmung von 74,5% die besten Resultate. Im Allgemeinen zeigen viele pulmonale Rundherde wie maligne Lungentumoren, pulmonale Metastasen, und niedrig maligne Tumoren wie Karzinoide und Lymphome, eine geringe bis intermediäre Signalintensität im T1-gewichteten

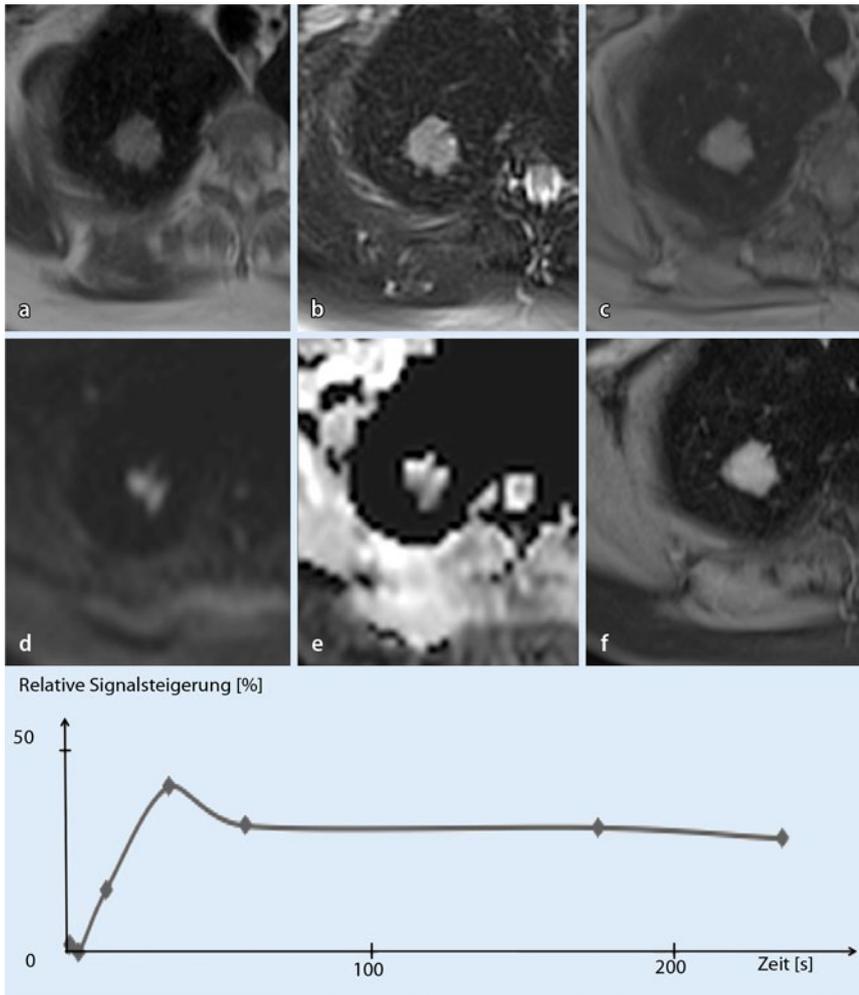


Abb. 2 ▲ Typische Darstellung eines malignen Rundherds (Adenokarzinom) im MRT mit mäßiger bis deutlicher Hyperintensität in der T2w-HASTE- (a) und T2w-STIR-Bildgebung (b) sowie intermediärer Signalintensität in der nativen T1w-VIBE (c). In der DWI zeigt sich eine deutliche Hyperintensität bei $b=800 \text{ s/mm}^2$ (d) mit vermindertem ADC (e, hier $0,9 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$, ROI-Messung). Nach KM-Gabe zeigt sich ein deutlicher initialer Signalanstieg (unten) mit anschließendem Signalabfall („wash-out“) und Hyperintensität in der T1w-VIBE post KM (f). HASTE, „half Fourier-acquired single shot turbo spin echo“, STIR, „short tau inversion recovery“, VIBE, „volume interpolated breathhold examination“, DWI, „diffusion-weighted imaging“, ADC, „apparent diffusion coefficient“, ROI, „region of interest“, KM Kontrastmittel

und eine erhöhte Signalintensität im T2-gewichteten Bild.

Diffusionsgewichtete Bildgebung (DWI)

Auch für die Anwendung der DWI zur Charakterisierung pulmonaler Rundherde liegen bereits mehrere Studien vor. Satoh et al. [22] gelangen bei 54 Rundherden $>5 \text{ mm}$ durch visuelle Interpretation diffusionsgewichteter Bilder mit $b=1000 \text{ s/mm}^2$ eine korrekte Differenzierung benignen und malignen Veränderungen mit einer Sensitivität von 88,9% und einer Spezifität von 61,1%. Liu et al. [17] hin-

gegen konnten in ihrer Studie bei einem b -Wert von 500 s/mm^2 keinen signifikanten Unterschied in der Signalintensität zwischen malignen und benignen Läsionen feststellen, berichteten jedoch für die Differenzierung mithilfe des ADC („apparent diffusion coefficient“) eine Sensitivität und Spezifität von 83 und 74% bei einem Schwellenwert von $1,4 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$. Mori et al. [18] verglichen die DWI bei $b=1000 \text{ s/mm}^2$ mit der FDG-PET und erhielten bei einem ADC-Schwellenwert von $1,1 \times 10^3 \text{ mm}^2/\text{s}$ eine Sensitivität von 70% (PET 72%) bei einer im Vergleich zur PET deutlich höheren Spezifität von 97% (PET 79%). Die daraus von den Autoren

abgeleitete Überlegenheit der DWI gegenüber der PET darf allerdings nach aktueller Datenlage nicht als gesichert betrachtet werden. Insgesamt leiden die DWI wie auch die konventionelle MRT unter der Limitation einer beträchtlichen Zahl falsch-positiver Resultate, da Granulome, fibröse Rundherde und aktive entzündliche Veränderungen ebenso wie maligne Herde mit einer hohen Signalintensität im diffusionsgewichteten Bild einhergehen können. Falsch-negative Resultate der DWI treten dagegen vorwiegend bei nichtsoliden und gering differenzierten Adenokarzinomen auf.

„Dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging“ (DCE-MRI)

Wie der DWI wird auch der DCE-MRI von einigen Autoren ein hohes Potenzial in Hinblick auf die Differenzierung zwischen malignen und benignen pulmonalen Rundherden zugeschrieben [19, 24]. Die bisher zu dieser Anwendung publizierten Studien erreichen Sensitivitäten von 52–96% bei einer Spezifität von 54–100% und einer Genauigkeit von 75–94% (■ Tab. 3). Der Vergleich zu anderen Methoden ist widersprüchlich: In einer von Ohno et al. [19] 2008 publizierten Studie lag die Genauigkeit der DCE-MRI (88,1%) zur Differenzierung zwischen benignen und malignen pulmonalen Rundherden signifikant höher als die der dynamischen kontrastmittelverstärkten MDCT (83,2%) und der FDG-PET-CT (83,7%). Satoh et al. [23] konnten dagegen in ihrer 2013 veröffentlichten Arbeit keinen Benefit für die DCE-MRI zur Differenzierung unklarer Rundherde feststellen. Insgesamt kann – ähnlich wie in der dynamischen kontrastmittelverstärkten CT – davon ausgegangen werden, dass eine geringe oder fehlende KM-Aufnahme eine Malignität weitgehend ausschließt und daher einen vermutlich sehr hohen negativen prädiktiven Wert hat. Eine in der Praxis umsetzbare, standardisierte und quantifizierbare Technik mit verlässlichen Schwellenwerten der Kontrastmittelaufnahme steht jedoch noch aus. Einen Überblick über ausgewählte Studien zur Charakterisierung pulmonaler Rundherde mithilfe der MRT gibt ■ Tab. 3. Das typische Erschei-

nungsbild eines malignen pulmonalen Rundherds in den beschriebenen Untersuchungssequenzen ist in **Abb. 2** exemplarisch dargestellt.

Fazit für die Praxis

- Die MRT hat sich in den vergangenen Jahren zu einem methodisch ausgereiften, standardisierten und reproduzierbaren Verfahren für die Detektion und Abklärung pulmonaler Rundherde entwickelt.
- Die Sensitivität der MRT für die Detektion maligner pulmonaler Rundherde liegt (abhängig von Läsionsgröße und Technik) in der Größenordnung von 80% im Vergleich zur Niedrigdosis-CT und ist der CT damit etwas unterlegen.
- Vorteile der MRT gegenüber der Niedrigdosis-CT sind die höhere Spezifität bei der Differenzierung maligner und benigner pulmonaler Rundherde und die fehlende Strahlenexposition.
- Inwieweit sich die möglichen Vorteile der MRT gegenüber der Niedrigdosis-CT im Rahmen der Lungenkarzinomfrüherkennung nutzen lassen, ist noch nicht in größeren Studien belegt. Außerhalb von Studien kann ein breiter Einsatz der MRT als primäres Screeningverfahren derzeit nicht empfohlen werden.
- Eine weitere Evaluation der MRT als sekundäre Modalität im Rahmen von Studien ist in hohem Maße wünschenswert.

Korrespondenzadresse



Dr. G. Sommer
Klinik für Radiologie
und Nuklearmedizin,
Universitätsspital Basel,
Petersgraben 4, 4031 Basel,
Schweiz
gregor.sommer@usb.ch

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. G. Sommer, M. Koenigkam-Santos, J. Biederer und M. Puderbach geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

1. Aberle DR, Adams AM, Berg CD et al (2011) Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. *N Engl J Med* 365:395–409
2. Becker N, Motsch E, Gross M-L et al (2012) Randomized study on early detection of lung cancer with MSCT in Germany: study design and results of the first screening round. *J Cancer Res Clin Oncol* 138:1475–1486
3. Biederer J, Beer M, Hirsch W et al (2012) MRI of the lung (2/3): why ... when ... how? *Insights Imaging* 3:355–371
4. Biederer J, Schoene A, Freitag S et al (2003) Simulated pulmonary nodules implanted in a dedicated porcine chest phantom: sensitivity of MR imaging for detection. *Radiology* 227:475–483
5. Both M, Schultze J, Reuter M et al (2005) Fast T1- and T2-weighted pulmonary MR-imaging in patients with bronchial carcinoma. *Eur J Radiol* 53:478–488
6. Brenner DJ (2004) Radiation risks potentially associated with low-dose CT screening of adult smokers for lung cancer. *Radiology* 231:440–445
7. Bruegel M, Gaa J, Woertler K et al (2007) MRI of the lung: value of different turbo spin-echo, single-shot turbo spin-echo, and 3D gradient-echo pulse sequences for the detection of pulmonary metastases. *J Magn Reson Imaging* 25:73–81
8. Carney PA, Sickles EA, Monsees BS et al (2010) Identifying minimally acceptable interpretive performance criteria for screening mammography. *Radiology* 255:354–361
9. Fink C, Puderbach M, Biederer J et al (2007) Lung MRI at 1.5T and 3T: observer preference study and lesion contrast using five different pulse sequences. *Invest Radiol* 42:377–383
10. Frericks BB, Meyer BC, Martus P et al (2008) MRI of the thorax during whole-body MRI: evaluation of different MR sequences and comparison to thoracic multidetector computed tomography (MDCT). *J Magn Reson Imaging* 27:538–545
11. Gaeta M, Vinci S, Minutoli F et al (2002) CT and MRI findings of mucin-containing tumors and pseudo-tumors of the thorax: pictorial review. *Eur Radiol* 12:181–189
12. Heye T, Ley S, Heussel CP et al (2012) Detection and size of pulmonary lesions: how accurate is MRI? A prospective comparison of CT and MRI. *Acta Radiol* 53(2):153–160
13. Kim SK, Allen-Auerbach M, Goldin J et al (2007) Accuracy of PET/CT in characterization of solitary pulmonary lesions. *J Nucl Med* 48:214–220
14. Kono R, Fujimoto K, Terasaki H et al (2007) Dynamic MRI of solitary pulmonary nodules: comparison of enhancement patterns of malignant and benign small peripheral lung lesions. *AJR Am J Roentgenol* 188:26–36
15. Koyama H, Ohno Y, Kono A et al (2008) Quantitative and qualitative assessment of non-contrast-enhanced pulmonary MR imaging for management of pulmonary nodules in 161 subjects. *Eur Radiol* 18:2120–2131
16. Koyama H, Ohno Y, Aoyama N et al (2010) Comparison of STIR turbo SE imaging and diffusion-weighted imaging of the lung: capability for detection and subtype classification of pulmonary adenocarcinomas. *Eur Radiol* 20:790–800
17. Liu H, Liu Y, Yu T et al (2010) Usefulness of diffusion-weighted MR imaging in the evaluation of pulmonary lesions. *Eur Radiol* 20:807–815
18. Mori T, Nomori H, Ikeda K et al (2008) Diffusion-weighted magnetic resonance imaging for diagnosing malignant pulmonary nodules/masses: comparison with positron emission tomography. *J Thorac Oncol* 3:358–364
19. Ohno Y, Koyama H, Takenaka D et al (2008) Dynamic MRI, dynamic multidetector-row computed tomography (MDCT), and coregistered 2-[fluorine-18]-fluoro-2-deoxy-D-glucose positron emission tomography (FDG-PET)/CT: comparative study of capability for management of pulmonary nodules. *J Magn Reson Imaging* 27:1284–1295
20. Regier M, Kandel S, Kaul MG et al (2007) Detection of small pulmonary nodules in high-field MR at 3 T: evaluation of different pulse sequences using porcine lung explants. *Eur Radiol* 17:1341–1351
21. Sakai F, Sone S, Kiyono K et al (1994) MR of pulmonary hamartoma: pathologic correlation. *J Thorac Imaging* 9:51–55
22. Satoh S, Kitazume Y, Ohdama S et al (2008) Can malignant and benign pulmonary nodules be differentiated with diffusion-weighted MRI? *Am J Roentgenol* 191:464–470
23. Satoh S, Nakaminato S, Kihara A et al (2013) Evaluation of indeterminate pulmonary nodules with dynamic MR imaging. *Magn Reson Med* 12:31–38
24. Schaefer JF, Vollmar J, Schick F et al (2004) Solitary pulmonary nodules: dynamic contrast-enhanced MR imaging – perfusion differences in malignant and benign lesions. *Radiology* 232:544–553
25. Schroeder T, Ruehm SG, Debatin JF et al (2005) Detection of pulmonary nodules using a 2D HASTE MR sequence: comparison with MDCT. *AJR Am J Roentgenol* 185:979–984
26. Shioya S, Haida M, Ono Y et al (1988) Lung cancer: differentiation of tumor, necrosis, and atelectasis by means of T1 and T2 values measured in vitro. *Radiology* 167:105–109
27. Sommer G, Tremper J, Koenigkam-Santos M et al (2013) Lung nodule detection in a high-risk population: comparison of magnetic resonance imaging and low-dose computed tomography. *Eur J Radiol*. doi:10.1016/j.ejrad.2013.11.012
28. Vogt FM, Herborn CU, Hunold P et al (2004) HASTE MRI versus chest radiography in the detection of pulmonary nodules: comparison with MDCT. *AJR Am J Roentgenol* 183:71–78
29. Wahidi MM, Govert JA, Goudar RK et al (2007) Evidence for the treatment of patients with pulmonary nodules: when is it lung cancer? ACCP evidence-based clinical practice guidelines (2nd edition). *Chest* 132:945–1075
30. Wild JM, Marshall H, Bock M et al (2012) MRI of the lung (1/3): methods. *Insights Imaging* 3:345–353