

Radiologe 2022 · 62:410–417
<https://doi.org/10.1007/s00117-022-01000-y>
 Angenommen: 17. März 2022
 Online publiziert: 13. April 2022
 © The Author(s), under exclusive licence to
 Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von
 Springer Nature 2022



Muskuloskeletale Bildgebung in der Niederfeld-Magnetresonanztomographie

Tobias Pogarell¹ · Matthias S. May^{1,2} · Armin M. Nagel^{1,3} · Michael Uder^{1,2} · Rafael Heiss^{1,2}

¹ Radiologisches Institut, Universitätsklinikum Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland

² Imaging Science Institute, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen, Deutschland

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

Zusammenfassung

Hintergrund: Die Magnetresonanztomographie (MRT) spielt eine zentrale Rolle in der muskuloskeletalen Bildgebung. Die hohe Prävalenz und der oft große Leidensdruck der betroffenen Patienten stellen eine besondere Herausforderung an Verfügbarkeit und Durchsatz dar. Die Niederfeld-MRT ($\leq 1,0T$) hat methodisch betrachtet das Potenzial, diese infrastrukturellen Herausforderungen zu bewältigen, wobei sie in den letzten drei Jahrzehnten den Ansprüchen an die Bildqualität im Vergleich zu Hochfeldgeräten nicht mehr gerecht werden konnte. Fortschritte im Bereich der Hochleistungshard- und -software versprechen heute, viele muskuloskeletale Regionen und Indikationen auch bei niedrigeren Feldstärken in ausreichend hoher Qualität abzudecken.

Ziel der Arbeit: Dieser Artikel soll einen Einblick in die Vor- und Nachteile muskuloskeletaler Bildgebung bei niedrigen Feldstärken geben, vorhandene Literatur vorstellen und eigene erste Erfahrungen mit einem modernen 0,55-T-MRT-Gerät beschreiben.

Material und Methoden: Diese Übersichtsarbeit basiert auf einer Recherche in verschiedenen Literaturdatenbanken und auf eigenen Erfahrungen in der muskuloskeletalen Bildgebung mit einem modernen 0,55-T-Scanner.

Schlussfolgerung: Die vorhandene Datenlage zur muskuloskeletalen Bildgebung in der Niederfeld-MRT ist größtenteils veraltet, und es bedarf Studien zur diagnostischen Leistungsfähigkeit moderner Niederfeld-MRT-Systeme. Diese neuen Geräte könnten die bestehende Hochfelddiagnostik ergänzen und so den Zugang zu hochwertiger MRT-Diagnostik des Bewegungsapparats erleichtern. Unsere Erfahrungen zeigen, dass die moderne Niederfeld-Diagnostik bei bestimmten Fragestellungen und Indikationen, insbesondere bei der Diagnostik von akuten muskuloskeletalen Verletzungen, in ausreichender Qualität möglich erscheint.

Schlüsselwörter

Feldstärke · Muskuloskeletale Verletzungen · Bildqualität · Kosten · Nachhaltigkeit

In diesem Beitrag

- Niederfeld-MRT
- Metallartefakte
- Wirbelsäule
- Schulter
- Ellenbogen
- Handgelenk
- Hand
- Knie
- Fuß



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Als die Magnetresonanztomographie (MRT) in den 1980er Jahren ihren Einzug in die muskuloskeletale Bildgebung hielt, nutzte man zunächst die damals verfügbaren niedrigen Feldstärken im Bereich von 0,05 bis 0,35 T. Aufgrund der eingeschränkten Bildqualität, die eine zuverlässige Diagnostik erschwerte, konnten sich diese Geräte im täglichen klinischen Gebrauch nicht dauerhaft etablieren. Seitdem haben technologische Weiterentwicklungen der MRT-Systeme

dazu geführt, dass heutzutage fast ausschließlich Hochfeld-MRT-Scanner mit Feldstärken von 1 und 3 T den klinischen Alltag prägen [1]. Diese bieten in der muskuloskeletalen Bildgebung im Vergleich zu Niederfeld-MRT Systemen den Vorteil von potenziell besserer Bildqualität durch bessere Kontraste, höhere Auflösung und kürzere Messzeiten. Allerdings konnten einige Studien zeigen, dass höhere Feldstärken nicht automatisch zu einer Verbesserung der diagnostischen Aussa-



Abb. 1 ▲ Magnetresonanztomographie (MRT) des Kniegelenks eines 24-jährigen Patienten nach Kniegelenkdistorsion bei 0,55 T. **a** In der protonengewichteten Turbo-Spin-Echo (TSE)-Sequenz kommt eine proximale Ruptur des vorderen Kreuzbands (VKB) zur Darstellung (Pfeil). **b** In der fettgesättigten protonengewichteten TSE-Sequenz ist ein gesteigertes Knochenmarksignal in der lateralen Femurkondyle und in der dorsalen Tibia mit hohem Kontrast bei homogener Unterdrückung des Fettsignals abgrenzbar. Die entsprechenden Sequenzparameter sind in **Tab. 2** zu finden

gekräft führen, sondern diese in erster Linie von der Erfahrung des befundenden Radiologen abhängt [2]. Dennoch ist der Marktanteil von MRT-Geräten < 1,5 T in den letzten Jahrzehnten stark gesunken, von ca. 30 % im Jahr 2000 auf nunmehr ca. 5 % [3]. Die Steigerung der Feldstärke in der MRT-Bildgebung des Bewegungsapparats birgt neben ihren Vorteilen jedoch auch Risiken und Nachteile. Neben den höheren Anschaffungs- und Unterhaltskosten sind für Hochfeld-MRT Systeme deutlich mehr Aufwendungen zum Erhalt der Gebäudestatik und zur Abschirmung des Magnetfelds nötig. Daneben muss bei Hochfeld-MRT-Systemen und insbesondere bei Ultrahochfeld-MRT-Systemen (z. B. mit 7 T) vermehrt auf die Sicherheit bei der Untersuchung von Patienten geachtet werden, insbesondere wenn Implantate vorliegen [4, 5].

Moderne Niederfeld-MRT-Systeme hingegen könnten durch ihre geringeren Kosten zukünftig die Messkapazitäten, z. B. für die traumatologische Akutdiagnostik, erhöhen. Durch ihre einfachere Installation haben Niederfeld-MRT-Geräte zudem das große Potenzial, Erkrankungen des Bewegungsapparats zunehmend flächendeckend und dezentral zu diagnostizieren [1].

Am Universitätsklinikum Erlangen nutzen die Autoren seit November 2020 ein modernes 0,55-T-MRT-Gerät mit supraleitendem Magneten (MAGNETOM Free.Max; Siemens Healthcare GmbH, Erlangen) in

der klinischen Routine, welches ein breites Einsatzspektrum in unterschiedlichen anatomischen Lokalisationen des ganzen Körpers besitzt. Zu solchen modernen Niederfeld-Geräten mit leistungsstarker Hardware und Software ist die Datenlage zur diagnostischen Qualität der Bildgebung des Bewegungsapparats bislang noch sehr limitiert. In der Regel sind die verfügbaren Publikationen zur muskuloskeletalen Bildgebung mit Niederfeld-MRT-Systemen mehrere Jahrzehnte alt [6]. Dieser Artikel soll einen Überblick über die bestehende Studienlage klassischer Niederfeld-MRT-Geräte in der Literatur und erste eigene Erfahrungen mit einem modernen 0,55-T-Ganzkörper-MRT zur Abklärung muskuloskeletaler Erkrankungen bieten.

Niederfeld-MRT

In der Niederfeld-MRT gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Geräteklassen, die zur Diagnostik von Erkrankungen des Bewegungsapparats eingesetzt werden: Permanentmagnetsysteme und supraleitende Systeme. Permanentmagnetsysteme sind typischerweise C-förmig konfiguriert und gestatten eine offene Bauweise. Daneben werden auch portable Scanner mit Permanentmagneten zur dedizierten Extremitätenbildgebung angeboten. Vorteile von Permanentmagneten sind ihre Langlebigkeit und der niedrige Energieverbrauch. Nachteile sind aufwändige Korrekturprozesse (Shimming), um die

Homogenität des Magnetfelds zu gewährleisten, und das oftmals sehr hohe Gewicht der Permanentmagnete [3, 7].

Supraleitende Niederfeld-MRT basieren auf demselben Bauprinzip wie entsprechende Hochfeldgeräte. Durch die niedrigere Feldstärke und die damit korrespondierenden Materialeinsparungen beim Magnetdesign verringern sich die Anschaffungs- und Betriebskosten [4]. Der verringerte Helium- und Energiebedarf verbessert gleichzeitig die Nachhaltigkeit. Unabhängig von der jeweiligen Bauweise führen niedrige Magnetfeldstärken grundsätzlich zu einem verminderten Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und einer reduzierten Bildqualität pro Untersuchungszeit [8]. Neue softwarebasierte Bildrekonstruktionsverfahren wie die iterative Bildrekonstruktion oder Korrekturen durch neuronale Netzwerke der künstlichen Intelligenz (KI) besitzen das Potenzial, das reduzierte SNR zu kompensieren oder bei gleichbleibender Bildqualität die Akquisitionszeit zu verringern [4]. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, eine adäquate Bildqualität bei der MRT des Bewegungsapparates in akzeptablen Untersuchungszeiten auch mit niedriger Feldstärke zu erreichen. Wenn dies gelingt, können die immanenten methodischen Vorteile niedriger Feldstärken für die muskuloskeletale Bildgebung erschlossen werden. Bei niedrigeren Feldstärken treten geringere Suszeptibilitätsartefakte an Luft-Gewebs-Grenzflächen auf, was der Bildgebung geometrisch schwieriger Regionen, wie beispielsweise der Halswirbelsäule, zugutekommen kann [9]. Zudem treten bei geringeren Feldstärken auch weniger Suszeptibilitätsartefakte in der Nähe von Metallimplantaten auf. Ein weiterer Vorteil ist die größere Wellenlänge des HF-Impulses in der Niederfeld-MRT, was in vielen Fällen zu einer homogeneren Ausleuchtung des Körpers führt.

Eine wichtige Limitation der MRT-Bildgebung des Bewegungsapparats bei niedrigeren Feldstärken ist dagegen die geringere Differenz der Resonanzfrequenzen von Fett und Wasser. Ältere Niederfeld-Scanner hatten stets Probleme, die Überlappung der zwei Peaks zu separieren. Dadurch war eine homogene spektrale Fettsättigung oft nicht möglich [10]. Deshalb musste im Niederfeldbereich

Tab. 1 Potenzielle Vor- und Nachteile der Niederfeld-Magnetresonanztomographie (MRT) in der muskuloskeletalen Bildgebung	
Vorteile	Nachteile
<i>Technische Voraussetzungen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> – Weniger Suszeptibilität an Grenzflächen oder bei Fremdmaterial, z. B. bei Plattenosteosynthesen oder Prothesen – Bessere Magnetfeldhomogenität bei komplexer Geometrie, z. B. Wirbelsäule bei Übergewichtigen Patienten 	<ul style="list-style-type: none"> – Geringes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), z. B. problematisch bei geringen Kontrastunterschieden in fettgesättigten Sequenzen – Geringe Auflösung, z. B. kleiner anatomischer Strukturen – Verlängerte Messzeit und daraus resultierende Bewegungsartefakte – Probleme bei spektraler Fettsättigung aufgrund enger zusammenliegender Frequenzen von Wasser und Fett
<i>Klinische Anwendung</i>	
<ul style="list-style-type: none"> – Akute traumatische Verletzungen an großen Gelenken oder der Wirbelsäule, z. B. Frakturen, Kontusionen oder Bandverletzungen – Degenerative und entzündliche Wirbelsäulenveränderungen – Onkologische Diagnostik des Bewegungsapparats – Bildgebung bei Implantaten zur Darstellung des Fremdmaterials oder z. B. zur Rezidivdiagnostik nach Weichteiltumoren bei Tumorprothesen 	<ul style="list-style-type: none"> – Teilweise zu geringe räumliche Auflösung für die Untersuchung kleiner peripherer Gelenke, z. B. Finger, Handgelenk – Auflösung kleiner Pathologien, z. B. bei Abklärung des chronischen Knieschmerzes (Knorpel, Meniskus), Traumafolgen der Schulterluxation und chronische Schulterschmerzen (Bankart-Läsion und Läsionen des Bizepssehnenankers)
<i>Sozioökonomische Aspekte</i>	
<ul style="list-style-type: none"> – Niedrigere Standortkosten – Niedrigere Unterhaltskosten – Niedrigere Kosten pro Untersuchung – Mögliche Steigerung der MRT-Verfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> – Notwendigkeit der sorgfältigen Patientenselektion in Abhängigkeit der Fragestellung – Geringer Patientendurchsatz pro Zeit – Potenziell Nachuntersuchungsbedarf an Hochfeldgeräten bei uneindeutigen Befunden, daher eher kritische Stand-alone-Installation

bisher in der Regel auf andere Fettunterdrückungstechniken wie Short-Tau Inversion Recovery (STIR) oder die Dixon-Methode ausgewichen werden, die der spektralen Fettsättigung hinsichtlich der Bildqualität oftmals unterlegen sind. Diese Einschränkung scheint mit der neuesten Generation der Niederfeld-MRT überwunden zu sein. Unsere ersten Erfahrungen zeigen eine sehr zuverlässige spektrale Fettunterdrückung bei Untersuchungen des Bewegungsapparats (Abb. 1). Diese wird bei dem von den Autoren eingesetzten 0,55-T-Scanner durch optimierte HF-Pulse erreicht. In Tab. 1 wird eine Übersicht über die allgemeinen Vor- und Nachteile der Niederfeld-MRT in der muskuloskeletalen Bildgebung gegeben.

Metallartefakte

Bei orthopädischen und unfallchirurgischen Eingriffen werden verschiedene Materialien inklusive Metall und Metalle-

gerungen eingesetzt. Die postoperative Bewertung erfordert in der Regel eine verlässliche Bildgebung der angrenzenden Weichteile. Das Spektrum der abzuklärenden Erkrankungen umfasst z. B. Protheseninfektionen, Prothesenlockerungen oder Lokalrezidive nach Resektion von Weichteil- und Knochentumoren mit überbrückender Osteosyntheseversorgung. Da Metalle in der MRT-Bildgebung Signalauslöschungen, ausgeprägte Artefakte und eine Reduzierung des Weichgewebekontrasts in deren Umgebung verursachen, stellt die Untersuchung dieser Patienten eine besondere Herausforderung dar [11]. Diese Suszeptibilitätseffekte sind bei niedrigen Feldstärken weit weniger ausgeprägt [3]. Die allgemeine, insbesondere aber die Bildqualität in der Umgebung von Endoprothesen und von Osteosynthesen ist daher deutlich weniger beeinträchtigt. Gerade Protheseninfektionen oder Tumorrezidive könnten so in manchen Fällen überhaupt erst diagnostizierbar werden.

Niederfeldsysteme haben daher das Potenzial, die MRT-Bildgebung metallischer Fremdkörper und deren Nachbarschaft zu verbessern (Abb. 2, [1]).

In einer Machbarkeitsstudie aus dem Jahr 2020 untersuchten Schröder et al. 8 Patienten mit Komplikationen nach Implantation einer Knieendoprothese (Knie-TEP) mit einem 0,25-T-Gerät (G-Scan brio; Esaote SpA, Genua, Italien). Ein Radiologe beurteilte hierbei die Fixierung der Prothese und die umliegenden Strukturen (Knochen, Sehnen, Bänder und Muskeln). Der MRT-Befund wurde mit den klinischen Untersuchungsergebnissen, der Computertomographie (CT) und den intraoperativen Befunden der Revision verglichen. In der Mehrzahl der Fälle stimmte der MRT-Befund mit den klinischen Untersuchungsergebnissen beziehungsweise den intraoperativen Befunden überein. In allen Fällen lieferte der Niederfeld-MRT-Befund vergleichbare Ergebnisse wie die CT [12].

Wirbelsäule

Weiterentwicklungen im Design der Empfangsspulen und die Entwicklung von Mehrkanalspulen bieten in der Niederfeld-MRT die Möglichkeit, Untersuchungen der gesamten Wirbelsäule in diagnostischer Qualität durchzuführen [3]. In einer Studie von Lee et al. aus dem Jahr 2015 wurden 100 Patienten mit Claudicatio spinalis oder Ischialgie sowohl bei 0,25T (G-Scan; Esaote, Genua, Italien) als auch bei 1,5T beziehungsweise 3,0T untersucht. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Nieder- und Hochfeldgeräten für die Diagnostik von degenerativen Veränderungen der lumbalen Bandscheiben und gute Übereinstimmungen bei der Diagnostik von Nervenwurzelkompressionen. Die 0,25-T-Untersuchungen waren allerdings, wahrscheinlich bedingt durch die längeren Messzeiten, anfälliger für Bewegungsartefakte [13].

In der aktuell veröffentlichten Stellungnahme des American College of Radiology zum unteren Rückenschmerz wird die MRT als initiale Bildgebung des persistierenden Rückenschmerzes über einen Zeitraum von 6 Wochen, bei Patienten mit Cauda-equina-Syndrom und bei Verdacht auf eine Tumorerkrankungen oder Infektion als Bildgebung der ersten Wahl empfohlen



Abb. 2 ▲ Direkte Gegenüberstellung einer protonengewichteten Turbo-Spin-Echo(TSE)-Sequenz eines Patienten mit Hüftprothese aufgenommen bei 1,5 T (a) und bei 0,55 T (b). Die an die Prothese angrenzenden Bildstörungen sind bei niedrigerer Feldstärke deutlich kleiner, das Bildrauschen hingegen ist höher. Beide Aufnahmen wurden mit einer Compressed-sensing-Technik zur Artefaktunterdrückung bei Metallimplantaten („slice encoding for metal artifact correction“, SEMAC) mit vergleichbaren Messzeiten von 6:51 min (1,5 T) und 7:27 min (0,55 T) akquiriert



Abb. 3 ▲ Magnetresonanztomographie(MRT)-Aufnahmen der Lenden- und Halswirbelsäule bei 0,55 T. a, b MRT der Lendenwirbelsäule eines 75-jährigen Patienten mit klinischem Verdacht auf einen Bandscheibenvorfall. In den T1- (a) und T2-gewichteten (b) Turbo-Spin-Echo(TSE)-Sequenz-Aufnahmen kommt eine subligamentäre Bandscheibenprotrusion des Lendenwirbelkörpers (LWK) 4/5 ohne relevante Einengung des Spinalkanals zur Darstellung. c, d MRT einer 64-jährigen Patientin mit chronischen, belastungsabhängigen Schmerzen in der Halswirbelsäule. In der nativen T1- (c) und mittels Dixon fettgesättigten T1- gewichteten TSE-Sequenz nach Kontrastmittelinjektion (d) ist eine erosive Osteochondrose der Halswirbelkörper (HWK) 5–7 mit Aktivierung HWK6/7 klar abzugrenzen. Die entsprechenden Sequenzparameter sind in [Tab. 2](#) zu finden

[14]. Unseren Erfahrungen nach können diese in der Routine häufig dringlich abzuklärenden Fragestellungen der Wirbelsäule mit modernen Niederfeld-Geräten zuverlässig beantwortet werden ([Tab. 3](#)).

Schulter

Die Kombination aus MRT und Arthrographie gilt als der Goldstandard bei der Bildgebung von Pathologien im Schultergelenk, wie beispielsweise Labrumrissen oder Bankart-Läsionen [15]. In einer älteren Stu-

die aus 1999 verglichen Loew et al. MR-Arthrographien der Schulter bei 0,2 T (Magnetom Open, Siemens Healthcare GmbH, Erlangen) und 1,5 T. Hierzu wurden 38 Patienten mit Verdacht auf eine chronische Instabilität ($n=12$) oder Verletzungen der Rotatorenmanschette ($n=26$) in zufälliger Reihenfolge bei den unterschiedlichen Feldstärken untersucht. Bei 27 der 38 Patienten war eine operative Korrelation möglich. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung bei der Erkennung von Labrumverletzungen und eine sehr gute Übereinstim-

mung bei der Erkennung von kompletten Rissen der Rotatorenmanschette zwischen beiden Geräten. Ein Nachteil der Niederfeld-Bildgebung waren auch hier die längeren Messzeiten und das dadurch erhöhte Risiko für Bewegungsartefakte [16].

In einer aktuelleren retrospektiven Studie von 2014 evaluierten Lee et al. die diagnostische Genauigkeit von nativen Schulteraufnahmen bei 0,2 T (E-Scan Opera, Esaote, Genua, Italien). Hierfür wurden die MRT-Befunde von 79 Patienten mit den Ergebnissen verglichen, die durchschnittlich innerhalb von 56 Tagen nach der MRT-Bildgebung arthroskopisch erhoben wurden. Es konnten gute Ergebnisse für die Diagnostik von partiellen und kompletten Rissen der Rotatorenmanschette gezeigt werden. Bei Verletzungen des superiores Labrums in anteroposteriorer Richtung (SLAP) war dies jedoch nicht der Fall [17].

Ellenbogen

Die MRT-Bildgebung ist auch für die Beurteilung des Ellenbogengelenks etabliert. Viele Verletzungen durch akute Traumata oder durch chronisch repetitive Überlastungen, wie z. B. beim Tennis oder Baseball, betreffen die Bänder und Sehnen [18]. Okamoto et al. untersuchten 2015 das Potenzial der Niederfeld-MRT bei der Früherkennung von Baseball-assoziierten Ellenbogenverletzungen. Zum Zeitpunkt der MRT symptomlose im Baseball aktive Kinder im Alter von 9 bis 12 Jahren ($n=62$) mit Ellenbogenschmerzen in der Krankengeschichte wurden mit einem 0,2-T-Extremitätenscanner (C-SCAN; Esaote, Genua, Italien) untersucht. Reizzustände und Auftreibungen des ulnaren Kollateralbands konnten bei einem großen Anteil der Patienten nachgewiesen werden ($n=26, 41,9\%$) [19]. Daraus leiteten die Autoren ab, dass die Niederfeld-MRT für die Früherkennung von Ellenbogenverletzungen geeignet ist. Darüber hinaus zeigen unsere Erfahrungen mit einem 0,55-T-MRT-Gerät, dass neben einer Diagnostik von Bandverletzungen am Ellenbogen auch Epikondylopathien und Frakturen mit guter Bildqualität diagnostiziert werden können ([Tab. 4](#)).

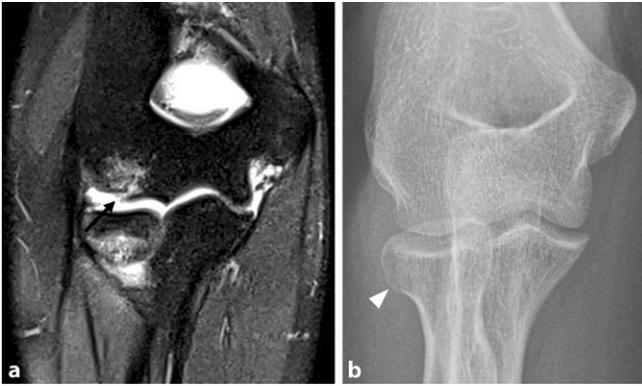


Abb. 4 ▲ Magnetresonanztomographie (MRT) bei 0,55 T (a) und Röntgenbild in anteroposterior Projektion (b) eines 19-jährigen Patienten mit starken Schmerzen im rechten Ellenbogen nach einem Motorradsturz. In der fettgesättigten protonengewichteten Turbo-Spin-Echo(TSE)-Sequenz (a) zeigt sich neben dem gesteigerten Knochenmarksignal aufgrund einer Radiusköpfchenfraktur (*Pfeilspitze*) eine im Röntgenbild okkulte osteochondrale Fraktur mit Stufe in der Gelenkfläche des Capitulum humeri (*Pfeil*). Der mediale und laterale Kollateralbandapparat sind intakt. Die entsprechenden Sequenzparameter sind in **Tab. 2** hinterlegt



Abb. 5 ▲ Magnetresonanztomographie (MRT) der Hand eines 63-jährigen Patienten mit klinischem Verdacht auf rheumatoide Arthritis bei 0,55 T. In der T1- (a) und protonengewichteten Turbo-Spin-Echo(TSE)-Sequenz mit Fettsättigung (b) kommt eine Erosion im Köpfchen des Os metacarpale 3 zur Darstellung (*Pfeil*)

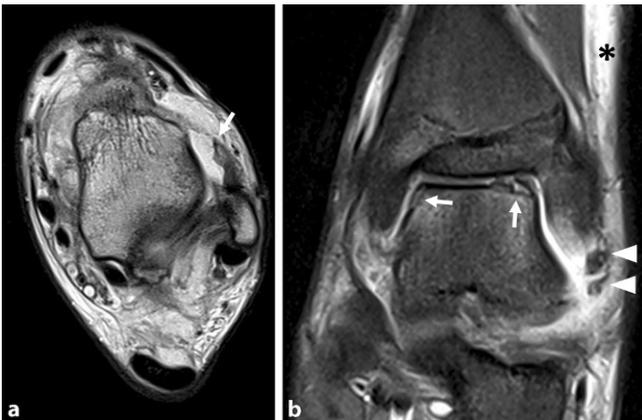


Abb. 6 ▲ Magnetresonanztomographie (MRT) des Sprunggelenks eines 15-jährigen Patienten nach Sprunggelenkdistorsion bei 0,55 T. In der protonengewichteten Turbo-Spin-Echo(TSE)-Sequenz (a) kommt eine Ruptur des Lig. fibulotalare anterius (*Pfeil*) zur Darstellung. In der protonengewichteten fettunterdrückten TSE-Sequenz (b) zeigt sich eine gering dislozierte osteochondrale Fraktur an der lateralen und, auf dieser Schicht nur partiell miterfasst, auch an der medialen Talusschulter (*Pfeile*). Zudem erkennt man den retrahierten Stumpf des Lig. fibulotalare anterius (*Pfeilspitzen*). Am lateralen distalen Unterschenkel liegt ein ausgeprägtes Weichteilödem vor (*Sternchen*). Die entsprechenden Sequenzparameter sind in **Tab. 2** zu finden

Handgelenk

Der Verdacht auf eine Fraktur des Os scaphoideum ist eine diagnostische und therapeutische Herausforderung. Der Anteil verifizierter Frakturen bei vorliegender Fraktur-Verdachtsdiagnose ist niedrig [20]. Allerdings gehen nicht erkannte und nicht

rechtzeitig therapierte Kahnbeinfrakturen häufig mit Komplikationen, wie avaskulären Nekrosen und der Entwicklung von Pseudoarthrosen einher [15]. Ein sensitives und breit verfügbares Instrument zur sicheren Diagnostik von Kahnbeinfrakturen ist somit entscheidend. Im Gegensatz zur geringen Sensitivität konventioneller

Röntgenaufnahmen bei der Erkennung von Kahnbeinfrakturen kann die MRT okkulte Frakturen von Knochenprellungen unterscheiden, Bänderverletzungen erkennen und avaskuläre Nekrosen aufdecken [15]. Brydie et al. untersuchten 2003 ein Kollektiv von 195 Patienten mit dem Verdacht auf eine Kahnbeinfraktur und unauffälligem Röntgenbefund mit einem 0,2-T-Extremitätenscanner (Artoscan; Esaote, Genua, Italien). Bei 37 Patienten (19%) zeigte sich eine Kahnbeinfraktur, bei 28 Patienten (14%) eine Fraktur des distalen Radius und bei 9 Patienten (5%) Frakturen anderer Knochen des Handgelenks. Die Niederfeld-MRT war somit in der Lage, definitive Diagnosen von Frakturen oder deren sicheren Ausschluss am Handgelenk zu etablieren und zu einer Änderung der Behandlung der Patienten in 92% der Fälle (182) maßgeblich beizutragen [21].

Diese Eignung der Niederfeld-MRT für die Diagnostik von therapeutisch relevanten Frakturen der Handwurzelknochen kann aus unserer Erfahrung auf die moderne 0,55-T-MRT übertragen werden. Im Gegensatz zur Frakturdiagnostik bietet sich die Bildgebung kleiner anatomischer Strukturen, wie der intrinsischen Bänder

Tab. 2 Messparameter der dargestellten Aufnahmen bei 0,55 T					
Untersuchung	–	TE (ms)	TR (ms)	TA (min)	Nominelle Auflösung (mm)
LWS	T1 TSE sag	13	474	04:47	0,8 × 0,8 × 4,0
–	T2 TSE sag	99	3500	04:21	1,0 × 1,0 × 4,0
HWS	T1 TSE sag	15	487	03:56	0,8 × 0,8 × 3,0
–	T1 TSE Dixon sag KM	18	568	05:20	0,8 × 0,8 × 3,0
Ellenbogen	PD TSE FS cor	34	2000	04:42	1,0 × 1,0 × 3,0
Hand	T1 cor	14	450	05:21	0,5 × 0,5 × 2,5
–	PD TSE FS cor	29	3100	06:01	0,6 × 0,6 × 2,5
Knie	PD TSE sag	30	2390	03:56	0,6 × 0,6 × 3,0
–	PD TSE FS sag	30	3280	05:16	0,6 × 0,6 × 3,0
OSG	PD TSE tra	32	3000	04:05	0,4 × 0,4 × 3,0
–	PD TSE FS cor	35	1970	04:53	0,6 × 0,6 × 3,0

TE Echozeit; TR Repetitionszeit; TA Akquisitionszeit; TSE Turbo-Spin-Echo; Tra transversal; Cor koronal; Sag sagittal; PD Protonendichte

des Handgelenks und des triangulären fibrocartilaginären Komplexes, aufgrund des verminderten SNR nur eingeschränkt an. Diese Indikation sollte daher bevorzugt an Geräten mit höherer Feldstärke bearbeitet werden.

Hand

Crues et al. (2004) evaluierten die Sensitivität eines portablen Niederfeld-Extremitätenscanners (0,2T MagneVU 1000; MagneVU, Kalifornien, USA) für die Detektion von Erosionen im Handgelenk und in den Metakarpophalangealgelenken bei 132 Patienten (95 % hiervon mit rheumatoider Arthritis). Als Vergleich dienten konventionelle Röntgenaufnahmen. Hierbei zeigte sich eine höhere Sensitivität der MRT-Untersuchungen, welche Erosionen bei 125 Patienten (95 %) im Vergleich zu 78 (58 %) in der Röntgendiagnostik identifizieren konnte [22].

Neben der Detektion von Erosionen ermöglicht die Niederfeld-MRT eigenen Erfahrungen nach auch die Detektion weiterer Veränderungen bei entzündlichen Gelenkerkrankungen wie Osteitis, Synovialitis und Tendovaginitis (▣ Abb. 5). Entsprechende vergleichende Studien sind jedoch zur weiteren Einordnung der diagnostischen Qualität von Niederfeldaufnahmen bei Patienten mit rheumatologischen Erkrankungen zwingend erforderlich, insbesondere hinsichtlich der Detektion von kleinen Veränderungen in frühen Erkrankungsstadien.

Knie

Die MRT ist in der Diagnostik von akuten als auch chronischen Läsionen des Kniegelenks etabliert [15]. Meniskus- und Kreuzbandrisse sind typische Beispiele. Einige Studien haben die diagnostische Genauigkeit von Nieder- im Vergleich zu Hochfeld-MRT bei Meniskus- und vorderen Kreuzbandrissen (VKB-Rissen) untersucht [8]. Vellert et al. haben 1995 die Treffsicherheit in der Diagnostik von VKB-Rissen bei 0,5 T (Signa, GE Medical Systems, Milwaukee, USA) und 1,5 T untersucht und fanden keinen relevanten Unterschied zwischen diesen beiden Methoden (Sensitivität 90 % bei 0,5 T, 91 % bei 1,5 T; [23]). Auch Cotten et al. konnten im Jahr 2000 bei 90 Patienten mit operativ gesicherten Meniskus- und VKB-Rissen keine signifikanten Unterschiede der Sensitivität und Spezifität zwischen 0,2 T (Magnetom Open; Siemens Healthcare GmbH, Erlangen) und 1,5 T feststellen [24]. Auch Puig et al. (2015) fanden keinen substanziellen Unterschied in der diagnostischen Genauigkeit für die Beurteilung von Meniskus- und VKB-Rissen zwischen Nieder- und Hochfeld-MRT.

Für die Evaluierung von Knorpeldefekten und Arthrose galt dies aufgrund unzureichender Datenlage mit wenigen Studien und kleinen Stichprobengrößen jedoch nicht [6]. Aus Sicht der Autoren sind gerade akute Traumafolgen mit einem modernen 0,55-T-Gerät gut abzubilden (▣ Abb. 1). Therapeutisch relevante Befunde des Kno-

chens, der Menisken und des Bandapparats können zuverlässig diagnostiziert werden, ebenso degenerative Veränderungen insbesondere im fortgeschrittenen Stadium. Vorsicht ist jedoch bei chronischen und rezidivierenden Beschwerden mit unauffälligem Bildbefund geboten, da diskrete Veränderungen, wie kleine Meniskusrisse, aufgrund des limitierten Kontrasts und der meist etwas schlechteren Auflösung übersehen werden könnten. Diese Fälle sollten primär oder auch sekundär eher der Hochfeld-MRT zugeführt werden.

Fuß

Die MRT-Bildgebung wird zunehmend bei der Diagnostik von Fuß- und Sprunggelenkpathologien verwendet [15]. In einer 1998 erschienenen Studie wurde eine überlegene Bildqualität am Sprunggelenk und Fuß mit einem signifikant höheren SNR eines 1,0-T-Ganzkörperscanners im Vergleich zu einem 0,2-T-Extremitätenscanner festgestellt. Trotz der Unterschiede in der Bildqualität wurden 96 % der mittels 1,0-T-MRT erfassten Läsionen, wie beispielsweise Verletzungen der Außenbänder oder eine Osteochondrosis dissecans auch bei 0,2 T diagnostiziert (Artoscan; Esaote, Genua, Italien). In einer nach der Untersuchung durchgeführten Umfrage der eingeschlossenen Patienten zu Lagerung, Messzeit, Lärmentwicklung, Klaustrophobie, Vertrauen in das diagnostische Procedere und der Bereitschaft, die Untersuchung zu wiederholen, fiel die Akzeptanz der Patienten jedoch klar zugunsten des 1,0-T-Ganzkörperscanners aus. Klaustrophobie spielte hier bei beiden Geräten keine Rolle, einzig das Lärmempfinden betreffend, war der 0,2-T-Scanner dem 1-T-Scanner überlegen [25]. Herber et al. (2000) empfahlen die Durchführung einer Niederfeld-MRT des Sprunggelenks bei Kindern und Jugendlichen mit unklaren Sprunggelenkschmerzen und unauffälligem Röntgenbefund. Durch die Niederfeld-MRT-Untersuchungen konnten in der Mehrzahl der 55 eingeschlossenen Patienten Bandrupturen, Frakturen oder Verletzungen der Wachstumsfugen diagnostiziert werden, was in 35 Fällen eine dedizierte Therapie nach sich zog [26]. Aus eigener Erfahrung mit einem modernen 0,55-T-Ganzkörper-MRT lassen

sich akute Verletzungen der Sprunggelenke, wie Bandrupturen, Frakturen und Verletzungen der Syndesmose mit hoher subjektiver Konfidenz und hohem Patientenkomfort diagnostizieren, was jedoch in weiterführenden wissenschaftlichen Studien erst noch objektiviert werden muss (▣ Abb. 6).

Fazit für die Praxis

- Die modernen, leistungsstarken Niederfeld-MRT-Systeme erschließen vielfältige klinische Anwendungsgebiete, die aber noch in systematischen Studien an ausreichend großen Patientenkollektiven und mit validen Referenzmethoden analysiert werden müssen.
- Die bisherigen Ergebnisse rechtfertigen die Erwartung, dass die modernen Niederfeld-MRT-Geräte eine wertvolle komplementäre Rolle in der bildgebenden Diagnostik des muskuloskeletalen Systems einnehmen können.
- Methodische Vorteile bestehen an kritischen Grenzflächen zwischen Luft und Gewebe und bei metallischen Implantaten.
- Dem steht die im Vergleich unterlegene Bildqualität mit reduziertem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), geringerer Auflösung und längeren Messzeiten im Vergleich zu Hochfeldsystemen gegenüber.
- Niedrigere Anschaffungskosten, eine höhere Nachhaltigkeit im Betrieb sowie potenziell portable Geräte sind Faktoren, die eine patientennahe muskuloskeletale Bildgebung und eine breitere Verfügbarkeit in der Patientenversorgung ermöglichen könnten.

Imaging of the musculoskeletal system using low-field magnetic resonance imaging

Background: Magnetic resonance imaging (MRI) plays a crucial role in musculoskeletal imaging. The high prevalence and pain-related suffering of patients pose a particular challenge concerning availability and turnover times, respectively. Low-field (≤ 1.0 T) MRI has the potential to fulfill these needs. However, during the past three decades, high field systems have increasingly replaced low field systems because of their limitations in image quality. Recent technological advancements in high-performance hard- and software promise musculoskeletal imaging with adequate quality at lower field strengths for several regions and indications.

Objectives: The goal is to provide insight into the advantages and disadvantages of low-field musculoskeletal imaging, discuss the current literature, and include our first experiences with a modern 0.55 T MRI.

Materials and methods: This review is based on research in various literature databases and our own musculoskeletal imaging experiences with a modern 0.55 T scanner.

Conclusion: Most publications pertaining to musculoskeletal imaging at low-field strength MRI are outdated, and studies regarding the diagnostic performance of modern low-field MRI systems are needed. These new systems may complement existing high-field systems and make MRI more accessible, even in low-income countries. From our own experience, modern low-field MRI seems to be adequate in musculoskeletal imaging, especially in acute injuries.

Keywords

Field strength · Musculoskeletal injuries · Image quality · Cost · Sustainability

Korrespondenzadresse



Dr. med. Rafael Heiss
Radiologisches Institut, Universitätsklinikum
Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Maximiliansplatz 3, 91054 Erlangen,
Deutschland
rafael.heiss@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) für die zur Verfügung gestellten Messzeiten und die technische Unterstützung.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. T. Pogarell und A.M. Nagel geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht. R. Heiss, M.S. May und M. Uder sind im Rahmen von Vortragsveranstaltungen für Siemens tätig.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

1. Heiss R et al (2021) Low-field magnetic resonance imaging: a new generation of breakthrough technology in clinical imaging. *Invest Radiol* 56(11):726–733
2. Krampla W et al (2009) MRI of the knee: how do field strength and radiologist's experience influence diagnostic accuracy and interobserver correlation in assessing chondral and meniscal lesions and the integrity of the anterior cruciate ligament? *Eur Radiol* 19(6):1519–1528
3. Klein HM (2020) Low-field magnetic resonance imaging. *Rofo* 192(6):537–548
4. Runge VM, Heverhagen JT (2020) Advocating the development of next-generation, advanced-design low-field magnetic resonance systems. *Invest Radiol* 55(12):747–753
5. Kruff O et al (2015) MRI at 7 Tesla and above: demonstrated and potential capabilities. *J Magn Reson Imaging* 41(1):13–33
6. Puig S et al (2015) Magnetic resonance tomography of the knee joint. *Skelet Radiol* 44(10):1427–1434
7. Marques JP, Simonis FFJ, Webb AG (2019) Low-field MRI: an MR physics perspective. *J Magn Reson Imaging* 49(6):1528–1542

8. Tavernier T, Cotten A (2005) High- versus low-field MR imaging. *Radiol Clin North Am* 43(4):673–681
9. Campbell-Washburn AE et al (2019) Opportunities in interventional and diagnostic imaging by using high-performance low-field-strength MRI. *Radiology* 293(2):384–393
10. Del Grande F et al (2014) Fat-suppression techniques for 3-T MR imaging of the musculoskeletal system. *Radiographics* 34(1):217–233
11. Harris CA, White LM (2006) Metal artifact reduction in musculoskeletal magnetic resonance imaging. *Orthop Clin North Am* 37(3):349–359
12. Schröder FF et al (2020) The diagnostic potential of low-field MRI in problematic total knee arthroplasties—a feasibility study. *J Exp Orthop* 7(1):59
13. Lee RK et al (2015) Diagnostic capability of low-versus high-field magnetic resonance imaging for lumbar degenerative disease. *Spine* 40(6):382–391
14. Hutchins TA et al (2021) ACR appropriateness criteria® low back pain: 2021 update. *J Am Coll Radiol* 18(11s):S361–S379
15. Deyle DG (2011) The role of MRI in musculoskeletal practice: a clinical perspective. *J Man Manip Ther* 19(3):152–161
16. Loew R et al (2000) MR arthrography of the shoulder: comparison of low-field (0.2 T) vs high-field (1.5 T) imaging. *Eur Radiol* 10(6):989–996
17. Lee CS et al (2014) Analysis of low-field MRI scanners for evaluation of shoulder pathology based on Arthroscopy. *Orthop J Sports Med* 2(7):2325967114540407
18. Steinbach LS et al (1997) Magnetic resonance imaging of the elbow. *Eur J Radiol* 25(3):223–241
19. Okamoto Y et al (2016) Incidence of elbow injuries in adolescent baseball players: screening by a low field magnetic resonance imaging system specialized for small joints. *Jpn J Radiol* 34(4):300–306
20. Stirling PHC et al (2021) Diagnosis of suspected Scaphoid fractures. *JBJS Rev.* <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.20.00247>
21. Brydie A, Raby N (2003) Early MRI in the management of clinical scaphoid fracture. *Br J Radiol* 76(905):296–300
22. Crues JV et al (2004) Identification of wrist and metacarpophalangeal joint erosions using a portable magnetic resonance imaging system compared to conventional radiographs. *J Rheumatol* 31(4):676–685
23. Vellet AD et al (1995) Anterior cruciate ligament tear: prospective evaluation of diagnostic accuracy of middle- and high-field-strength MR imaging at 1.5 and 0.5 T. *Radiology* 197(3):826–830
24. Cotten A et al (2000) MR imaging of the knee at 0.2 and 1.5 T: correlation with surgery. *AJR Am J Roentgenol* 174(4):1093–1097
25. Verhoek G et al (1998) MRI of the foot and ankle: diagnostic performance and patient acceptance of a dedicated low field MR scanner. *J Magn Reson Imaging* 8(3):711–716
26. Herber S et al (2000) Low-field MRI of the ankle joint: initial experience in children and adolescents using an open 0.2 T MR-system. *Rof* 172(3):267–273

Andrea Petermann-Meyer, Jens Panse, Tim H. Brümmendorf

Leben mit Krebs

Praktischer Ratgeber für Betroffene, Angehörige und Behandelnde

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH 2021, 1. Auflage, 256 S., 18 Abb., (ISBN: 978-3-662-59165-9), Softcover 20,36 EUR



Der Ratgeber **„Leben mit Krebs“** richtet sich an Menschen mit Krebserkrankungen und ist das Resultat einer seit 2011 in Aachen bestehenden Veranstaltungsreihe mit begleitender Internetseite. In dieser Broschüre werden in einfühlsamer Sprache Themen, die Menschen mit einer Krebserkrankung während der Diagnosestellung, im Laufe der Therapie und in der Nachsorge beschäftigen, praxisnah und konkret behandelt. Die 5 inhaltlichen Kapitel beginnen alle mit dem Wort „**Hoffnung**“ (Hoffnung auf ein gutes Leben während und nach einer Krebserkrankung, Hoffnung auf gesundes Leben, Hoffnung auf ein abgesichertes Leben, Hoffnung für spezielle Gruppen, Hoffnung auf Alltag), was den optimistischen und ganzheitlichen Duktus des Ratgebers verdeutlicht. In Unterkapiteln werden alle denkbaren Themen zu konkreten Alltagsfragen (z.B. Tipps zum Arzt-Patient Gespräch, Bewältigungsstrategien von Nebenwirkungen, Komplementärmedizin, Sozialrecht, Patientenverfügung etc.) konkret adressiert. Daneben werden weiter reichende Themen zu Fragen, die über die Krebsdiagnose hinausgehen, in tröstender und hilfreicher Weise behandelt (z.B. Angst und Angstbewältigung, Spiritualität, Junge Erwachsene mit Krebs, Angehörige, Kinder krebskranker Eltern). Schließlich erhalten potentiell angstbesetzte Themen wie Sexualität oder Palliativmedizin ausreichend Raum, um ausführlich, tiefgründig und sehr einfühlsam behandelt zu werden.

Dem Ratgeber merkt man deutlich an, dass er von erfahrenen ärztlich, psychologisch, seelsorgerlich und sozialrechtlich Tätigen geschrieben ist. Medizinische Tipps sind evidenzbasiert und aktuell aber mit dem oft nötigen Spielraum, um eine persönliche Bewältigung beispielsweise von Nebenwirkungen zu ermöglichen. Die Themen allgemeiner Art sind so breit gehalten, dass für (fast) jeden Geschmack etwas Interessantes zu finden ist. Insgesamt tragen alle Kapitel dazu bei, viel Sicherheit zu schaffen, auch zu den Fragen, die sich viele nicht zu stellen trauen. Komplettiert wird die Broschüre wo möglich mit Hinweisen auf Internetseiten und weiterführende Literatur, Selbsthilfegruppen etc. sowie mit einem schlüssigen und hilfreichen Glossar.

Mir war es ein Vergnügen, diese Ratgeber-Broschüre zu lesen. Während der Lektüre stellte sich wiederholt der Wunsch ein, die Broschüre neben den Patienten und Patientinnen ebenfalls allen Personen, die professionell in der Betreuung von Menschen mit Krebserkrankungen tätig sind, ans Herz zu legen und nicht zuletzt auch in den Unterricht von Studierenden zu integrieren.

M. von Lilienfeld-Toal, Jena