

Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Muskuloskeletale Radiologie (DGMSR) zur muskuloskelettalen MRT-Diagnostik

Präambel

Die im Folgenden von der Deutschen Gesellschaft für Muskuloskeletale Radiologie erarbeiteten Standardprotokolle sollen als Vorschlag für Universalprotokolle für die jeweilige anatomische Region verstanden werden, sofern nicht eine spezielle klinische Fragestellung, eine Sequenzfolge oder Schichtrichtung vorgegeben sind. Keinesfalls sollen die vorgeschlagenen Protokolle bindend sein. Die Autoren der DGMSR sind jedoch der Meinung, dass die empfohlenen Protokolle und Untersuchungsgrundsätze die meisten klinischen Fragestellungen in den entsprechenden Organregionen gut abdecken und bei ihrer Anwendung zu qualitativ hochwertigen Untersuchungen führen.

Inhalt - Kapitel sind durch Sprungmarken (Links) erreichbar

Scanner und Spulen	2
Untersuchungstechniken	2
Protokolle	4
1. MRT der Schulter	4
2. MRT des Ellenbogens	6
3. MRT der Hand.....	8
4. MRT der Hüfte.....	11
5. MRT des Kniegelenks	13
6. MRT des Fußes.....	15
7. MRT der Wirbelsäule.....	18
8. MRT bei muskuloskelettalen Tumoren und tumorähnlichen Veränderungen	20

Scanner und Spulen

Die muskuloskelettalen MRT-Untersuchungen sollten an 1,5- oder 3-Tesla-Scannern erfolgen, wobei bei Verfügbarkeit der 3-Tesla-Technologie der Vorzug gegeben werden sollte. Im Extremitätenbereich wird der Einsatz von flexiblen oder dedizierten Mehrkanal-Phased-Array-Spulen mit der Möglichkeit der parallelen Bildgebung empfohlen.

Untersuchungstechniken

Sequenzen: Es besteht Einigkeit, dass die Basis der muskuloskelettalen MRT-Diagnostik die Anwendung wassersensitiven Sequenzen darstellt. Hierzu ist die Elimination des Fettsignals erforderlich. Die häufigsten Verfahren sind die relaxationszeitabhängige (STIR) und frequenzselektive (FS = fatsat, SPIR) Fettsignalunterdrückung.

STIR: Sie ist die Sequenz mit der höchsten Wassersensitivität. Diese wird durch den Nachteil eines vergleichsweise schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses und bei vertretbaren Messzeiten mit einer schlechteren Auslösung und einer erhöhten Schichtdicke erkauft. Die Sequenz erfordert in der Regel die zusätzliche Anwendung einer anatomisch höher auflösenden Sequenz.

IM FS (Intermediär gewichtete Sequenz mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung): Im Gegensatz zur „klassischen“ Protonendichte-Wichtung mit kurzen Echozeiten sollte eine intermediäre Wichtung mit einer auf 35 – 45 ms verlängerten Echozeit eingesetzt werden. Neben der verbesserten Wassersensitivität durch stärkere T2-Gewichtung und für die Gelenkdarstellung optimalen Bildkontrast werden „magic angle“-Artefakte unterdrückt, die bei Echozeiten oberhalb von 35 ms nicht mehr auftreten sollten. Mit dieser Sequenzform ist auch ein Doppelecho möglich. Die Sequenzen werden als Turbo-/Fast-Spinecho-Sequenz (TSE/FSE) mit Echozügen ausgeführt. Bei Problemen in der frequenzselektiven Fettsaturation kann auf die Dixon-Methode zur Separation von Fett- und Wasserbildern ausgewichen werden.

Auflösung: Grundsätzlich sollte in der Abklärung von muskuloskelettalen Fragestellungen eine erweiterte Matrix (320, 384, 448, 512) angestrebt werden. Ziel sollte eine Pixelgröße von $\leq 0,4$ mm sein. Die Schichtdicke für muskuloskelettale Fragestellungen sollte 3 mm nicht überschreiten (Ausnahmen: ausgedehnte Tumore, Pseudotumore). Grundsätzlich ist einer größeren Schichtdicke der Vorzug gegenüber einer größeren Schichtdicke zu geben. Da sowohl eine Vergrößerung der Matrix als auch eine Reduktion der Schichtdicke zur Verschlechterung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses führen, ist eine höhere Magnetfeldstärke B_0 wegen der linearen Verbesserung der Signalausbeute mit der Magnetfeldstärke für muskuloskelettale Untersuchungen vorteilhaft. Bei den vorgegebenen Angaben zur Auflösung handelt es sich um Empfehlungen.

T1-Wichtung: Wenigstens eine native T1-gewichtete (T)SE-Sequenz sollte angefertigt werden, um ggf. Zufallsbefunde des Knochenmarkes besser differenzieren zu können. Auch bei anderen Fragestellungen kann sie hilfreich sein, z.B. Knie koronal bei Tractus-iliotibialis-Fraktur, Knie koronal bei früherer Meniskusdegeneration/-quetschung, Schulter schräg-koronal oder schräg-sagittal bei adhäsiver Kapsulitis, wenn ohne KM untersucht wird, Handgelenk koronal bei Skaphoidfraktur bzw. bei zahlreichen anderen Frakturen anderer Lokalisationen).

2D-T2*-GRE-Sequenzen: Zweidimensionale T2*-gewichtete Gradientenecho-Sequenzen können bei speziellen Fragestellungen hilfreich sein (z.B. zur Darstellung von Blutabbauprodukten (Hämosiderin) bei synovialen Erkrankungen). Allgemein wird dieser Sequenztyp in der muskuloskelettalen Diagnostik aufgrund seiner relativ geringen Pathologiesensitivität jedoch nicht mehr empfohlen.

3D-Sequenzen (GRE-, TSE- oder Hybridtechnik): Es besteht Einigkeit darin, dass 3D-MRT-Sequenzen aufgrund ihres reduzierten Kontrastes die klassischen 2D-Sequenzen (TSE-/FSE- und GRE-Techniken) in der muskuloskelettalen Diagnostik nicht vollständig ersetzen können. Die MRT-Basisdiagnostik sollte deshalb mit nativen und ggfs. kontrastverstärkten 2D-Sequenzen erfolgen. 3D-Sequenzen können in der muskuloskelettalen MRT-Diagnostik additiv eingesetzt werden, um anatomisch komplexe Regionen mit Hilfe von Rekonstruktionstechniken besser zu visualisieren.

Gadolinium (Gad) i.v.: Insbesondere an der Schulter und Hand sowie am Fuß kann die intravenöse Applikation eines gadoliniumhaltigen Kontrastmittels die Diagnostik bei Sehnenerkrankungen mit peritendinösen Veränderungen und bei Kapsel- und Bandläsionen bzw. -verletzungen mit Nachweis von fibrovaskulärem Reparationsgewebe verbessern. Die Gadolinium-Gabe wird bei nahezu allen synovialen Erkrankungen und muskuloskelettalen Tumoren (mit wenigen Ausnahmen) als sehr empfehlenswert erachtet. Kontraindikationen zur Kontrastmittelgabe sind zu beachten.

Protokolle

1. MRT der Schulter

Spulen

Die Untersuchung erfolgt in einer dedizierten Schulerspule. Bei ergänzenden Sequenzen in ABER-Position sollte eine Flex- oder Ring-Spule eingesetzt werden.

Geometrische Parameter

Das FOV wird in Abhängigkeit von der Gelenkgröße möglichst klein gewählt. Die Größe des FOV sollte zwischen 120 mm und 160 mm liegen, die Schichtdicke bei ≤ 3 mm und die in-plane-Auflösung bei $\leq 0.4 \times 0.4$ mm.

Schichtplanung

Grundsätzlich werden Schichten in der parakoronalen, parasagittalen und axialen Ebene angefertigt. Die parakoronalen Aufnahmen werden parallel zum Muskelbauch des M. supraspinatus ausgerichtet. Die parasagittalen Schichten werden senkrecht hierzu (d.h. parallel zur Gelenkfläche des Glenoids) geplant und müssen nach medial mindestens eine Strecke 5 cm zur Erfassung der Rotatorenmanschettenmuskulatur abdecken.

Protokolle und Indikationen

- **Standard-MRT der Schulter:** Bei weniger als 14 Tage zurückliegendem Trauma und bei Fragestellungen, die primär auf die Beurteilung der Rotatorenmanschette abzielen, kann auch das MRT-Standardprotokoll in nativer Technik durchgeführt werden.

Schulter nativ	Basis		Optional
	IM TSE fs	T1 TSE ²	T2 TSE ³
- frisches Trauma - Rotatorenmanschette	parakoronal parasagittal ¹ axial	parakoronal	parasagittal
¹ Erlaubt eine gute Beurteilbarkeit der Subscapularissehne. ² T1 TSE kann fakultativ mit Restore-Impuls durchgeführt werden, um einen arthrographischen Effekt zu erzeugen. ³ Die Sequenz ohne Fettsaturation erlaubt in parasagittaler Schichtung die Beurteilung der Muskelqualität.			

- **MRT V.a. bei Entzündung der Schulter:** Beim Verdacht auf eine entzündliche Komponente einer Gelenkerkrankung (z.B. Synovialitis, Peritendinitis, Bursitis, Kapsulitis) oder beim Verdacht auf einen Tumor ist die MRT-Untersuchung mit i.v.-Kontrastmittel oft vorteilhaft.

Schulter Kontrast ¹ - Synovialitis / Arthritis - Frozen shoulder	Basis				Optional
	IM TSE fs	T2 TSE	T1 TSE	T1 TSE fs i.v.-Gad.	T1 TSE
	parakoronal axial	parasagittal	parakoronal	parasagittal axial	parasagittal
¹ Zur Tumordiagnostik an der Schulter siehe Teil 8 der Empfehlungen.					

- **MR-Arthrographie der Schulter:** Bei Patienten mit chronischer Instabilität, beim Verdacht auf eine multidirektionale Instabilität oder eine Mikroinstabilität sowie bei Überkopfsportlern mit chronischen Schulterbeschwerden sollte eine Arthrographie mit ergänzender Sequenz in ABER-Position durchgeführt werden.

Schulter Arthro - Labrumläsionen - Formen der Instabilität - Pulley-Läsionen	Basis			Optional ¹	
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs	T1 TSE ABER-Pos.	IM TSE fs ABER-Pos.
	parakoronal	parasagittal axial	parakoronal	sagittal	sagittal
¹ Bei chronischer Instabilität, beim Verdacht auf eine multidirektionale Instabilität oder eine Mikroinstabilität sowie bei Überkopfsportlern mit chronischen Schulterbeschwerden sollte eine ergänzende Sequenz in ABER-Position durchgeführt werden.					

2. MRT des Ellenbogens

Lagerung

Sie kann je nach Gantry-Weite und Patientengeometrie auf drei Arten erfolgen: a) Bauchlage mit eleviertem und proniertem Arm: Vorteil ist eine gute frequenzselektive Fettsaturation im Zentrum des Magneten, nachteilig sind die unkomfortable Position. b) Rückenlage mit am Körper anliegendem Arm und vollständiger Supination. Bei inhomogener Flussdichte B_0 kann die frequenzselektive Fettsaturation kompromittiert sein. c) FABS-Lagerung (Flexion, Abduktion, Supination): Ist bei Rupturen der Bizepssehne eine Alternative zu angulierten Schichten entlang des Sehnenverlaufs.

Geometrische Parameter

Das FOV sollte zwischen 120 mm bis 140 mm messen. Die Schichtdicken betragen axial 3 mm (mit Schichtlücke) sowie koronal 2,5 mm (ohne Schichtlücke) und sagittal 2,5 mm (mit Schichtlücke). Die in-plane-Auflösung sollte $\leq 0.3 \times 0.3$ mm gewählt werden.

Schichtplanung

Es werden Schichten in der koronalen, sagittalen und axialen Ebene angefertigt. Die langen Achsen reichen von der distalen Humerusmetaphyse bis distal der Tuberositas radii. Die axialen Schichten werden senkrecht zum Humerusschaft geplant, die koronalen Schichten mit Verlauf zwischen den Humeruskondylen (axialer Lokalisator) und parallel zum Humerus (sagittaler Lokalisator). Für die Darstellung der Kollateralligamente kann eine Angulation der koronalen Schichten um 20° von proximal-dorsal nach distal-palmar sinnvoll sein. Die sagittalen Schichten werden senkrecht auf den koronalen Lokalisatoren geplant.

Protokolle und Indikationen

- **Standard-MRT des Ellenbogens:** Routinemäßig ist die Applikation von intravenösem Kontrastmittel nicht nötig.

Ellenbogen nativ	Basis		
	IM TSE fs	T1 TSE	T2 TSE
- Übersicht - Epikondylitis - Band- / Sehnen-Patho	koronal sagittal ¹	koronal	axial
¹ Sagittale Ebene kann auch mittels T2-TSE-Sequenz akquiriert werden.			

- **Kontrastverstärkte MRT des Ellenbogens:** Die intravenöse Gadolinium-Applikation wird bei Erkrankungen der Synovialis und der peripheren Nerven sowie bei Tumoren empfohlen.

Ellenbogen Kontrast	Basis			
	IM TSE fs	T1 TSE	T2 FSE	T1 TSE fs n. i.v.-Gad.
- Synovialitis, Arthritis	koronal axial	koronal		koronal sagittal
- Neuropathie - Tumore ¹	koronal ²	axial	axial	axial sagittal

¹ Zur Tumordiagnostik am Ellenbogen siehe Teil 8 der Empfehlungen.
² Koronale Ebene kann auch mittels T2-TSE-Sequenz akquiriert werden.

- **Spezielle MRT-Fragestellungen am Ellenbogen:** Sie betreffen Knorpelläsionen und Partialrupturen des Lig. collaterale ulnare. Die FABS-Technik ist bei Bizepssehnenläsionen eine anatomisch basierte Alternative zur Standard-MRT.

Ellenbogen Spezial	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs	3D-GRE
MR-Arthrographie - Chondropathie ¹ - Läsion Lig. collat. ulnare	koronal	sagittal axial	koronal	koronal ²
FABS Ellenbogen - Ruptur der Bizepssehne - Bursitis bicipitoradialis	koronal axial	koronal sagittal		

¹ Eine gute Alternative ist die CT-Arthrographie.
² Rekonstruktionen sagittal, axial und anatomisch-oblique.

3. MRT der Hand

Lagerung

Sie kann in zwei Positionen erfolgen: a) Vorzuziehen ist die Superman-Position in Bauchlage, bei der sich die elevierte und pronierte Patientenhand im Zentrum des Magneten befindet. b) Alternativ erfolgt die Untersuchung in Rückenlage mit adduziertem Arm und der Hand neben der Hüfte. Durch die „off-center“-Lagerung kann es zu Problemen bei der frequenzselektiven Fettsaturation kommen.

Schichtplanung

Bei der Lagerung muss der Mittelfinger kolinear zum Unterarm ausgerichtet sein. Die axialen Schichten werden senkrecht zur Unterarm-Mittelfinger-Achse ausgerichtet. Die koronalen Schichten werden an der Querschnittsfläche des Radius geplant, die sagittalen Schichten senkrecht auf den koronalen Schichten. Da der Daumen schräg zu den Standardraumbenen ausgerichtet ist, müssen die Schichten am Daumen selektiv geplant werden. Wegen der doppelschrägen Ausrichtung des Skaphoid sind zu dessen selektiver Darstellung schräg-sagittale und schräg-koronale Schichten vorteilhaft.

Geometrische Parameter

Sinnvoll ist die Unterscheidung von vier Untersuchungsregionen:

- **Handwurzel:** FoV 80 mm - 120 mm, Schichtdicke koronal 2,0 mm - 2,5 mm (ohne Schichtlücke), axial und sagittal jeweils 2,5 mm - 3,0 mm (mit Schichtlücke).
- **Mittelhand:** Akquisitionsparameter wie an der Handwurzel.
- **Daumen und Finger:** FoV 120 mm - 140 mm, Schichtdicken koronal und sagittal 1,5 mm - 2,0 mm (ohne Schichtlücke) sowie axial 2,5 mm - 3,0 mm (mit Schichtlücke).
- **Ganze Hand:** FoV 200 mm - 240 mm, Schichtdicken koronal 2,5 mm (ohne Schichtlücke) und sagittal 2,5 mm (mit Schichtlücke), axial 3,0 mm (mit Schichtlücke).

Die in-plane-Auflösung sollte $\leq 0.3 \times 0.3$ mm betragen.

3D-Sequenzen

3D-Sequenzen in GRE- oder FSE-Technik können optional eingesetzt werden. Sie bieten Vorteile in der Darstellung kleiner oder anatomisch komplexer Strukturen wie dem TFCC und den Extensorensehnen der Finger.

Kontrastmittel

Bei vielen MRT-Indikationen der Hand (z.B. synoviale Erkrankungen, posttraumatische Reparatur, Osteonekrosen, Tumore) ist die Applikation von intravenösem Kontrastmittel von großem Vorteil und wird deshalb in den Protokollen angegeben. Bei Kontraindikation ist auch bei den obigen Indikationen auf die Kontrastmittelgabe zu verzichten.

Protokolle und Indikationen

- **Natives MRT-Standardprotokoll an der Handwurzel und Mittelhand:** Für beide Regionen wird bei aufgeführten Indikationen ein natives Protokoll empfohlen:

Handwurzel / Mittelhand nativ	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T2 TSE	T2 TSE
<ul style="list-style-type: none"> - frisches Trauma - Übersicht bei unklarer Symptomatik - Weichteilganglion - Kontraindikation bzw. Ablehnung von KM 	koronal axial	koronal	sagittal	3D-GRE koronal ¹ IM TSE FS schräg-sag. ²
¹ Rekonstruktionen sagittal und axial, am Skaphoid schräg-sagittal. ² bei Verdacht auf Skaphoidfraktur.				

- **Kontrastverstärkte MRT-Protokolle an der Handwurzel und Mittelhand:** Für beide Regionen werden fragestellungsspezifisch folgende Protokolle mit i.v.-Gadolinium empfohlen:

Handwurzel / Mittelhand Kontrast	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs n. i.v.-Gad. ¹	
<ul style="list-style-type: none"> - Ligamente, TFCC - Arthritis - ulnokarpale Impaktation 	koronal axial	koronal	koronal sagittal	3D-GRE koronal ²
<ul style="list-style-type: none"> - Ganglion, Tumor ³ - Neuropathie 	axial ⁴ koronal	axial	axial sagittal	
<ul style="list-style-type: none"> - Tendopathie 	koronal sagittal	axial	koronal axial	3D-GRE koronal ²
<ul style="list-style-type: none"> - Lunatumnekrose - Skaphoidfraktur / Skaphoidpseudarthrose 	koronal sagittal ⁵	koronal	koronal sagittal ⁵	
¹ Siehe Kommentar bzgl. der Indikationen zum Kontrastmittel-Einsatz an der Hand ² Rekonstruktionen (MPR) sagittal, axial und anatomisch-oblique. ³ Zur Tumordiagnostik an der Hand siehe auch Teil 8 der Empfehlungen. ⁴ Alternativ T2-FSE-Sequenz ohne Fettsaturation. ⁵ In der Skaphoiddiagnostik schräg-sagittal parallel zur Längsachse des Skaphoids.				

- **MRT-Spezialprotokolle:** Für besondere Fragestellungen an der Handwurzel bzw. ganzen Hand können folgende Protokolle zum Einsatz kommen:

MR-Arthrographie karpal Zielauftrag bei - SL-/LT-Dissoziation - TFCC-Läsion - Chondropathie	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs	
	koronal	axial	koronal sagittal	3D-GRE koronal ¹
¹ Rekonstruktionen (MPR) sagittal, axial und anatomisch-oblique.				

Ganzhand-MRT Kontrast - Arthritis - seroneg. Enthesiopathie - Fehlbildung	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	3D GRE n. i.v.-Gad. ¹	
	koronal	Koronal	koronal ²	T1 TSE fs n. i.v.-Gad koronal
¹ Siehe obigen Kommentar bzgl. der Indikationen zum Kontrastmittel-Einsatz an der Hand. ² Rekonstruktionen (MPR) sagittal und axial (DRUG, Karpus, MCP- und PIP-Gelenke).				

- **MRT des Daumens und der Finger:** Getrennt nach Daumen und den Fingern II bis V, werden folgende Protokolle empfohlen:

Standard Daumen/Finger	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs n. i.v.-Gad. ¹	
- Gelenkpathologie - Kollateralbänder	koronal axial ²	koronal	koronal sagittal	3D-GRE koronal ³
- Tendopathie - palmare Platte	sagittal axial ²	sagittal	sagittal koronal	3D-GRE koronal ³
¹ Siehe obigen Kommentar bzgl. der Indikationen zum Kontrastmittel-Einsatz an der Hand ² Eine Alternative ist die T2*-GRE-Sequenz. ³ Rekonstruktionen (MPR) sagittal und axial.				

4. MRT der Hüfte

Allgemeines und Spulen

Die gleichzeitige Untersuchung beider Hüftgelenke ist nicht mehr zeitgemäß und sollte nur noch in Ausnahmefällen durchgeführt werden (z. B. bei bilateraler Hüftkopfnekrose). Da heute auch für die MRT der Hüfte geeignete Oberflächenspulen existieren, wird in der Regel nur die symptomatische Seite mit möglichst hoher Ortsauflösung untersucht.

Geometrische Parameter

Das empfohlene FOV liegt bei 160 mm, die Schichtdicke bei ≤ 3 mm (2D). Die in-plane-Auflösung sollte $\leq 0.4 \times 0.4$ mm gewählt werden.

Schichtplanung

Es werden koronale, sagittale und axiale Standardschichten oder angulierte Speziialschichten nach folgende Vorgaben angefertigt. a) Koronare Schichten werden bei Gelenkpathologien streng koronal akquiriert, bei Pathologien des proximalen Femurabschnitts (Hüftkopfnekrose, transientes Knochenmarködem-Syndrom, etc.) parakoronal parallel zum Schenkelhals. b) Sagittale Schichten werden immer streng sagittal angefertigt. c) Axiale Schichten werden nur extraartikulären Pathologien streng axial akquiriert, bei Gelenkpathologien (FAI, Labrum) dagegen paraaxial durch den Schenkelhals.

3D-Sequenz

Fakultativ kann ergänzend eine 3D-GRE-Sequenz aufgenommen werden, die zur Beurteilung des Labrum acetabulare und des Gelenkknorpels sowie beim femoroacetabulären Impingement zur Anfertigung radiärer Rekonstruktionen um den Schenkelhals verwendet werden kann. Empfohlen wird eine Ortsauflösung von 0.7 mm isotrop. Sequenzen mit hohem Signal der Gelenkflüssigkeit (WE-DESS, WATSf, TrueFISP, etc.) ist hierbei der Vorzug zu geben.

Kontrastmittel

Kontrastverstärkte Sequenzen können mitunter hilfreich sein, sind aber oft entbehrlich. Auch bei der Hüftkopfnekrose ist eine intravenöse Kontrastmittelapplikation nicht obligat erforderlich.

Protokolle und Indikationen

- **Standard-MRT der Hüfte:** Bei den häufigsten Indikationen am Hüftgelenk und Schenkelhals wird ein natives Standardprotokoll empfohlen, das optional durch kontrastverstärkte Sequenzen ergänzt werden kann.

Hüfte nativ / Kontrast	Basis		Optional		
	IM TSE fs	T1 TSE	3D-GRE ²	T1 TSE ³	T1 TSE fs n. i.v.-Gad. ⁴
Alle Indikationen ¹ außer Läsionen - des Labrums - des Knorpels - des FAI	koronal sagittal axial	koronal	koronal	sagittal	koronal sagittal
¹ Zur Tumordiagnostik an der Hüfte siehe Teil 8 der Empfehlungen. ² Bei FAI und Labrumläsionen. Radiäre Rekonstruktionen (MPR). ³ Bei Hüftkopfnekrose, transientem Knochenmarködem-Syndrom und subchondr. Insuffizienzfraktur. ⁴ Bei entzündlichen Veränderungen, Hüftkopfnekrose, transientem Knochenmarködem-Syndrom, subchondraler Insuffizienzfraktur, Arthrose, Enthesiopathie, Bursitis, etc.					

- **MR-Arthrographie der Hüfte:** Auch bei 3 Tesla ist die MR-Arthrographie als das genaueste Verfahren für intraartikuläre Pathologien nur bei speziellen klinischen Fragestellungen zum Labrum und Gelenkknorpel indiziert.

Hüfte Arthro	Basis			Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs	3D-GRE ¹
- Labrumläsion - Chondropathie - FAI (auch postoperativ) - freie Gelenkkörper	koronal	sagittal axial	koronal	koronal
¹ Radiäre Rekonstruktionen (MPR).				

5. MRT des Kniegelenks

Geometrische Parameter

Empfohlen wird ein FOV von 160 mm, das ggf. in der Langachse vergrößert werden muss (z.B. bei V.a. Läsionen des distalen Anteils des M. quadriceps bzw. seiner Sehne). Die Schichtdicke sollte ≤ 3 mm betragen. Die in-plane-Ortsauflösung sollte bei $\leq 0,4 \times 0,4$ mm liegen.

Schichtplanung

Koronale Schichten werden parallel zur einer Tangente entlang der Hinterränder der Femurkondylen orientiert. Sie sollten den distalen Ansatz des Innenbandes mit erfassen. Wenn die sagittalen Schichten parallel zur Innenseite des Condylus femoris medialis ausgerichtet werden, bilden sie das vordere Kreuzband langstreckig ab. Axiale Schichten sollen den Bereich von ca. 2 cm oberhalb der Patella (Quadrizepssehne) bis einschließlich die Tuberositas tibiae erfassen. Sie werden parallel zum Tibiakopfplateau ausgerichtet.

Sequenzen einschließlich 3D-Bildgebung

Für die Meniskusdiagnostik können IM-TSE-Sequenzen ohne Fettsaturation mit einer Schichtdicke von 1,8 mm – 2,0 mm vorteilhaft sein (z.B. Ersatz der sagittalen oder koronalen Standard-IM-FSE-FS durch IM FSE von 2 mm). Fakultativ können knorpelsensitive Sequenzen verwendet werden: sagittal T1-3D-SPGR / FLASH / FFE fs/WE oder z.B. 3D-DESS WE.

Protokolle und Indikationen

- **Native MRT des Kniegelenks:** Zur Abklärung von traumatischen und degenerativen Veränderungen wird in der Regel das native Standardprotokoll empfohlen, das optional durch kontrastverstärkte Sequenzen ergänzt werden kann.

Knie nativ	Basis		Optional	
	IM TSE fs	T1 TSE	T2 FSE ¹	T2* GRE ²
- Trauma - Arthrose - sonstige Arthropathien	sagittal koronal axial	sagittal	schräg-koronal	sag. oder kor.

¹ In schräg-koronaler 2mm-Schicht zur Beurteilung des vorderen Kreuzbandes.
² Gradientenecho-Sequenz beim Verdacht auf PVNS (tenosynovialer Riesenzelltumor).

- **Kontrastverstärkte MRT des Kniegelenks:** Bei V.a. entzündliche Veränderungen (Synovialitis, Arthritis, Abszess), zum Nachweis von Granulationsgewebe, zum Ausschluss von Osteonekrosen und in der Tumordiagnostik werden kontrastverstärkte Sequenzen ergänzend empfohlen.

Knie Kontrast	Basis		
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 FSE fs n. i.v.-Gad.
	- entzündliche Erkrank. - Granulationsgewebe - Knochenmarködem und DD - Tumor ¹	sagittal koronal axial	sagittal

¹ Zur Tumordiagnostik am Knie siehe Teil 8 der Empfehlungen.

- **MR-Arthrographie des Kniegelenks:** Indikationen sind die postoperative Abklärung von Beschwerden nach Meniskusnaht, die Diagnostik von initialen Chondropathien und die Stabilitätsdiagnostik von osteochondralen Läsionen.

Knie Arthro	Basis		
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 FSE fs
	- postoperat. Meniskus - Chondropathie - osteochondral. Läsion	sag. od. kor. axial	sagittal

6. MRT des Fußes

Allgemeines

MRT-Untersuchungen des Rückfußes (einschließlich des oberen und unteren Sprunggelenks) und des Mittel- und Vorfußes stellen eigenständige Untersuchungen dar, so dass vor Untersuchungsbeginn die lokalisatorische Eingrenzung anhand der klinischen Fragestellung erfolgt sein muss. Die Bezeichnungen der Schichtebenen entspricht am Fuß derjenigen am übrigen Körper.

Lagerung

a) Rückfuß: Die Untersuchung des Rückfußes mit den Sprunggelenken erfolgt in Rücklage des Patienten. **b) Mittel- und Vorfuß:** Die Untersuchung des Vor- bzw. Mittelfußes erfolgt bevorzugt in Bauchlage, wenn das bei den vorhandenen Spulen möglich ist.

Geometrische Parameter

In beiden Untersuchungsregionen liegt das empfohlene FoV bei 100 mm – 140 mm, die Schichtdicke bei ≤ 3 mm (2D). Bei Verletzungen der Achillessehne ist es empfehlenswert, anhand von sagittalen Lokalisatoren das FoV so zu vergrößern, dass die Sehne einschließlich des muskulotendinösen Übergangs erfasst ist. Die in-plane-Auflösung sollte ≤ 0.3 mm x 0.3 mm gewählt werden.

Schichtplanung

Es werden koronale, sagittale und axiale Schichten angefertigt. **a) Rückfuß:** Am oberen Sprunggelenkes werden die Schichtebenen parallel bzw. orthograd zur Malleolengabel ausgerichtet. **b) Mittel- und Vorfuß:** Bei der Untersuchung des Vorfußes bzw. Mittelfußes werden die axialen Schichten parallel zur langen Achse der Metatarsalia ausgerichtet. Die koronaren Schichten werden senkrecht zu den Metatarsalia und die sagittalen Schichten parallel zum Rückfuß geplant. Für eine exakte Ausrichtung der Schichten ist eine Planung auf Lokalisationsbildern in allen drei Raumebenen erforderlich.

Kontrastmittel

Bei frischen traumatischen und bei degenerativen Fragestellungen ist die intravenöse Kontrastmittel-Applikation häufig entbehrlich. Dagegen ist Kontrastmittel meist in der Abklärung von Entzündungen und von Tumoren erforderlich. Sie kann bei Kompressionssyndromen (Impingement, Sinus-tarsi-Syndrom), zum Nachweis von Granulationsgewebe und der Vitalität von Dissekatoren hilfreich sein.

Protokolle und Indikationen am Rückfuß

- **Native MRT des Rückfußes:** Zur Abklärung von traumatischen und degenerativen Erkrankungen am oberen Sprunggelenk ist häufig das native Standardprotokoll ausreichend.

Rückfuß nativ	Basis		
	IM TSE fs	T1 TSE ²	T2 FSE
- Bandverletzungen - Sehnenpathologien - Chondropathie - Degenerative Veränderungen	koronal sagittal axial ¹	koronal	axial ¹
¹ Fakultativ kann zwischen IM TSE fs axial und T2 TSE axial gewählt werden. Die Verwendung beider Sequenzen erhöht die Genauigkeit bei fibularen Bandverletzungen. ² Die T1-FSE-Sequenz kann fakultativ mit einem Restore-Impuls durchgeführt werden, um einen arthrographischen Effekt zu erzeugen.			

- **Kontrastverstärkte MRT des Rückfußes:** Zur Diagnostik von entzündlichen und tumorösen Erkrankungen am oberen Sprunggelenk ist die intravenöse Kontrastmittelapplikation in der Regel erforderlich.

Rückfuß Kontrast	Basis				Optional
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.	T1 TSE fs n. i.v.-Gad.	T2 TSE
- Synovialitis, Arthritis - Tumore ¹	koronal sagittal ²	axial	sagittal	axial	sagittal ²
¹ Zur Tumordiagnostik am Rückfuß siehe Teil 8 der Empfehlungen. ² Fakultativ kann zwischen IM TSE fs sagittal und T2 TSE sagittal gewählt werden.					

- **MR-Arthrographie des oberen Sprunggelenks:** Sie ist gelegentlich bei Chondropathien und osteochondralen Läsionen indiziert. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesen Fragestellungen die Multislice-CT aufgrund ihrer höheren Ortsauflösung überlegen sein kann.

Sprunggelenk Arthro	Basis		
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE fs
- Chondropathie			
- Osteochondrale Läsion	koronal axial ¹	koronal axial ¹ sagittal	sag od. kor.

¹ Fakultativ kann zwischen IM TSE fs axial und T1 TSE axial gewählt werden. Die Verwendung beider Sequenzen erhöht Genauigkeit bei fibularen Bandverletzungen
² Wahl der Ebene richtet sich nach Lokalisation der Läsion (OCL, Chondropathie)

Protokolle und Indikationen am Mittel- und Vorfuß

- **Kontrastverstärkte MRT des Mittel- und Vorfußes:** Zur Abklärung von Pathologien im Bereich des Vorfußes (z.B. Morton-Neurom, Stressfraktur, Verletzung der plantaren Platte) wird die Applikation von intravenösem Kontrastmittel empfohlen.

Mittel-/Vorfuß Kontrast	Basis			
	IM TSE fs	T2 TSE	T1 FSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.
- Morton-Neurom ^{1,2}				
- Stressfraktur ¹				
- plantare Platte	axial sagittal	koronal ²	kor. od. axial ¹	kor. od. axial ¹

¹ Koronale Ebene bevorzugt beim Morton-Neurom, axiale Ebene bevorzugt bei Stressläsionen.
² Zur Tumordiagnostik am Mittel- und Vorfuß siehe Teil 8 der Empfehlungen.
³ Fakultativ kann die Sequenz auch in der koronalen Ebene mit Fettsaturation durchgeführt werden.

- **Kontrastverstärkte MRT bei Charcot-Arthropathie und Osteomyelitis:** Zur Abklärung beider Entitäten unterscheidet sich das Vorgehen vom Standardprotokoll. Von der wichtigen T1-TSE-Sequenz sollten nativ zwei Ebenen akquiriert werden.

Charcot-Fuß Kontrast	Basis			
	IM TSE fs	T1 TSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.	T1 TSE fs n. i.v.-Gad.
- Charcot-Arthropathie				
- Osteomyelitis	axial ¹ koronal	axial sagittal	axial od. sag.	koronal

¹ Um das Protokoll zu kürzen, kann am ehesten auf die axiale IM TSE fs verzichtet werden

7. MRT der Wirbelsäule

Wirbelsäulenabschnitte

a) HWS: In den Langachsen sollen der kraniozervikale Übergang und der zervikothorakale Übergang bis einschließlich BWK 2 eingeschlossen sein. **b) BWS:** In den Langachsen sollen der zervikothorakale und der thorakolumbale Übergang eingeschlossen sein. Zur korrekten Höhenlokalisierung ist ein Localizer in der sagittalen Ebene vom kraniozervikalen Übergang bis zur LWS erforderlich. **c) LWS:** In den Langachsen sollen der thorakolumbale Übergang und das Sakrum bis mindestens SWK 3 eingeschlossen sein. Koronale Schichten sollten die Iliosakralgelenke vollständig miterfassen. In unklarer Situation einer lumbosakralen Übergangsanomalie kann ein Localizer der gesamten Wirbelsäule zur korrekten Höhenlokalisierung hilfreich sein.

Geometrische Parameter

Das longitudinale FoV wird nach dem untersuchten Wirbelsäulenabschnitt eingestellt (siehe Wirbelsäulenabschnitte). Es werden Schichtdicken ≤ 3 mm empfohlen. Die in-plane-Auflösung sollte in den longitudinalen Achsen (sagittal und koronal) $\leq 1 \times 1$ mm betragen, in der axialen Ebene $\leq 0,8 \times 0,8$ mm.

Schichtplanung

Es werden koronale, sagittale und axial-angulierte Schichten nach folgende Vorgaben angefertigt:

a) Sagittale Schichten sollten den untersuchten Wirbelsäulenabschnitt über die gesamte Breite einschließlich der Facettengelenke und Neuroforamina erfassen (cave: Skoliosen). **b) Koronale Schichten** müssen auch den Paravertebralraum abdecken, an der LWS einschließlich den M. psoas. **c) Axiale Schichten** sollten orthogonal zur Längsachse der Wirbelkörper bzw. in der Bandscheibenebene ausgerichtet sein, d.h. bei kypholordotischen und/oder skoliotischen Wirbelsegmenten einfach- oder doppelanguliert werden.

Protokolle und Indikationen

- Native MRT der Wirbelsäule:** Zur Abklärung von degenerativen Veränderungen, Radikulopathien und Frakturen wird primär eine native MRT des betroffenen Wirbelsäulenabschnitts empfohlen.

Wirbelsäule nativ	Basis			Optional	
	T1 TSE	T2 TSE	STIR TSE / T2 TSE fs	T2 FSE oblique	3D-Myelographie
- Degeneration	sagittal ¹	sagittal ¹ axial	koronal ¹	schräg-sag. ²	koronal ³
- Radikulopathie					
- Fraktur					
¹ An der LWS inklusive Sakrum und Iliosakralgelenken. ² An der HWS zur besseren Beurteilung der Neuroforamina, an der LWS zum besseren Nachweis von Spondylsen. ³ Beurteilung in Partitionsschichten und in MIP-Bildern.					

- **Kontrastverstärkte MRT der Wirbelsäule:** Zur Abklärung von entzündlichen Erkrankungen der Wirbelsäule (Aktivierung der Facettengelenke, erosive Osteochondrose, postoperatives Granulations-/Narbgewebe, Spondylodiszitis, etc.) sowie zur Tumordiagnostik (primäre und sekundäre Neoplasien) wird die Applikation von intravenösem Kontrastmittel empfohlen.

Wirbelsäule Kontrast	Basis				Optional
	T1 TSE	T2 TSE	STIR FSE / T2 TSE fs	T1 TSE fs n. i.v.-Gad.	3D-Myelographie
- Entzündungen (einschl. Aktivierung)					
- Tumore ¹	sagittal ² axial ³	sagittal ² axial ³	koronal ²	sag. ² od. axial ^{3,4}	koronal ⁵

¹ Zur Tumordiagnostik an der Wirbelsäule siehe Teil 8 der Empfehlungen.

² An der LWS inklusive Sakrum und Iliosakralgelenke.

³ Bei Spondylodiszitis den M. psoas und angrenzenden Paravertebralraum einschließen.

⁴ Schichtführung abhängig von der Fragestellung. Ggfs. auch koronale Schicht akquirieren.

⁵ Beurteilung in Partitionsschichten und in MIP-Bildern.

8. MRT bei muskuloskelettalen Tumoren und tumorähnlichen Veränderungen

Allgemeines

Zur Untersuchungsplanung (und Befundung) sollten konventionelle Röntgenaufnahmen vorliegen.

FoV, Schichtplanung und geometrische Parameter

Größe des FoV, Spulwahl und Schichtdicke müssen der Ausdehnung der Läsion angepasst werden. Dabei ist grundsätzlich eine möglichst hohe Ortsauflösung anzustreben. Bei fokalen Knochenläsionen muss nicht der gesamte Knochen dargestellt werden (dies ist nur bei der Erstuntersuchung von Osteosarkomen und Ewing-Sarkomen erforderlich). Bei **Knochen- und Weichteilläsionen** muss das benachbarte Gelenk mit abgebildet werden. Bei **Gelenktumoren** muss das befallene Gelenk vollständig erfasst sein. Die jeweilige Haupt-Untersuchungsebene richtet sich nach dem jeweiligen Gelenk.

Sequenzen

Typische „Gelenk-Sequenzen“ (PD FS, IM FS, GRE) sind bei der Tumordiagnostik als alleinige Untersuchungssequenzen ungeeignet. Das Protokoll muss neben nativen T1-gewichteten Aufnahmen immer auch eine „echte“ T2-gewichtete Sequenz (lange Echozeit) beinhalten. Die axialen T2-gewichteten Aufnahmen sind für die Ausbreitungsdiagnostik von Knochen- und Weichteiltumoren sehr wichtig und sollten mit möglichst hoher Ortsauflösung gemessen werden. Eine Unterdrückung des Fettsignals ist für die Beurteilung der Lagebeziehung zu Gefäßen und Nerven eher kontraproduktiv. Alternativ können DIXON-Sequenzen eingesetzt werden.

Kontrastmittel

Kontrastverstärkte Sequenzen sind oft für die Charakterisierung von Knochen- und Weichteilläsionen hilfreich. Wenn Kontrastmittel appliziert wird, müssen die Aufnahmen vor und nach KM-Gabe zumindest in einer Untersuchungsebene mit identischen Parametern angefertigt werden (Möglichkeit der Bildsubtraktion).

Protokolle und Indikationen

- **MRT bei Knochenläsionen:** Bei benignen und malignen Tumoren, tumorähnlichen Knochenveränderungen und bei Osteomyelitis etc. wird folgendes MRT-Protokoll empfohlen:

Knochenläsionen Kontrast	Basis			
	T2 TSE ¹	STIR TSE / IM FSE fs	T1 TSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.
	axial	kor. oder sag.	kor. oder sag.	kor. oder sag. axial ³

¹ Alternativ kann axial eine T2-Dixon-Sequenz akquiriert werden (cave: Ortsauflösung)
² Die Schichtorientierung in der langen Achse richtet sich auch nach dem benachbarten Gelenk. An Hand-, Schulter- und Hüftgelenk sollte koronal untersucht werden, an Knie und Sprunggelenk eher sagittal.
³ Mit Fettsaturation.

- **MRT bei Weichteilläsionen:** Bei Weichteiltumoren und Pseudotumoren etc. wird folgendes MRT-Protokoll empfohlen:

Weichteilläsionen	Basis				Optional
	T2 TSE	STIR TSE / IM FSE fs	T1 TSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.	T2* GRE ²
	axial	kor. od. sag.	kor. od. sag.	kor. od. sag. axial ¹	kor., sag. oder axial

¹ Mit Fettsaturation.
² Zur Darstellung von Blutabbauprodukten.

- **MRT bei Gelenktumoren:** Es wird folgendes MRT-Protokoll empfohlen (siehe auch die Empfehlungen bei den Gelenkregionen):

Gelenktumore	Basis				Optional
	T2 TSE	T2* GRE	T1 TSE	T1 TSE n. i.v.-Gad.	STIR FSE / IM FSE fs ²
	kor. od. sag. ¹	kor. od. sag. ¹	kor. od. sag. ¹	kor. od. sag. ¹ axial ²	kor., sag. oder axial

¹ Die Schichtorientierung in der langen Achse richtet sich nach dem Gelenk. An Schulter- Hand-, und Hüftgelenk sollte koronal untersucht werden, dagegen an Ellenbogen, Knie und Sprunggelenk sagittal.
² Mit Fettsaturation.