

AWMF Leitlinie (S1) Ganzkörpermagnetresonanztomografie im Kindes- und Jugendalter

Jürgen Frank Schäfer^{1,2}, Daniel Berthold^{3,1}, Gabriele Hahn^{4,1}, Thekla von Kalle^{5,1}, Jörg Moritz^{6,1}, Cornelia Schröder^{7,1}, Marc Steinborn^{8,1}, Jürgen Weidemann^{9,1}, Rainer Wunsch^{10,1} und Hans-Joachim Mentzel^{11,1}

¹ Leitlinienkommission der Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie

² Bereich pädiatrische Radiologie, Abt. diagnostische und interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Tübingen, Hoppe-Seyler-Straße 3, 72076 Tübingen

³ Sektion Kinderradiologie, Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Kinderradiologie, Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH, Feulgenstraße 10-12, 35392 Gießen

⁴ Bereich Kinderradiologie, Institut und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der TU Dresden, Fetscherstrasse 74, 01307 Dresden

⁵ Kinderradiologie, Radiologisches Institut, Olgahospital, Klinikum Stuttgart, Kriegsbergstraße 62, 70174 Stuttgart

⁶ Kinderradiologie, Klinik für Radiologie und Neuroradiologie, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, Haus C, Arnold-Heller Str. 3, 24105 Kiel

⁷ Förderradiologicum, Standort Lubinus, Steenbeker Weg 25, 24106 Kiel

⁸ Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Kinderradiologie, München Kliniken, Klinikum Schwabing, Kölner Platz 1, 80804 München

⁹ Kinderradiologie, Kinder- und Jugendkrankenhaus Auf der Bult, Janusz-Korczak-Allee 12, 30173 Hannover

¹⁰ MVZ blick Radiologie - Kinderradiologie am Marienhospital Witten, Marienplatz 2, 58455 Witten

¹¹ Sektion Kinderradiologie, Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Jena, Am Klinikum 1, 07747 Jena

1. Einleitung

Die Ganzkörpermagnetresonanztomografie (GK-MRT) ist eine bildgebende Methode, welche unter Nutzung fortgeschrittener Verfahren moderner MRT-Geräte eine hochaufgelöste Darstellung des gesamten Körpers ermöglicht (1-5). Prinzipiell unterscheiden sich unter diesen Voraussetzungen weder Bildqualität noch Bildkontrast von Teilkörperuntersuchungen an Kopf und Körperstamm, wenn alters- und indikationsadaptierte Protokolle zusätzlich angewendet werden (1, 3-7). Einbußen in der Ortsauflösung im Bereich von peripheren Gelenken sind allerdings zu beachten. Eine GK-MR-Angiografie ist möglich (8). Eine GK-MRT ist sowohl bei einer Feldstärke von 1,5 als auch von 3 Tesla durchführbar (9). Die Untersuchungsdauer ist abhängig von der Anzahl der gewählten Bildkontraste sowie weiterer geräte- und messprotokollabhängiger Parameter und kann daher stark variieren. Insbesondere bei Kindern und Jugendlichen ist eine Anpassung des Protokolls an die Fragestellung zur Begrenzung der Untersuchungszeit erforderlich.

Bekanntermaßen ist die MRT bei soliden Tumoren im Kindes- und Jugendalter Methode der Wahl zur Beurteilung des Lokalbefundes. Sie wird aber zunehmend auch als GK-MRT im Rahmen der systemischen Ausbreitungsdiagnostik durchgeführt (3, 6, 7, 10-33). Insbesondere die osteomedullären Metastasen stehen hierbei im Fokus (22, 23, 26, 32, 34-37). Bei hereditären Syndromen mit erhöhter Tumorfrequenz wird die GK-MRT im Rahmen des Screenings zukünftig eine noch größere Rolle spielen (38-46). Neben den malignen soliden Tumoren bedürfen eine Reihe nicht maligner Erkrankungen z.B. aus dem rheumatischen Formenkreis einer systemischen Ausbreitungsdiagnostik mittels bildgebender Verfahren. Ziel ist es, mittels GK-MRT eine Differenzierung zwischen lokal begrenzter und fortgeschrittener systemischer Erkrankung sowie unter Umständen eine Detektion bisher klinisch stummer Regionen zu erreichen (47-56). Auch die Suche nach einem entzündlichen Fokus ist eine Indikation für die GK-MRT (57).

Die GK-MRT konkurriert mit anderen Verfahren der radiologischen Diagnostik, insbesondere mit der Computertomografie (CT), der Positronenemissionstomografie in Kombination mit der CT (PET/CT) oder MRT (PET/MRT) und der Szintigrafie, die alle mit einer relevanten Strahlenexposition einhergehen können. Generell gilt daher, dass die GK-MRT immer dann zur Anwendung kommen kann, wenn sich bei zumindest gleicher radiologischer Aussagekraft eines der genannten Verfahren einsparen lässt oder wenn die GK-MRT komplementäre Informationen liefert (7, 12, 14-17, 19, 20, 23, 27, 32, 35-37, 43, 47, 48, 50, 51, 53-56, 58-68).

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde die diagnostische Genauigkeit der GK-MRT verschiedener pädiatrischer Erkrankungen in erster Linie im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren untersucht und die Überlegenheit gegenüber konventionellen bildgebenden Methoden außerhalb der Lungenbildgebung gezeigt (15, 27, 32, 35, 36, 52, 54, 55, 64). Aufgrund des Mangels an großen prospektiven und randomisierten Studien liegt für die GK-MRT jedoch kein hoher Evidenzgrad vor.

Aus Sicht der Leitlinienkommission kann aufgrund der hohen Sensitivität der Methode die Gefahr einer Überdiagnostik insbesondere im Umgang mit Zufallsbefunden oder vermeintlichen Pathologien bestehen, wenn die Befunderstellung ohne ausreichende Erfahrung in der pädiatrischen Radiologie erfolgt. Da die GK-MRT in allen Altersstufen sinnvoll eingesetzt werden kann, sind umfangreiche Kenntnisse zur normalen Reifung der Organsysteme eine wesentliche Voraussetzung für eine optimale Befundqualität und Bewertung der erhobenen Befunde.

Ziel dieser Leitlinie ist es, Indikationen zu benennen, bei denen die GK-MRT im Kindes- und Jugendalter empfohlen werden kann, und dafür notwendige, technische Voraussetzungen zu beschreiben.

2. Schlüsselempfehlungen

| | Votum | Verhältnis |
|---|-------|------------|
| Mit der Ganzkörper-Magnetresonanztomografie (GK-MRT) kann die Ausbreitung von systemischen malignen und nicht malignen Erkrankungen im Kindes- und Jugendalter untersucht werden. | Ja | 10/10 |
| Für eine klinisch verwertbare diagnostische Aussage der Methode sollten alters- und indikationsadaptierte Protokolle gewählt werden und die Befunderstellung durch in der pädiatrischen Radiologie erfahrene Untersucher erfolgen. | Ja | 10/10 |
| Zusätzliche Untersuchungen mittels anderer bildgebender Verfahren können indiziert sein. | Ja | 10/10 |

3. Erläuterungen

3.1. Indikationen

Tabelle 1. Indikationen für eine GK-MRT

| <u>Diagnose</u> | <u>Fragestellung</u> |
|---|---|
| Maligne Tumore | Staging, Tumorausbreitung, Restaging und Follow-up |
| Langerhans Cell Histiocytose (LCH) | Ausbreitungsdiagnostik, Unifokal vs. Multifokal, Therapiemonitoring |
| Avaskuläre Osteonekrose (AVN) | Ausmaß und Schweregrad, Detektion von asymptomatischen Befunden |
| Chronisch nicht bakterielle Osteomyelitis (CNO/NBO/CRMO) | Unifokal vs. multifokal, „silent lesion“, Therapiemonitoring |
| Juvenile idiopathische Arthritis (JIA) | Unifokal vs. multifokal, „silent lesion“, Therapiemonitoring |
| Fiebersyndrome | Fokus, Ausmaß der Veränderungen, Tumorausschluss |
| Tumorprädispositionssyndrome (TPS) | Tumor-Screening |
| Nicht akzidentielle Verletzung, non accidental injury (NAI) | Kein Standard; ergänzend zur Beurteilung des Ausmaßes der Verletzungen, insbesondere Weichteile und Organbeteiligung (siehe AWMF Leitlinie S3 + Kinderschutz 027-069) |

3.1.1 Maligne Tumore

Aufgrund der bisherigen Datenlage ergeben sich für eine Reihe von malignen Tumoren Indikationen für eine GK-MRT, die die weitere Bildgebung komplett ersetzen, einsparen oder ergänzen können. Die GK-MRT als Instrument zur Ausbreitungsdiagnostik ist bislang in Therapiestudien der onkologischen nationalen und internationalen Fachgesellschaften (GPOH, SIOP) in der Regel nicht vorgesehen. In den AWMF Empfehlungen zum Neuroblastom ist die GK-MRT optional vorgesehen (025/008). Es ist jedoch anzunehmen, dass die GK-MRT mit der Weiterentwicklung der Protokolle zukünftig noch mehr Berücksichtigung finden wird. Die Indikationen können dennoch auch jetzt schon an die vorhandenen Studienprotokolle adaptiert werden und die GK-MRT komplementär durchgeführt werden.

Für das **Hodgkin Lymphom (HL)** ist die 18F-FDG-PET/CT sowohl im nodalen und extranodalen Staging als auch in der Therapiekontrolle vorgesehen. Die GK-MRT kann in dieser Phase ergänzend durchgeführt werden, insbesondere wenn im Rahmen der PET/CT keine diagnostische CT erfolgte (27). Die Bedeutung der Diffusionsbildgebung (DWI) im Rahmen der Responsebeurteilung ist noch Gegenstand der Forschung. Eine Multizenterstudie aus dem Jahre 2021 bei 68 pädiatrischen Patienten ergab eine hohe Konkordanz zwischen PET/CT und GK-MRT unter Einschluss der DWI für das initiale Staging (69). Darüber hinaus ist die Verringerung der Diffusionsrestriktion als Hinweis auf ein Therapieansprechen zu werten (28, 33). Allgemeingültige Kriterien zur Beurteilung einer kompletten Remission oder auch Schwellenwerte für den apparent diffusion coefficient (ADC) gibt es noch nicht. Darüber hinaus scheint das Ausmaß der Diffusionsrestriktion in der Interimskontrolle prognostische Bedeutung zu haben (28) und kennzeichnet die residuelle Tumorlast mit sehr hoher Sensitivität (33). Für die weitere Verlaufskontrolle nach abgeschlossener Therapie mit der Frage nach Rezidiv und zur Überwachung von therapieassoziierten Komplikationen (z.B. Osteonekrosen) kann die GK-MRT umfassend Aufschluss geben und daher empfohlen werden (58).

Wenn kein PET/CT durchgeführt wird, stellt das **Non-Hodgkin Lymphom (NHL)** grundsätzlich eine Indikation für die GK-MRT dar, insbesondere wenn höhere Stadien (Ann–Arbor Klassifikation >2) oder eine primär extranodale Manifestation (z.B. Knochen) oder eine ZNS – Beteiligung verdächtig werden (11-13, 18, 31, 33, 70). Die Diffusionsrestriktion scheint beim aggressiven NHL stärker ausgeprägt zu sein als beim HL (71). Für das großzellige B-Zell Lymphom konnte gezeigt werden, dass das Risiko für einen Tumorprogress oder für ein Rezidiv signifikant höher ist, wenn das MRT einen Knochenmarkbefall aufdeckt und dabei die ungezielte Biopsie negativ bleibt (14). Für die posttherapeutische Phase gelten im Übrigen die gleichen Empfehlungen wie für das HL.

Bei **Weichteilsarkomen** (z.B. Rhabdomyosarkome) sowie **Osteo- und Ewing-Sarkomen** existiert in vielen Fällen bereits eine lokale Schnittbildgebung des Tumors. Ist das nicht der Fall, kann die GK-MRT um die lokale MR-Bildgebung mit ergänzenden Sequenzen und Untersuchungsebenen entsprechend der GPOH-Studien-Vorgaben vervollständigt werden (7, 24). Großer Vorteil der Methode ist, dass bei metastasierten Tumoren in einer einzigen Untersuchung das Ansprechen auf die neoadjuvante Behandlung und der Primärtumor vor lokaler Behandlung erfasst werden können. Für das metastasierte Ewing-Sarkom konnte in einer retrospektiven Auswertung gezeigt werden, dass die konsequente Bestrahlung aller primär mit der GK-MRT erfassten osteomedullären Metastasen ein signifikant höheres Überleben gegenüber einem vergleichbaren Kollektiv sichert (22). Während der Knochen- bzw. Knochenmarkbefall im Vergleich zur Knochenszintigrafie in den meisten Studien mit höherer Treffsicherheit (23, 26, 36, 37, 72) und Weichteilbefunde sowie Hirnmetastasen mit hoher Genauigkeit beurteilt werden können (20, 35), bleibt die Detektion von Lungenmetastasen mittels MRT

umstritten (35). Daher muss die Indikation zur CT des Thorax in Abhängigkeit von der Tumorentität und Behandlungssituation großzügig gestellt werden.

Von den embryonalen Tumoren gibt es für das **Neuroblastom** eine gewisse Evidenz zur Diagnostik mittels GK-MRT (10, 15, 20, 21, 32, 73). Je nach Risikogruppe (niedrig, intermediär, hoch) und Stadium (INSS, International Neuroblastoma Staging System) ist die GK-MRT hilfreich und in jeder Phase der Erkrankung indiziert. Niedrige Stadien (lokal begrenztes Tumorwachstum) und fehlende chromosomale Aberrationen (Amplifikation des MYCN Onkogens oder Deletionen des kurzen Armes von Chromosom 1) stellen in der Regel keine Indikation dar. Die GK-MRT ist additiv und/oder komplementär zur ¹²³I MIBG (Metaiodobenzylguanidin) Szintigrafie zu sehen und ersetzt dabei die zusätzlich notwendige Skelettszintigrafie (21, 32). Darüber hinaus wurde für GK-MRT mit Anwendung der DWI - bei generell guter Übereinstimmung mit der ¹²³I MIBG - ein etwas höherer SIOPEN-Score erreicht (74), welcher für die Prognose bei ossären Metastasen von hoher Relevanz ist (75). Prätherapeutisch kann die lokale Tumorausdehnung hinsichtlich der IDRFs (image-defined risk factors) des INGRSS (International Neuroblastoma Risk Group Staging System) bei angepasstem Untersuchungsprotokoll beurteilt werden. Insbesondere eignet sich die GK-MRT für Multikompartiment-Ausdehnung und die Detektion von Metastasen (6, 20). Die aktuellen Studien zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen der Abnahme der Diffusionsrestriktion und dem Therapieansprechen gibt (74, 76, 77). Bei okkulten Tumoren im Rahmen eines Opsoklonus-Myoklonus-Syndroms (OMS) kann die ¹²³I MIBG (Metaiodobenzylguanidin) Szintigrafie in bis zu 57% der Fälle negativ sein, wenn ein Ganglioneurom vorliegt (78). Daher ist die GK-MRT als Suchmethode zu favorisieren, nicht zuletzt auch wegen der fehlenden Strahlenexposition (10, 79).

3.1.2 Langerhans-Zell-Histiozytose (LCH)

Der multifokale und/oder multisystemische Herdnachweis hat für Therapie und Verlaufskontrollen erhebliche Konsequenzen. Die GK-MRT ist sensitiver für eine Knochenmarkinfiltration als die röntgenbasierten Verfahren oder die Skelettszintigrafie und die 18-F-FDG-PET (52, 55, 56). Aufgrund des primären Befalls des Knochenmarks sowie einer in der Regel raschen Osteodestruktion lässt sich die reduzierte Sensitivität der Szintigrafie erklären. Generell kann die GK-MRT aufgrund der simultanen Erfassung der extraskelletalen Manifestationen einschließlich des ZNS-Befalls beim primären Staging vorteilhaft sein (52, 56). Die mögliche geringere Spezifität der MRT sollte in Abhängigkeit methodischer Aspekte bei der Beurteilung der Ausbreitung und des Therapieansprechens bedacht werden (52), auch um eine unnötige bzw. zu extensive Behandlung zu vermeiden. Die größte aktuelle Studie konnte bei 46 Patienten im Vergleich zur Standardbildgebung mit Röntgen und Szintigraphie bei besserer Sensitivität keine erhöhte Rate von falsch positiven Befunden finden (80).

3.1.3 Avaskuläre Osteonekrose (AVN)

Unter Steroidtherapie oder in Kombination mit einer Hochdosismotherapie finden sich mehr avaskuläre Nekrosen als klinisch vermutet (58, 81, 82). Die konventionelle Bildgebung ist in frühen Stadien negativ (58, 81, 82). Der Schweregrad und die Lokalisation (z.B. subchondral) sind wichtige Kriterien für die Entscheidung zu einer notwendigen operativen Therapie (58, 81, 82). Bei entsprechender Risikokonstellation ergibt sich daher eine Indikation zur GK-MRT um rechtzeitig, auch bei asymptomatischen Patienten besonders die epiphysären/subchondralen Läsionen zu detektieren (58).

3.1.4 Chronische nicht bakterielle Osteomyelitis (CNO)

Die GK-MRT kann mit hoher Sensitivität neben den symptomatischen auch die klinisch stummen Manifestationen z.B. an der Wirbelsäule in einer Untersuchung feststellen und beschleunigt so die Diagnose der Multifokalität aufgrund typischer Befunde (53, 62). Hierbei werden bis zu 45% mehr Herde detektiert als bei der klinischen Untersuchung (47, 49). Im Vergleich zur konventionellen radiologischen Diagnostik ergibt sich eine erheblich verbesserte Detektionsrate (54). Im Vergleich zur Skelettszintigrafie ist die GK-MRT bezogen auf symptomatische Regionen sogar signifikant sensitiver (64). Die Übereinstimmung der Befundung durch verschiedene Untersucher ist gut bis exzellent (83, 84). Differentialdiagnostische Erwägungen in der Abgrenzung zu malignen Prozessen können mittels der DWI vorgenommen werden (59). Darüber hinaus sind insbesondere Therapieansprechen sowie die gegebenenfalls notwendige Intensivierung der medikamentösen Therapie relevante Indikationen für die GK-MRT (49, 50, 83, 85).

3.1.5 Rheumatische Erkrankungen und Fiebersyndrome

Die MRT ist für verschiedene rheumatische Erkrankungen eine der Grundlagen zur objektiven Beurteilung von Inflamationsaktivität und Gelenkdestruktion in klinischen Studien. So wurden hierfür sowohl für die rheumatoide Arthritis als auch für die Psoriasisarthritis Scoringssysteme entwickelt (86). Für den Einsatz der GK-MRT bei Kindern mit rheumatischer Arthritis gibt es erste Konsensusreports der Outcome Measures in Rheumatology (OMERACT) MRI Working Group, in welchem anhand eines systematischen Literaturreview auch für die GK-MRT ein Scoringssysteme sowohl für Erwachsene als auch für Kinder mit JIA vorgeschlagen wurde (87) (86, 88). Für die juvenile Spondylarthritis wurden charakteristische Befunde für die GK-MRT beschrieben (60) und es wurde gezeigt, dass eine Objektivierung der Enthesitis im Vergleich zum klinischen Befund möglich ist sowie zusätzliche Informationen an Wirbelsäule und Beckenskelett gefunden werden können (89). Dies kann auch für andere Formen der rheumatoiden Arthritis im Einklang mit den Daten für Erwachsene angenommen werden (86). Die Detektion extraskelettaler Befunde in Gehirn, Weichteilen, Muskulatur sind bei einer Reihe von weiteren autoinflammatorischen Erkrankungen von großer Bedeutung. Für die juvenile Dermatomyositis und Polymyositis wurden eine exzellente Korrelation zu klinischen Parametern gefunden und im Verlauf zusätzliche Informationen zum Behandlungserfolg generiert (61). Des Weiteren ließ sich mit Hilfe der GK-MRT eine gezielte Muskelbiopsie durchführen (51). Indikationen für eine GK-MRT ergeben sich darüber hinaus, wenn klinische und laborchemische Befunde differieren oder wenn Multifokalität mittels anderer Methoden nur eingeschränkt fassbar ist.

Auch Fiebersyndrome und unklare Entzündungskonstellationen, die für eine systemische Erkrankung, einen unerkannten Fokus oder ein bisher unbekanntes malignes Geschehen sprechen, sind Indikationen für eine Ganzkörperbildgebung. So lieferte die GK-MRT in einer Studie bei 24 Patienten in 70% der Fälle die korrekte Diagnose, und in 46% war es die einzige Methode, die den inflammatorischen Prozess fand (90). Die GK-MRT ohne Strahlenexposition ist hier alternativ zur PET/CT zu sehen (57), wobei vergleichende Studien bislang nicht existieren.

3.1.6 Tumorprädispositionssyndrome (TPS)

Die GK-MRT ist bei asymptomatischen Patienten mit hereditären Tumorprädispositionssyndromen geeignet, um die Entwicklung eines soliden Tumors zu erfassen, wie bereits für das Li-Fraumeni Syndrom (38, 40, 91) gezeigt. Nach Empfehlung der Li-Fraumeni Association Deutschland wird bei Kindern und Jugendlichen ergänzend zur jährlichen MRT-Untersuchung des Kopfes die Ganzkörper-MRT empfohlen (92, 93). Insbesondere TPS mit erhöhter Strahlensensibilität profitieren von der GK-MRT als Verfahren, das frei ist von ionisierender Strahlung (94). Bei der Neurofibromatose Typ 1

korreliert die in der GK-MRT detektierte Tumorlast von plexiformen Neurofibromen mit der Entwicklung eines malignen peripheren Nervenscheidentumors (MPNST)(42, 46). Dennoch bleibt die Differenzierung zwischen symptomatischen plexiformen Neurofibromen und MPNST problematisch (44). Darüber hinaus müssen Intervalle und die Anwendung weiterer bildgebender Verfahren (z.B. 18F-FDG-PET) in ihrer Wertigkeit abgeschätzt werden (44). Die GK-MRT wird auch für andere Syndrome indiziert (39, 95-97). Die American Association for Cancer Research (AACR) hat in einem Consensus-Workshop zur Etablierung von Screening-Programmen die GK-MRT für weitere TPS (z.B. Hereditary paraganglioma and pheochromocytoma syndrome, Neurofibromatosis type I and II, Constitutional mismatch repair deficiency) empfohlen (98). Auch für das Rhabdoid tumor predisposition syndrome (RTPS), das DICER1 Syndrom, die Hippel-Lindau Disease und das hereditäre Retinoblastom wird die GK-MRT zunehmend eingesetzt (99).

3.1.7 Nicht akzidentielle Verletzung

Während die Schädel-MRT die sensitivste Methode zur Beurteilung von Blutungen, Ischämien und axonalen Schädigungen im Rahmen eines nichtakzidentellen Traumas ist, kann die GK-MRT bisher nicht als alleinige Standardbildgebung bei NAI empfohlen werden. Dem großen Vorteil der umfassenden Diagnostik in einer einzigen Untersuchung (100) steht die nicht ausreichende Sensitivität der alleine mittels coronaler STIR durchgeführten GK-MRT für die typischen Skelettbefunde insbesondere beim Säugling gegenüber (101). (AWMF Leitlinie 064-014 Verdacht auf Misshandlung bei Kindern – Bildgebende Diagnostik).

3.2 Technische Voraussetzungen

Die automatische Tischverschiebung, der Anschluss von multiplen Array-Spulenelementen, die den Körper komplett abdecken und die simultane Signalakquisition durch unabhängige Empfangskanäle sind Grundvoraussetzungen zur Durchführung einer erfolgreichen hochaufgelösten GK-MRT (1-4, 6). Ein großes field of view (FOV) in Z-Richtung (z.B. 500 mm) einschließlich homogener Fettsättigung ist für die Erfassung des gewünschten Volumens von Relevanz und beschleunigt durch eine geringere Anzahl von Messblöcken die Untersuchung. Daneben sind parallele Bildgebung in allen 3 Raumrichtungen, automatische Tischverschiebung und Spulwahl für die rasche Durchführung erforderlich. Üblicherweise werden die sich etwas überlappenden coronalen Aufnahmen der einzelnen Körperregionen automatisch zu Ganzkörperschichtdarstellungen zusammengesetzt.

3.3 Vorgeschlagene Protokolle

Da die Aussagekraft der MRT von den gewählten Sequenzen und Sequenzparametern abhängig ist, aber gleichzeitig die Untersuchungsdauer den Patientenkomfort einschränkt, ist der modulare Aufbau eines Sequenzpools, bestehend aus einem Basismodul und erweiternden Sequenzen, essentiell (Tabelle 2, Beispiel eines GK-MRT – Protokolls aus der pädiatrischen Radiologie der Universitätsklinik Tübingen) (1-4, 6, 102). Das modulare Konzept erlaubt hierbei eine Adaptation des Protokolls an die jeweilige Indikation. Gleichzeitig werden Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit verbessert.

Eine Ganzkörperdarstellung mittels hochaufgelöster fettgesättigter T2-gewichteter Sequenzen (z.B. STIR) mit Schichtdicken von 3-4 mm in coronaler Orientierung sollte in jedem Fall akquiriert werden. Um mögliche Einschränkungen der diagnostischen Genauigkeit durch Partialvolumeneffekte zu vermeiden, sollten weitere Akquisitionen in transversaler Orientierung zum Beispiel mittels T2-gewichteter und fettgesättigter bzw. STIR Sequenzen im Bereich von Kopf und Hals sowie Körperstamm erfolgen (1-4, 6, 102). Hierbei sind Sequenzen mit radialer k-Raum Akquisition und/oder

Atemnavigation zur Reduktion von Bewegungsartefakten im Bereich des Körperstamms empfehlenswert. Sagittal orientierte Sequenzen bzw. Reformationen sind bei Fragen zum Achsenskelett notwendig. Erweiterungen des Protokolls durch diffusionsgewichtete und / oder T1-gewichtete Sequenzen vor und nach Kontrastmittelgabe sind in Abwägung des Nutzens zu planen. Hier sind Dixon-Sequenzen vorteilhaft. Bei soliden Tumoren sind Verbesserungen der diagnostischen Sicherheit durch diese Ergänzung zu erwarten.

Unabhängig von Ganzkörperuntersuchungen können mittels der unter 3.1 genannten Voraussetzungen aufgrund der Geräte und Spulenkonfiguration lokale Regionen ohne Einschränkung (Gehirn, Gesichtsschädel und Hals, Oberbauch und Beckenorgane, Wirbelsäule) untersucht werden (1-4, 6). Dies ist besonders bei den Kindern und Jugendlichen zu beachten, die nur in Narkose oder Sedierung untersucht werden können, wenn hierdurch weitere Untersuchungstermine eingespart werden. Die Verlängerung der Untersuchungszeit sollte dann in Relation zur Einsparung weiterer bildgebender Verfahren abgewogen werden (7).

Die Mehrzahl der Protokollempfehlungen für die GK-MRT bei Kindern und Jugendlichen weisen ein festes Field of View (FoV) und eine feste Auflösungsmatrix sowie Schichtdicke und damit Voxelgröße aus (1-4, 6, 40, 102). Allerdings sollten wie üblich in der pädiatrischen MRT-Bildgebung diese Sequenzparameter den verschiedenen Körpergrößen von Säugling über Kleinkind und Kind zu Jugendlichen angepasst werden, da die örtliche Auflösung für die diagnostische Sicherheit von großer Bedeutung ist (103). Dies gilt umso mehr, wenn lediglich eine Schichtebene akquiriert wird. Daher kann folgende Vorgehensweise hilfreich sein: ausgehend von einer üblichen Auflösungsmatrix ($256^2 - 384^2$) reduziert sich die Voxelgröße durch Anpassung von FoV und in moderatem Maße der Schichtdicke an eine geringere Körpergröße, wodurch die anatomische Auflösung / Bildinformation aber relativ gleichbleibend gehalten werden kann. Allerdings muss der damit einhergehende Signalverlust kompensiert werden (z.B. Erhöhung von Phasen-Oversampling oder Signal-Mittelungen), wodurch aber die Akquisitionszeit verlängert wird. Deshalb sollte ein optimaler Kompromiss aus tolerablem SNR-Verlust und Messzeit gefunden werden. Hierbei ist es vorteilhaft, dass sich, bedingt durch die Körpergeometrie von kleinen Kindern, die Anzahl der Schichtblöcke / Stationen in Z-Richtung und damit die gesamte Akquisitionsdauer reduzieren lässt. Vorgegebene und auf Körperumfang und Körperlänge optimierte Protokolle erleichtern die Anpassung in der täglichen Routine.

| Beispiel eines GK-MRT – Protokolls aus der pädiatrischen Radiologie der Universitätsklinik Tübingen (nach 6) | | | | | |
|---|--------------------|--|---------------------------------------|---|---|
| Module | Region | Sequenztyp | Orientierung und Phasenkodierrichtung | Basismatrix (ohne Interpolation in Ausleserichtung) | Anmerkungen |
| Basismodul | Ganzkörper | 2D STIR TSE/FSE | Coronal FH | 384 | Bei MSK-Fragestellungen Hände auf das Abdomen lagern |
| | Kopf und Hals | 2D STIR TSE/FSE | Transversal AP | 384 | Caudal bis Aortenbogen |
| | Thorax | 2D T2w TSE/FSE mit Fettsättigung mit Atemtrigger | Transversal AP | 384 | Wenn möglich, radiales K-Raum Sampling |
| | Abdomen und Becken | 2D T2 TSE/FSE mit Fettsättigung mit Atemtrigger | Transversal AP | 384 | Wenn möglich, radiales K-Raum Sampling |
| DWI | Ganzkörper | 2D EPI (SPAIR) 2 b-Werte 50 und 900s/mm ² | Transversal AP | 128 | Coronale MPR ADC Karte Kalkulation eines hohen b-Wertes >1200 s/mm ² |
| Kontrastmittel angehobene Sequenzen | Ganzkörper | 3D T1w GRE (VIBE) mit Fettsättigung oder Dixon | Transversal AP | 288-320 | Wenn möglich, Aufnahmen in Atemstopp Coronale MPR |

Optional weitere Sequenzen und lokale Bildgebung (Gehirn, Gesichtsschädel, Oberbauch-Organ, Wirbelsäule, Extremitäten) in Abhängigkeit der Fragestellung

DWI= Diffusion weighted Image; STIR=Short -T1 Inversion Recovery; TSE=Turbo spin echo; FSE=Fast spin echo; EPI=Echo planar imaging; GRE= Gradient echo; VIBE=Volumetric interpolated breath-hold examination; SPAIR= Spectral attenuated inversion recovery; FH = feet head; AP = anterior posterior

4. Literatur

1. Darge K, Jaramillo D, Siegel MJ. Whole-body MRI in children: current status and future applications. *European journal of radiology* 2008;68(2):289-298. doi: 10.1016/j.ejrad.2008.05.018
2. Greer MC. Whole-body magnetic resonance imaging: techniques and non-oncologic indications. *Pediatric radiology* 2018;48(9):1348-1363. doi: 10.1007/s00247-018-4141-9
3. Ley S, Ley-Zaporozhan J, Schenk JP. Whole-body MRI in the pediatric patient. *European journal of radiology* 2009;70(3):442-451. doi: 10.1016/j.ejrad.2009.02.012
4. Schaefer JF, Schlemmer HP. Total-body MR-imaging in oncology. *European radiology* 2006;16(9):2000-2015. doi: 10.1007/s00330-006-0199-0
5. Nievelstein RA, Littooi AS. Whole-body MRI in paediatric oncology. *La Radiologia medica* 2016;121(5):442-453. doi: 10.1007/s11547-015-0600-7
6. Schaefer JF, Kramer U. [Whole-body MRI in children and juveniles]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 2011;183(1):24-36. doi: 10.1055/s-0029-1245883
7. Goo HW. Regional and whole-body imaging in pediatric oncology. *Pediatric radiology* 2011;41 Suppl 1:S186-194. doi: 10.1007/s00247-011-2050-2
8. Hong TS, Greer ML, Grosse-Wortmann L, Yoo SJ, Babyn PS. Whole-body MR angiography: initial experience in imaging pediatric vasculopathy. *Pediatric radiology* 2011;41(6):769-778. doi: 10.1007/s00247-010-1958-2
9. Mohan S, Moineddin R, Chavhan GB. Pediatric whole-body magnetic resonance imaging: Intra-individual comparison of technical quality, artifacts, and fixed structure visibility at 1.5 and 3 T. *The Indian journal of radiology & imaging* 2015;25(4):353-358. doi: 10.4103/0971-3026.169448
10. Miras Azcon F, Culianez Casas M, Pastor Pons E. [Whole-body magnetic resonance imaging in a patient with an occult abdominal neuroblastoma and opsoclonus-myoclonus syndrome]. *Radiologia* 2014;56(6):e54-57. doi: 10.1016/j.rx.2012.04.002
11. Littooi AS, Kwee TC, Barber I, Granata C, Vermoolen MA, Enriquez G, Zsiros J, Soh SY, de Keizer B, Beek FJ, Hobbelink MG, Bierings MB, Stoker J, Nievelstein RA. Whole-body MRI for initial staging of paediatric lymphoma: prospective comparison to an FDG-PET/CT-based reference standard. *European radiology* 2014;24(5):1153-1165. doi: 10.1007/s00330-014-3114-0
12. Klenk C, Gawande R, Uslu L, Khurana A, Qiu D, Quon A, Donig J, Rosenberg J, Luna-Fineman S, Moseley M, Daldrup-Link HE. Ionising radiation-free whole-body MRI versus (18)F-fluorodeoxyglucose PET/CT scans for children and young adults with cancer: a prospective, non-randomised, single-centre study. *The Lancet Oncology* 2014;15(3):275-285. doi: 10.1016/s1470-2045(14)70021-x
13. Adams HJ, Kwee TC, Vermoolen MA, Ludwig I, Bierings MB, Nievelstein RA. Whole-body MRI vs. CT for staging lymphoma: patient experience. *European journal of radiology* 2014;83(1):163-166. doi: 10.1016/j.ejrad.2013.10.008
14. Adams HJ, Kwee TC, Lokhorst HM, Westerweel PE, Fijnheer R, Kersten MJ, Verkooijen HM, Stoker J, Nievelstein RA. Potential prognostic implications of whole-body bone marrow MRI in diffuse large B-cell lymphoma patients with a negative blind bone marrow biopsy. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI* 2014;39(6):1394-1400. doi: 10.1002/jmri.24318
15. Siegel MJ, Acharyya S, Hoffer FA, Wyly JB, Friedmann AM, Snyder BS, Babyn PS, Khanna G, Siegel BA. Whole-body MR imaging for staging of malignant tumors in pediatric