

STATISCHE UND DYNAMISCHE MR-UROGRAPHIE BEI KINDERN

Simone Schrading, Sylvia Kaiser, Justus Roos, Nikolai Stahr



Simone Schrading

<https://doi.org/10.35190/Paediatria.d.2022.1.8>

Einleitung

Angeborene Fehlbildungen der Niere und des Ureters sind einer der häufigsten Erkrankungen bei Kindern¹⁻³⁾. Das Erkrankungsspektrum des Harntraktes reicht hierbei von transienter Hydronephrose bis zur renalen Dysplasie und Agenesie. Die hochauflösende Bildgebung des Harntraktes ist hierbei die Grundlage für das weitere Procedere bei jedem dieser Kinder, um postnatal abzuklären, wer eine chirurgische Intervention bedarf und wer auch ohne Chirurgie eine günstige Prognose in Bezug auf die Nierenfunktion hat⁴⁻⁵⁾.

Die Hauptaufgabe der Bildgebung ist, neben der anatomischen Darstellung des Harntraktes, vor allem die zugrundeliegende Ursache einer Hydronephrose zu diagnostizieren, wie z.B. eine Obstruktion des pyelo-ureteralen Überganges, einen vesiko-ureteralen Reflux oder einen obstruktiven Megaureter. Im Weiteren ist ein wichtiges Ziel der Bildgebung, die Nierenfunktion betroffener Kinder zu evaluieren²⁻³⁾.

Um dies zu erreichen, beinhaltet die bildgebende Diagnostik bei Kindern mit Hydronephrose in der klinischen Praxis zunächst die hochauflösende Sonographie und retrograde Miktionszystourethrographie (MCUG) bzw. zunehmend die Miktionsurosonographie (MUS). Zweifelsfrei haben sich beide Methoden als sehr effizient bei der Beurteilung des Harntraktes herausgestellt und ermöglichen auch eine Risikobewertung³⁻⁵⁾. Zur Evaluation der Nierenfunktion wird als etablierte und effektive Standardmethode auch heute noch die dynamische Diurese-Szintigraphie angewandt, die allerdings kaum Informationen zu anatomischen Details des Harntraktes liefert⁶⁾.

Bei komplexeren Fehlbildungen des Harntraktes, weisen diese standardmässig eingesetzten bildgebenden Techniken oft eine reduzierte Genauigkeit auf, selbst bei zeitgleicher Anwendung aller Methoden⁵⁾.

Seit ihrer Einführung in den 2000er erlangte die MR-Urographie (MRU) durch die stetige technische Weiterentwicklung und Verbesserung der MRI zunehmend an Bedeutung in der Beurteilung des Harntraktes bei Kindern⁷⁻⁹⁾. Der grosse Vorteil der MRU liegt dabei in der seitengetrenten Bestimmung sowohl der Morphologie als auch der Funktion der Niere und des Harnleiters in einem Untersuchungsgang und dies ohne jede Strahlenbelastung¹⁰⁾.

Die MRU wird hierbei zunächst als statisch-dynamische MRU durchgeführt (*Abbildung 1*). Mit den statischen Sequenzen liefert die MRU eine detaillierte und exakte Abbildung der gesamten Anatomie des Harntraktes, was insbesondere bei Fehlbildungen der Ureteren, wie z.B. Ureter fissus oder duplex, sehr hilfreich ist.

In der dynamischen Bildgebung der MRU wird die zeitlich hochaufgelöste Perfusion und Exkretion der Niere und des gesamten Harntraktes von der arteriellen Phase, über die Kontrastierung des Nierenbeckens und der Ureteren bis zur späten Ausscheidungsphase im Detail und seitengetrent abgebildet. Aus den dynamischen Daten der MRU können mittels spezieller Software-Programme objektive Zeit-Intensitäts-Kurven der Nierenfunktion und des Harnabflusses erstellt werden. Das Prinzip ist dabei vergleichbar mit dem der Szintigraphie. Es wird lediglich anstatt eines radioaktiven Tracers das MR-Kontrastmittel Gadolinium-DTPA verwendet, das auch bei Kindern sicher und gut evaluiert ist⁷⁻¹¹⁾.



Abbildung 1a

Korrespondenz:
simone.schrading@luks.ch

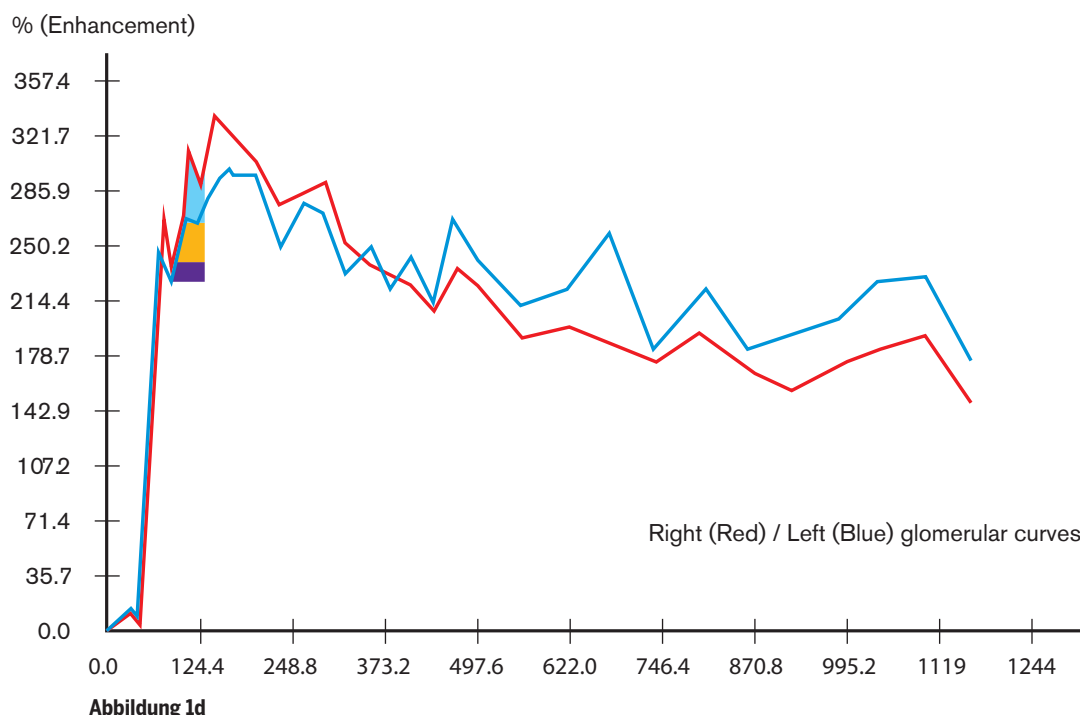
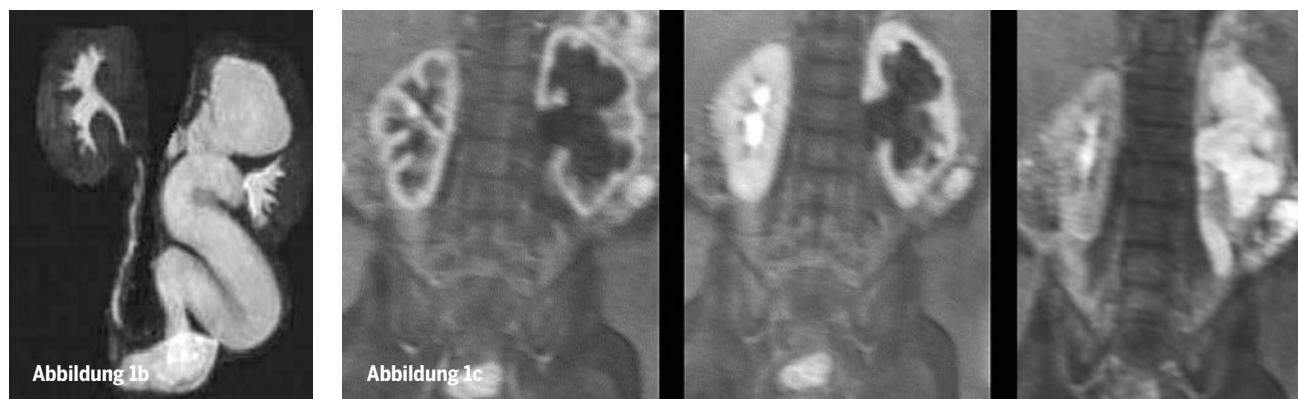


Abbildung 1. Neugeborenes Mädchen, 3 Monate alt mit Hydronephrose und Megaureter links.
 1a: Coronare und sagittale T2-gewichtete-spine-echo Sequenz zur anatomischen Darstellung
 1b Maximum Intensity Projection (MIP) zur 3D Übersicht
 1c: Dynamische T1-gewichtete Gradienten-Echo Sequenz zur Funktionsanalyse
 1d: Ausscheidungskurve seitengetreunt

Ein relativer Nachteil der MRU ist die häufig lange Untersuchungszeit von mind. 40 min⁶⁾. Diese macht bei den meisten Kindern unter 10 Jahren eine Sedierung oder sogar eine allgemeine Anästhesie erforderlich, welche stets das Risiko von bekannten Nebenwirkungen bzw. Komplikationen in sich bergen, auch wenn die Wahrscheinlichkeit von relevanten Komplikationen sehr gering ist^{7,8)}. Allerdings ist die Untersuchungszeit der MRU vergleichbar mit der der MAG-3 Szintigraphie, bei der für kleinere Kinder ebenfalls eine Sedierung erforderlich ist⁶⁾.

Indikationen

Die Indikationen für die MRU sind ähnlich wie die der Nieren-Szintigraphie. Typische Indikationen für die

MRU sind so zum Beispiel ausgeprägte prä- oder postnatale ein- oder beidseitige Hydronephrosen, subpelvine Stenosen, Megaureter, komplizierte Doppelnieren, ektipe Beckennieren, Fehlbildungen der Urethra wie z.B. Urethralklappen und das Vorliegen eines vesiko-ureteralen Reflux. Auch im Falle eines unklaren morphologischen Bildes des Harntraktes in den konventionellen Verfahren ist die MRU sehr hilfreich^{5,8-9)}.

Ziel der MRU ist dabei, die exakte dreidimensionale anatomische Darstellung des Harntraktes und die seitengetreunte Funktionsbeurteilung der Nieren. Die MRU wird so vor allem zur prä-operativen Planung, als Grundlage für Verlaufskontrollen, dem Nachweis von postoperativen Komplikationen, Nachweis von Infektion und Fibrose und bei komplexen Fehlbildungen des Harntraktes angewendet¹²⁻¹³⁾.

Durchführung der MRU

3.1. Praktische Durchführung (Tabelle 1)

Vor der Durchführung einer MRU sollte bei allen Kindern eine Sonographie des Harntraktes durchgeführt werden, um einen Überblick über die abzuklärende Pathologie zu erhalten und die Indikation zur MRU stellen zu können. Eine Refluxerkrankung sollte im Vorfeld mittels Miktionscysturethrographie (MCUG) oder Miktionsurosonografie (MUS) abgeklärt sein, da diese in der MRU nicht zuverlässig dargestellt werden kann. Auf Basis der Vordiagnostik wird im interdisziplinären Team die Indikation zur MRU gestellt.

Das Alter der Kinder, die eine Sedierung oder Anästhesie benötigen, liegt bei ca. < 6-10 Jahren. Dabei ist die Notwendigkeit einer Sedierung von Kind zu Kind unterschiedlich und muss stets individuell festgelegt werden. Die Compliance des Kindes wird dabei beein-

flusst durch die Entwicklung, bisherigen Erfahrungen, einer guten spielerischen Vorbereitung der Kinder auf die MRU (z.B. mit Videos, Büchern, etc..) durch die Eltern und die Betreuung durch das radiologische Personal vor und während der MRU.

Zur Erfassung einer Funktionsstörung der Nieren, sollte vor jeder MRU stets ein aktueller Laborwert des Serumkreatinins vorliegen, vor allem da bei einer eingeschränkten glomerulären Filtrationsrate (GFR) von < 30 ml/min/m² eine Gabe von MRI-Kontrastmittel (Gadolinium) kontraindiziert ist.

Spezielle Vorbereitung vor der Untersuchung

Die Vorbereitung des Kindes vor der MRU beinhaltet zunächst die Hydrierung. Diese sollte spätestens 30-40 Minuten vor der Untersuchung mittels einer intravenösen Gabe von physiologischer Kochsalzlösung oder Ringerlösung mit 20 ml/kg Körpergewicht erfol-

Massnahme	Verantwortlichkeit und Anmerkungen	
Aufgebot des Kindes	Mind. 60-90 mind. vor Beginn der MRI aufgeboten	Sekretariat Radiologie und Kinderklinik
Erklärung der Notwendigkeit und Aufklärung MRU	Pädiatrische / kinderchirurgische Ambulanz	Kinderärzte (Pädiatrie oder Kinderchirurgie) vor oder am Tag der MRU
Falls keine Sedierung: Platzierung eines Harnblasenkatheters und eines intravenösen Zugangs	Pädiatrische / kinderchirurgische Ambulanz	Kinderärzte
Hydratation	Beginn in der Ambulanz und Fortsetzung im MRI	20 ml/kg i.v. für min 30 min. Katheter abklemmen
Falls Sedierung: Betreuung durch Anästhesie	MRI-Abteilung	Anästhesie-Team
Einweisung / Aufklärung der Eltern und des Kindes zum Ablauf der MRU	MRI-Abteilung	Radiologisches Fachpersonal
Lagerung und Beginn der MRU	Rückenlage und Arme nach oben über Kopf. Verwendung von Lagerungshilfen	Radiologisches Fachpersonal
Anfertigung der Aufnahmen:	MRI-Abteilung	Radiologisches Fachpersonal
Sequenzen nativ	Axiale und coronare T2-gewichtete fast Spin-echo Sequenz mit und ohne Fettsuppression	
i.v. Diurese	1.0 mg/ kg (max. 40 mg) Furosemid Katheter offen	
Sequenzen nativ	Hochauflösende 3D T2-TSE mit und ohne Fettsuppression	
Kontrastmittel-Dynamik	3D T1-gewichtete Gradienten-Echo-Sequenz mit Fettsuppression native Aufnahme	
i.v. Gabe von KM (Gadolinium)	0.2 ml/kg Gadolinium-DTPA	
Anflutungs- und Ausscheidungsaufnahmen	3D T1-gewichtete Gradienten-Echo-Sequenz mit Fettsuppression post-KM Aufnahme	
Späte Ausscheidungsaufnahme	Axiale und Coronare 3D T1-gewichtete Gradientenecho mit Fettsuppression Ggf. mehrmals wiederholen bis Harntrakt vollständig kontrastiert	
Entfernung des Katheters und des i.v. Zuganges	MRI-Abteilung	Radiologiefachpersonal oder Anästhesie
Im Falle einer Sedierung	Überwachung des Kindes für einige Stunden auf der Tagesstation	Betreuung durch Kinderärzte und Anästhesie
Besprechung des weiteren Procedere mit den Eltern und Entlassung nach Hause		Kinderärzte oder Radiologe

Tabelle 1. Ablauf-Protokoll MRU bei Kindern

gen. Eine gute Hydrierung verringert die Gadoliniumkonzentration im Nierenbeckenkelchsystem und verhindert den unerwünschten T2*-Effekt von hochkonzentriertem Kontrastmittel im Nierenbecken. Zudem wird eine homogene Kontrastierung der Nierenkelche, des Nierenbeckens und der Ureteren erreicht.

Nach Hydrierung und Furosemidgabe füllt sich die Harnblase schnell. Um den Harndrang bei der kontinuierlichen, forcierten Urin-Ausscheidung zu vermeiden, sollte eine Katheterisierung der Harnblase vor der MRU erfolgen. Zudem kann so vermieden werden, dass der Gegendruck einer prall gefüllten Blase zu einem verzögerten Wash-out des Kontrastmittels aus dem Nierenbecken und somit zu Verfälschungen der Nierenfunktionsauswertung führt.

Bei hochgradigem vesiko-ureteralen Reflux, Megaureter und bei sedierten Kindern sollte stets die Anlage eines Harnblasenkatheters interdisziplinär überdacht werden. Bei älteren Kindern mit hoher Compliance (> 10 Jahre) kann auf eine Katheterisierung ggf. verzichtet werden. Dann sollte das Kind vor der MRU Wasser lösen und während der Untersuchung bei Jungen eine Urinflasche angelegt werden.

Die intravenöse Gabe von Furosemid mit einer Dosis von 1 mg/kg Körpergewicht max. 20 mg erhöht die Diurese und führt so zu einer besseren Darstellung des harnableitenden Systems und zu einer Verkürzung der Untersuchungsdauer. Die Furosemidgabe erfolgt entweder 15 Minuten vor oder unmittelbar vor der Gabe des MR Kontrastmittels, je nach internem Protokoll.

3.2. Technik

Zur Durchführung der MRU ist ein Hochfeld-MRI erforderlich mit einer Feldstärke von 1.5T oder 3T, die heutzutage beide bei der MRU als gleichwertig anzusehen sind¹⁴. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Feldstärken gleichen sich aus und mit beiden MRI-Systemen ist die hochauflösende anatomische und funktionelle MRU mit hoher Genauigkeit möglich⁸⁻¹². Die MR-Bildgebung wird mit den standardmäßig vorhandenen Multi-Element-Oberflächenspulen durchgeführt.

Zur Bestimmung der Nierenfunktion mittels der dynamischen MRU ist eine i.v. Kontrastmittelgabe von Gadolinium-DTPA zwingend erforderlich, wohingegen die rein statische / anatomische Bildgebung ohne Kontrastmittelgabe erfolgen kann⁷.

Zur anatomischen Darstellung werden in der Regel T2- und T1-gewichtete Spinecho-Sequenzen ohne Fettsuppression durchgeführt. Hilfreich ist hierbei die Verwendung von atemgetriggerten 3D-Fast-Spinecho-Sequenzen, die eine multiplanare Rekonstruktion des Harntraktes in jeder Ebene erlaubt, was insbesondere bei der operativen Planung sehr hilfreich ist⁷.

Die funktionelle MRI wird mittels zeitlich aufgelösten, dynamischen Aufnahmen über einen Zeitraum von 10-15 Minuten nach der Gabe von Furosemid und

MR-Kontrastmittel durchgeführt. Hierdurch ist die Beurteilung der arteriellen Perfusion des Nierenparenchyms, der Beginn der Ausscheidung ins NBKS und die Exkretion und Kontrastierung der Ureteren und Blase möglich. Die dynamische Bildgebung stellt die Grundlage zur Berechnung der renalen Funktion auf Basis des Nierenvolumens dar und erlaubt die Visualisierung von Perfusions- und Ausscheidungs-Kurven (*Abbildung 2 und Abbildung 3*).

Zu Beginn der Untersuchung, sollte der Urin-Katheter abgeklemmt werden, um die Harnblasen- und Urethra-Anatomie zu beurteilen. Dann wird der Katheter geöffnet, um die ungehinderte Exkretion zu ermöglichen.

Nach Aufnahme aller Sequenzen wird die Untersuchung beendet, der Urin-Katheter und der venöse Zugang entfernt. Im Falle einer Sedierung / Anästhesie erfolgt die Überwachung des Kindes entsprechend der Vorgaben der Anästhesie.

3.3. Auswertung der funktionellen MRU

Aufgrund der kontrastverstärkten Bildgebung, kann mittels der MRU die seitengetrennte Nierenfunktion errechnet werden. Es können mittels Analyse der Passage des Kontrastmittels durch die Nieren und das Harnsystem eine Reihe von quantitativen Parametern bestimmt werden, die die Perfusion der Nieren und der Exkretion beschreiben. Die entsprechende Analyse der dynamischen MRU-Daten kann mit Hilfe von frei verfügbaren Software-Programmen erfolgen (z.B. <http://www.chop-fmru.com>)¹⁵.

Grundlage der quantitativen Funktionsberechnung (Methode nach Patlak) ist dabei die Bestimmung der Kelch-Transitzeit und Renale-Transitzeit. Die Kelch-Transitzeit beschreibt die Zeit, bis das Kontrastmittel die Nierenkelche erreicht hat. Die Renale-Transitzeit ist die Zeit, bis das Kontrastmittel den proximalen Ureter unterhalb des Nierenunterpols erreicht hat. Nach volumenbezogener Analyse erfolgt die Visualisierung in Perfusions- und Exkretions-Kurven, analog zu den Funktionskurven der Szintigraphie (*Abbildung 2 und Abbildung 3*).

Wie leistungsfähig ist die MRU im Vergleich zur Szintigraphie?

In den letzten Jahren wurden eine Vielzahl von Studien zur Evaluation der Genauigkeit und des Nutzens der MRU im Vergleich zur MAG-3-Szintigraphie durchgeführt. Alle Studien belegen einheitlich, dass die MRU derzeit die exakteste diagnostische Methode zur anatomischen und strukturellen Darstellung von Pathologien des Harntraktes darstellt^{16,17}.

Im Weiteren zeigte sich mit beeindruckender Konkordanz in mehreren Vergleichsstudien, dass die Bestimmung der Nierenfunktion mittels der MRU im Vergleich zur Szintigraphie sehr vergleichbare Funktionsparameter aufweist ($r=0.9$) (*Abbildung 1*). Lediglich

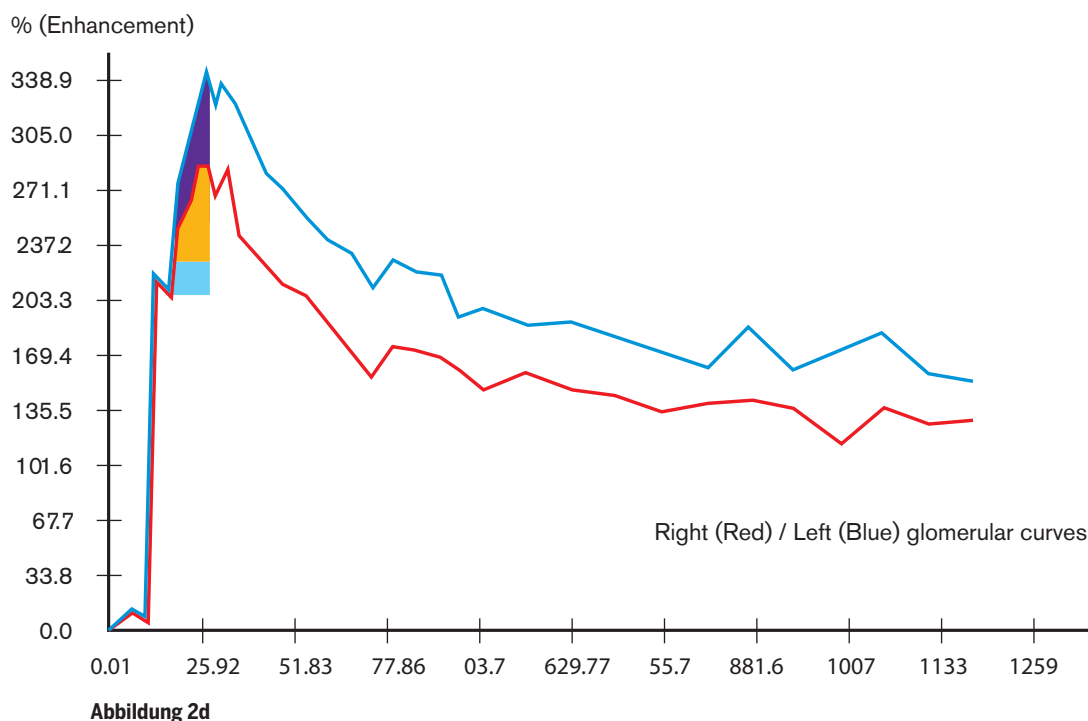
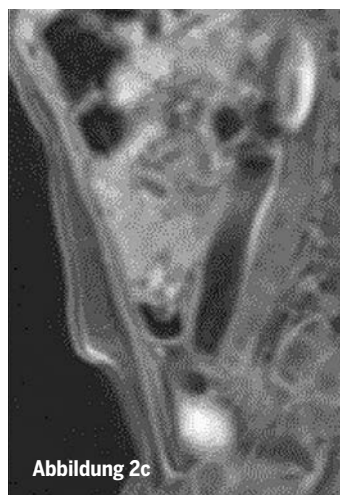


Abbildung 2. 6 Monate altes Mädchen mit Doppelnier links. Hydronephrose der oberen Anlage und Megaureter links.

2a: Coronal T2-gewichtete-spine-echo Sequenz (Schichten von dorsal nach ventral)

2b: Coronal T1-gewichtete Gradienten-Echo Sequenz nach Kontrastmittelgabe

2c: Sagittale T1-gewichtete Gradienten-Echo Sequenz nach Kontrastmittelgabe

2d: Ausscheidungskurve seitengetreunt und getrennt für die beiden Anlagen der Doppelnier links

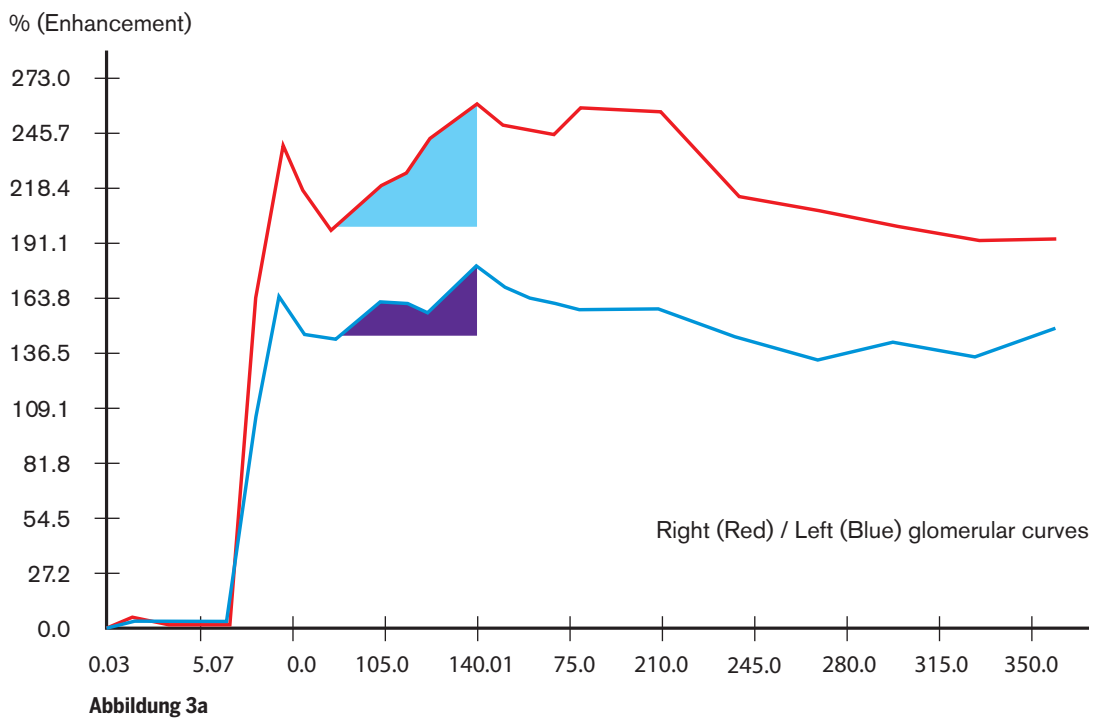
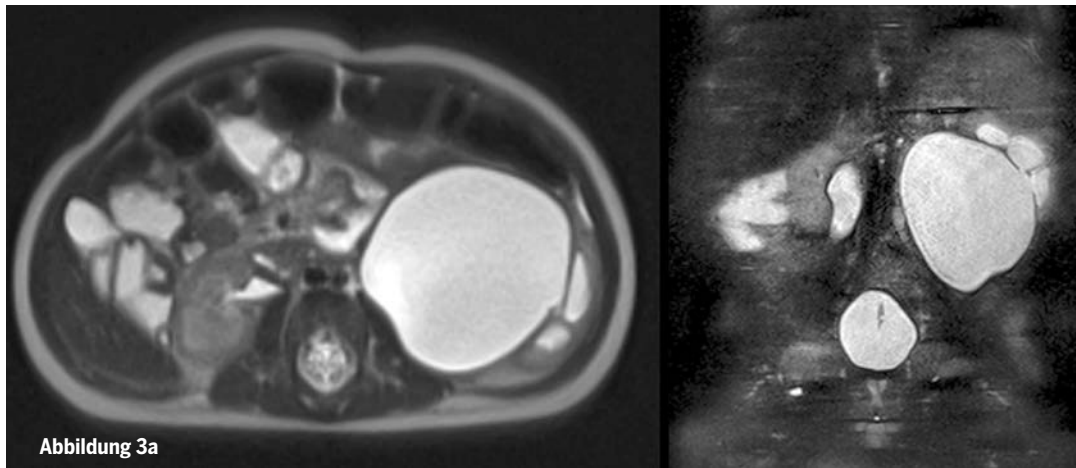


Abbildung 3. Hydronephrose bei subpelviner Stenose
3a: Axiale und coronare T2-gewichtete spine-echo Sequenz und Ausscheidungskurve vor Operation

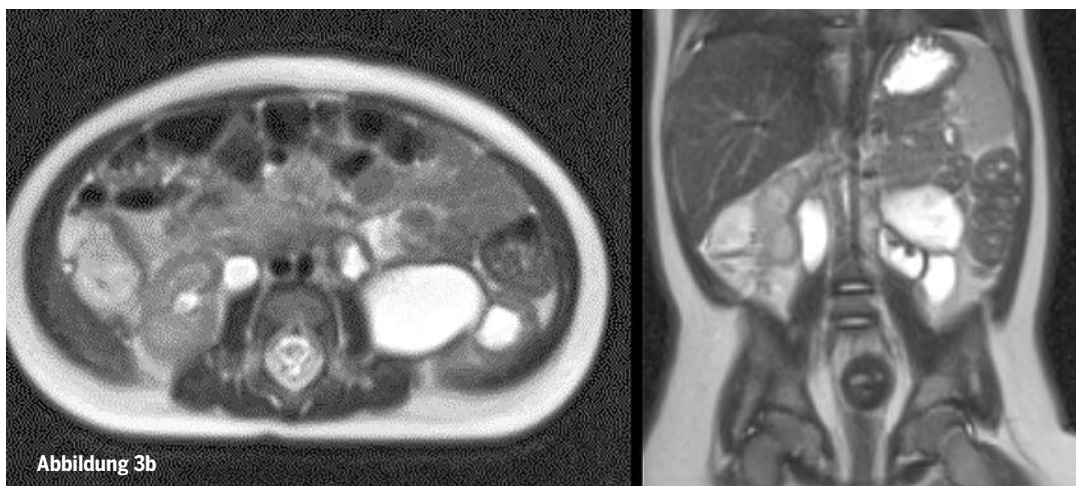




Abbildung 3. Hydronephrose bei subpelviner Stenose

3b: Axiale und coronare T2-gewichtete-spine-echo Sequenz und Ausscheidungskurve nach Operation

bei Obstruktionen des Harntraktes ergibt sich eine gering schlechtere Sensitivität der MRU im Vergleich zur MAG-3-Szintigraphie^{16,17)} (Abbildung 4). Somit erscheint die MRU heutzutage der Szintigraphie ebenwüdig und dies ohne Verwendung eines radioaktiven Tracers, aber mit dem Vorteil, gleichzeitig eine hochauflösende detaillierte Darstellung des gesamten Harntraktes zu ermöglichen.

Nachteile der MRU und zukünftige Entwicklungen

Wie bereits erwähnt ist oft die lange Untersuchungszeit, trotz optimaler Vorbereitung, das Hauptproblem der MRU bei Kindern. Ältere Kinder und auch einige kleinere Kinder sind in der Lage, die Untersuchung dennoch ohne Bewegung gut zu absolvieren, vor allem dann, wenn Ablenkungsmaterial im MRI (z.B.: Videos, Musik, Kaleidoskop etc.) zur Verfügung stehen. Ein relevanter Anteil der Kinder benötigt allerdings eine Sedierung oder Anästhesie, um die Untersuchung durchzuführen.

Bei Neugeborenen und Säuglingen wurde in den letzten Jahren die «feed-and-sleep» Technik mit hohem Erfolg etabliert¹⁸⁾. Hierbei nutzt man aus, dass gerade gestillte Säuglinge im natürlichen Schlaf für gewöhnlich so ruhig sind, dass die Erstellung von MRI-Aufnahmen mit guter Bildqualität möglich ist. Die Weiterentwicklung der Sequenztechniken der MRU ermöglicht, dass die Untersuchung bei den Säuglingen in freier Atmung erfolgen kann. Für den Erfolg der Untersuchung mit dieser Technik ist es erforderlich, dass der Säugling mit speziellen Lagerungsschalen und aufpumpbaren Lagerungshilfen gelagert wird. Auch auf

die Sicherstellung der Wärmeisolation während der Untersuchung muss geachtet werden, um ein Auskühlen der Säuglinge zu verhindern. Durch erfolgreiche Anwendung dieser «Schoppen-MRI» kann bei ausgewählten Patientengruppen auf eine Sedierung / Anästhesie verzichtet werden.

Eine Reihe von technischen Weiterentwicklungen in der MRI Diagnostik werden in den nächsten Jahren die Untersuchungszeiten der MRU noch weiter reduzieren. Hier sind insbesondere die Entwicklung von sehr schnellen, robusten T2-gewichteten Sequenzen oder «compressed-sense» Techniken beispielhaft zu nennen. Durch solche schnellen Sequenzen wird es auch möglich sein, längere Atemanhalte-Phasen zu vermeiden und entsprechend die Untersuchung stets in freier Atmung der Kinder durchzuführen¹⁹⁾. Entsprechend wird dies die Anzahl der Kinder, die ohne Sedierung untersucht werden können, stark erhöhen.

Zusammenfassung

Die MRU stellt umfassend die Anatomie und die Funktion des Harntraktes bei Kindern dar. Sie erlaubt im Detail die Beurteilung des Nierenparenchyms, des Nierenbeckenkelchsystems, der Ureteren und der Harnblase auch bei komplexen Fehlbildungen. Die MRU liefert Informationen, die sonst nur durch Einsatz mehrerer bildgebender Methoden gewonnen werden können. So erlaubt die MRU eine frühe anatomische Darstellung von komplexen Fehlbildungen der Nieren, ermöglicht die intrinsischen und extrinsischen Ursachen einer Harnabfluss-Störung nachzuweisen und stellt die Ausscheidung auf schonende und schnelle Art dar. So ermöglicht die MRU eine frühzeitige opti-

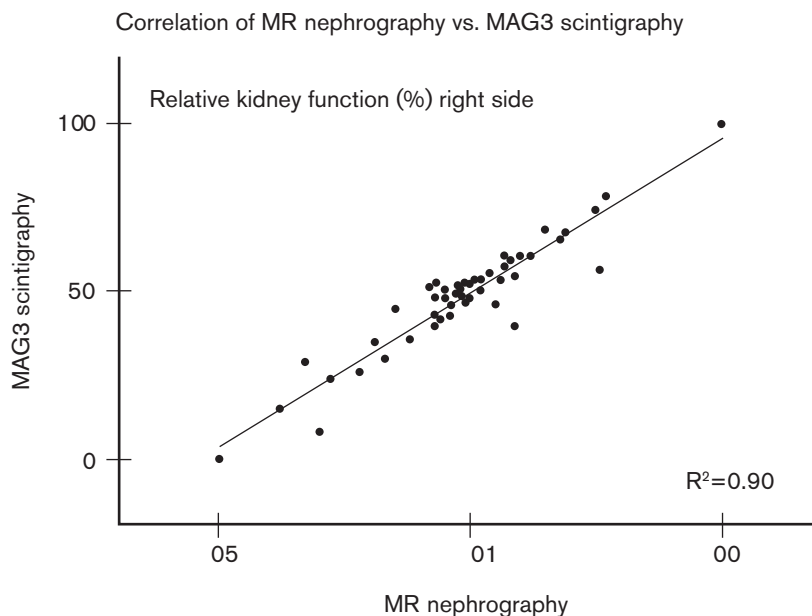


Abbildung 4a. Boss A, Martirosian P, Fuchs J, Obermayer F, Tsiflikas I, Schick F, et al.. Br J Radiol 2014^[27]

Results: MRU vs. MAG3

N = 26; median time interval 87 d

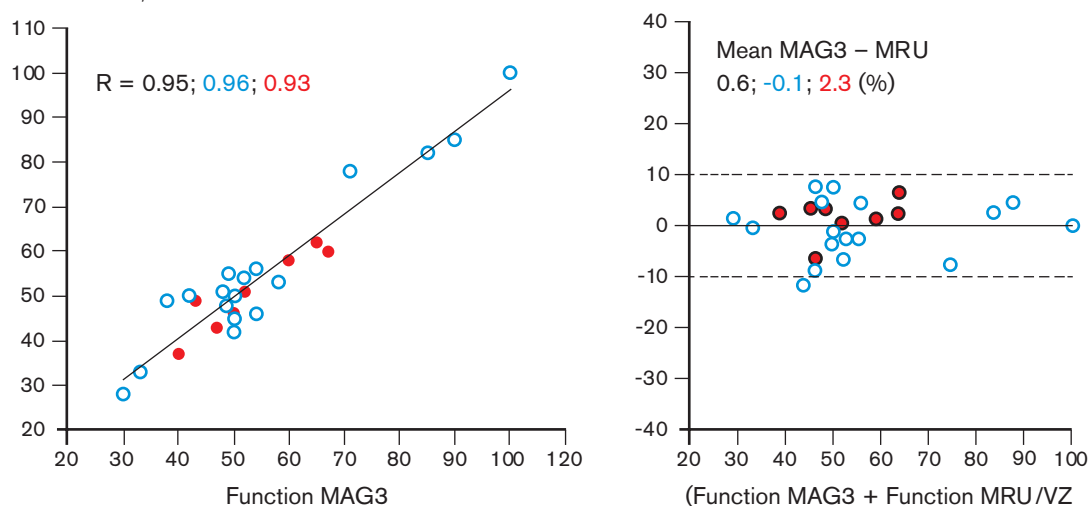


Abbildung 4b. Tsiflikas et al. 2018, Pediatric Radiol^[28]

male Therapieplanung, was voraussichtlich zu einer zunehmenden Verbesserung der Prognose der Kinder mit Erkrankungen des Harnsystems führt.

Durch die stetige Weiterentwicklung der MRI-Sequenz-Techniken, wird die MRU in Zukunft eine kürzere Untersuchungszeit aufweisen, so dass deutlich weniger Kinder eine Sedierung oder Anästhesie wäh-

rend der MRU benötigen. Heute schon wird die MRU weltweit an vielen pädiatrischen Kliniken parallel zu den konventionellen Methoden eingesetzt und wird in Zukunft zunehmend die bisherigen Methoden, vor allem die Szintigraphie, ersetzen.

Für das Literaturverzeichnis verweisen wir auf unsere Online Version des Artikels.

Autoren

PD Dr. med. Simone Schrading, Leitende Oberärztin, Kinderradiologie, Kantonsspital Luzern
Dr. med. Sylvia Kaiser, Oberärztin, Kinderradiologie, Kantonsspital Luzern
PD Dr. med. Justus Roos, Chefarzt Radiologie, Kinderradiologie, Kantonsspital Luzern
Dr. med. Nikolai Stahr, Leitender Arzt, Kinderradiologie, Kantonsspital Luzern

Die Autoren haben keine finanziellen oder persönlichen Verbindungen im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.