

Aus der

Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

**Evaluation der „*Feed-and-Wrap*“ Methode im Vergleich zur
medikamentösen Sedierung im Rahmen der
Magnetresonanztomografie bei Neonaten und jungen Säuglingen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Medizin

der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
vorgelegt von

Kim Sophie Frey
aus Freiburg im Breisgau

Mainz, 2026

Nachnutzung: Namensnennung (CC-BY-4.0)

Wissenschaftlicher
Vorstand: Univ.-Prof. Dr. P. Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 16.06.2026

Für meinen Vater

Teile der vorliegenden Dissertation wurden veröffentlicht in:

Eur Radiol. 2024 Nov;34(11):7104-7114.doi: 10.1007/s00330-024-10777-6

"Feed-and-wrap" technique versus deep sedation for neonatal magnetic resonance imaging: a retrospective comparative study (1)

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	1
MR-Sequenz-Abkürzungsverzeichnis.....	3
Begriffserklärung und Synonyme.....	4
1. Einleitung.....	5
2. Ziel der Arbeit	8
3. Literaturdiskussion.....	9
3.1 Epidemiologie und Historie	9
3.1.1 Kinderradiologie in Deutschland.....	9
3.1.2 Geschichte der MRT	10
3.2 Indikation und Durchführung von MR-Untersuchungen bei neonatologischen Patientinnen und Patienten und Säuglingen	14
3.3 Sedierung und Allgemeinanästhesie.....	15
3.3.1 Vorteile der Untersuchung in Sedierung oder Narkose	15
3.3.2 Nachteile der Untersuchung in Sedierung oder Narkose	16
3.4 <i>Feed-and-wrap</i> - Methode.....	20
3.4.1 Vorteile der <i>Feed-and-wrap</i> -Methode.....	28
3.4.2 Nachteile der <i>Feed-and-wrap</i> -Methode.....	29
3.5 Alternative Methoden	31
3.6 Magnetresonanztomografie	32
3.6.1 Physikalische Grundlagen.....	32
3.6.2 Bildentstehung	34
3.6.3 Sequenzbeschreibung.....	35
3.6.4 Kontrastmittel	38
4. Material und Methoden.....	40
4.1 Patientinnen und Patienten	40
4.2 Erhobene Daten	40
4.3 MRT	44
4.4 Ablauf der MRT in Sedierung oder Allgemeinanästhesie.....	44
4.5 Ablauf der MRT mit der <i>Feed-and-wrap</i> -Methode.....	48
4.6 Bild- und Qualitätsanalyse	50
4.7 Statistik	52

5. Ergebnisse	53
5.1 Charakterisierung des Patientenkollektivs	53
5.2 Erfolgsraten der MRT	55
5.3 Unterschiede zwischen SON- und FAW-Kohorte.....	57
5.4 Beispiele für erfolgreiche Untersuchungen mittels <i>Feed-and-wrap</i> -Methode..	65
6. Diskussion	70
6.1 Limitationen der Studie	82
7. Zusammenfassung	83
8. Literatur- und Quellenverzeichnis	86
9. Danksagung	94
10. Lebenslauf.....	95

Abkürzungsverzeichnis

AE	engl. <i>Adverse event</i> ; Deutsch: unerwünschtes Ereignis
ASA	<i>American Society of Anesthesiologists</i>
ASA-Klassifikation	Klassifikation zur Einschätzung des Narkoserisikos
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
CT	Computertomographie
DGAI	Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin
EKG	Elektrokardiogramm
FAWM	<i>Feed-and-wrap</i> -Methode
G	Gauss
GA	Gestationsalter
GE	Gradientenecho
GPR	Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie
ggf.	gegebenenfalls
HIE	hypoxisch-ischämische Enzephalopathie
IRR	engl. <i>incidence rate ratio</i> ; Deutsch: Inzidenzratenverhältnis
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KM	Kontrastmittel
IgKM	lineare gadoliniumhaltige Kontrastmittel
M	Mittelwert
mgKM	makrozyklische gadoliniumhaltige Kontrastmittel
min	Minuten
MR	Magnetresonanz
MRI	engl. <i>Magnetic Resonance Imaging</i> , Deutsch: Magnetresonanztomographie

MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunden
MTR	medizinische Technologen und Technologinnen für Radiologie
OP	Operation
PMA	postmenstruelles Alter
s	Sekunden
SD	engl. <i>standard deviation</i> ; Deutsch: Standardabweichung
SE	Spin-Echo
SI	Signalintensität
SON	Sedierung oder Narkose
SOP	engl. <i>standard operating procedure</i> ; Deutsch: Standardvorgehensweise
SpO ₂	periphere Sauerstoffsättigung
SSW	Schwangerschaftswoche
T	Tesla
T1	T1 Wichtung
T2	T2 Wichtung
TE	engl. <i>time to echo</i> ; Deutsch: Echozeit
TR	engl. <i>time to repetition</i> ; Deutsch: Repetitionszeit
TIVA	Total intravenöse Anästhesie
UMM	Universitätsmedizin Mainz
z.B.	zum Beispiel
ZKJM	Zentrum für Kinder- und Jugendmedizin
Z.n.	Zustand nach

MR-Sequenz-Abkürzungsverzeichnis

(Zur Erläuterung der jeweiligen Sequenz siehe Kapitel 3.6.3)

EPI	<i>Echo Planar Imaging</i>
FAST	<i>Fast Acquired Steady State Technique</i>
FLAIR	<i>Fluid Attenuated Inversion Recovery</i>
FLARE	<i>Fast Low Angle with Relaxation Enhancement</i>
FLASH	<i>Fast Low Angle Shot</i>
FSE	<i>Fast Spin-Echo</i>
HASTE	<i>Half-Fourier Acquisition Single-shot Turbo Spin-Echo</i>
MP-RAGE	<i>Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo</i>
RARE	<i>Rapide Acquisition with Relaxation</i>
SE	<i>Spin-Echo</i>
SE fs	<i>Spin-Echo fat-suppressed</i>
SSFSE	<i>Single-Shot Fast Spin Echo</i>
STIR	<i>Short Tau Inversion Recovery</i>
SWI	<i>susceptibility-weighted imaging</i>
TIRM	<i>Turbo-Inversion Recovery-Magnitude</i>
TOF	<i>Time of flight</i>
TRUFI	<i>True Fast Imaging with Steady Precession</i>
TSE	<i>Turbo-Spin-Echo-Sequenz</i>
Turbo-FLASH	<i>Turbo Fast Low Angle Shot</i>
VIBE	<i>Volumetric interpolated breath-hold examination</i>

Begriffserklärung und Synonyme

(Analgo-) Sedierung	medikamentös induzierte Dämpfung von Bewusstsein und Schmerzempfindung unter Aufrechterhaltung der Spontanatmung; Synonym: Dämmer Schlaf
Allgemeinanästhesie	medikamentös induzierte Ausschaltung von Bewusstsein, Schmerzempfindung und vegetativer Reaktion, beinhaltet meist eine Atemwegssicherung; Synonym: (Voll-) Narkose
Atemwegssicherung	Einbringen von Hilfsmitteln (Larynxmaske, Larynx-tubus, Endotrachealtubus o.Ä.) in den physiologischen Atemweg mit Möglichkeit zur (maschinellen) Beatmung
<i>feed-and-wrap</i> -Methode	sedierungsfreie Schlafinduktion durch Fütterung bei Neugeborenen und Säuglingen; Synonyme: „feed and sleep“-Methode, „feed and swaddle“-Methode, „feed and bundle“-Methode
Frühgeborenes	Geburt vor der vollendeten 37. Schwangerschaftswoche (SSW)
Neonatalperiode	erste 28 Lebenstage nach Geburt
Neugeborenes	Kind bis zur Vollendung des 31. Lebenstages
Reifgeborenes	Geburt nach dem Ende der 37. SSW bis vor Abschluss der 42. SSW
Säugling	Kind bis zur Vollendung des ersten Lebensjahres
Vakuummatratze	Hilfsmittel zur Immobilisation

1. Einleitung

Die apparative Untersuchung von Früh- und Neugeborenen stellt die Untersuchenden in Abhängigkeit der gewählten Untersuchungsmethode vor verschiedene Herausforderungen (2-4). Die Sonografie ist niederschwellig verfügbar, jedoch teilweise begrenzt in der Aussagekraft und z.B. für die Planung von operativen Eingriffen, die eine exakte Darstellung der vorliegenden Anatomie benötigen, nicht optimal (3, 5). Die Untersuchungsmethoden konventionelles Röntgen und Computertomografie (CT) benötigen zwar nur kurze Untersuchungszeiten, gehen jedoch mit ionisierender Strahlung einher. Dies muss bei der Indikationsstellung bedacht werden (3, 4, 6). Grundsätzlich sollte im Umgang mit ionisierender Strahlung besonders sensibel und leitliniengerecht gearbeitet werden (7, 8). Ein zentrales Prinzip des Strahlenschutzes ist das ALARA-Prinzip. Dies steht für „*As Low As Reasonably Achievable*“ und kann mit „so niedrig wie vernünftig erreichbar“ übersetzt werden (9). Das ALARA-Prinzip legt nahe, die Strahlenbelastung auf das notwendige Minimum zu reduzieren. Insbesondere Untersuchungen, die mit Strahlenbelastung einhergehen, sollten nur dann durchgeführt werden, wenn diese alternativlos und gerechtfertigt sind. Dies wird durch den Begriff der „rechtfertigenden Indikation“ beschrieben (6, 9, 10). Konventionelle Röntgenuntersuchungen werden auf Grund der eher geringen Strahlenbelastung und der unkomplizierten Durchführung auch bei Neonaten und Säuglingen vergleichsweise häufig durchgeführt. Die Indikationen sind variabel, Beispiele sind unter anderem der Verdacht auf Frakturen oder Erkrankungen wie Pneumonien, nekrotisierende Enterokolitis oder Mekoniumileus (3, 4). Die Untersuchung eignet sich gut als Verlaufskontrolle und kann zudem auch als *Bedside*-Diagnostik (z.B. Betaaufnahme im Inkubator) außerhalb der Räumlichkeiten der Radiologie erfolgen.

Die CT spielt in der Diagnostik von Neonaten und Säuglingen eher eine untergeordnete Rolle. Rechtfertigende Indikationen sind unter anderem Schädel-Hirntrauma mit akuten neurologischen Symptomen oder der Verdacht auf Fehlbildungen der oberen Atemwege (z. B. Choanalatresie), welche mit einer akuten vitalen Gefährdung einhergehen (8, 11). Bei anderen Fragestellungen, die nicht mit vitaler Gefährdung einhergehen oder die durch andere diagnostische Möglichkeiten beantwortbar sind, werden keine CT-Untersuchungen durchgeführt (4, 8, 12).

Die Magnetresonanztomografie (MRT) eignet sich auf Grund ihres hervorragenden Weichgewebekontrastes insbesondere zur Beantwortung von Fragestellungen, die eine hohe Bildqualität und genaue anatomische Darstellung benötigen (3, 12). Darüber hinaus bietet die MRT die Möglichkeit, bei der Gefäßdarstellung z. B. der Hirngefäße auf Kontrastmittel zu verzichten (2, 13). Hiervon profitieren insbesondere sehr junge Patientinnen und Patienten, da eine Kontrastmittelgabe auf Grund der Organunreife der Nieren in diesem Entwicklungszustand bzw. Alter nur zur Beantwortung vitaler Fragestellungen indiziert wäre (4, 12). Ein Nachteil der Bildakquirierung mit Hilfe der MRT ist die lange Untersuchungsdauer sowie die Anfälligkeit für Bewegungsartefakte (3, 14). Um aussagekräftige Untersuchungsergebnisse erhalten zu können, muss der Patient bzw. die Patientin für die Zeit der MR-Aufnahmen möglichst still liegen (3, 14). Da Kinder erst ab einem bestimmten Alter bewusst fähig sind, diesen Anforderungen zu entsprechen, wird die MR-Diagnostik bis zu einem Alter von vier bis sechs Jahren meist in Sedierung oder Allgemeinanästhesie durchgeführt (4, 10).

Die genaue Planung des Untersuchungsablaufes ist für jedes Patientenklintel relevant, bei der Arbeit mit narkosepflichtigen Kindern jedoch essenziell, da für die Zeit der Untersuchung erhebliche Ressourcen gebunden sind: Neben den bei der Narkoseeinleitung meist anwesenden Eltern sind üblicherweise eine Anästhesistin oder ein Anästhesist, eine Anästhesiepflegefachkraft, eine Fachkraft für medizinische Technologie, Fachrichtung Radiologie, sowie ein Facharzt oder eine Fachärztin für Radiologie vor Ort (12, 15).

Die Sedierung von Kindern dieser Altersklasse, die eventuell schwer vorerkrankt sind, erfordert ein hohes Maß an fachlicher Kompetenz und Erfahrung, um mögliche Risiken zu minimieren (5, 16, 17). Neben den Akutkomplikationen, die während einer Sedierung oder Narkose auftreten können, sind auch mögliche Sekundäreffekte, die durch eine Allgemeinanästhesie entstehen können, zu berücksichtigen. Während zu den allgemeinen Anästhesierisiken Probleme bei der Atemwegssicherung und Beatmung oder medikamenteninduzierte Kreislaufinstabilität zählen, sind neurotoxische Effekte, bedingt durch Narkosemedikamente, bis heute nicht gänzlich auszuschließen (18-23).

Eine Alternative zur Sedierung bei sehr kleinen Kindern ist die *feed-and-wrap*-Methode, auch bezeichnet als „feed-and-sleep“-, „feed-and-swaddle“- oder „feed-and-bundle“-Methode (15, 24-29). Die Methode basiert auf der Annahme, dass das Füttern

bei Früh- und Neugeborenen natürlicherweise Schlaf induziert (30). Um diesen Effekt zu nutzen, werden die Patientinnen und Patienten kurz vor der geplanten MR-Untersuchung gestillt oder gefüttert und ggf. mit einem Schnuller als unterstützend-beruhigende Maßnahme zum Einschlafen gebracht (15, 24, 31). Um die natürlichen Bewegungen des Kindes weiter zu minimieren, kommen Wickeltechniken oder Hilfsmittel wie Vakuummatratzen zur Immobilisation zum Einsatz (28, 32). Die Überwachung der Vitalfunktionen mit Hilfe von Pulsoxymetrie zur Messung der Sauerstoffsättigung (SpO₂), EKG oder weiterem Monitoring ist problemlos möglich (33-35). Durch den angelegten Gehörschutz nehmen die Kinder die Geräusche des MRT nur gedämpft wahr und schlafen im Optimalfall die gesamte Untersuchung durch. Nach der Untersuchung kann das Kind sofort zurück zu den Eltern und ggf. nach Hause entlassen werden. Eine weitere Überwachung ist dann nicht notwendig (25, 29, 32).

2. Ziel der Arbeit

Die Akquise von qualitativ hochwertigen MRT- Aufnahmen neonatologischer Patientinnen und Patienten stellt die Untersuchenden vor die Herausforderung abzuwägen, welches Maß an Invasivität in Kauf genommen werden kann, um eine hohe Bildqualität und damit die präzise Beantwortung der klinischen Fragestellung zu gewährleisten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Bildqualität von MR-Untersuchungen, die in Sedierung oder Allgemeinanästhesie durchgeführt wurden, mit denen der *feed-and-wrap*-Methode (FAWM) zu vergleichen.

Weiterhin soll dargestellt werden, welche Vorteile die FAWM im klinischen Alltag bringt, welche Patientengruppen besonders von der Methode profitieren und wo die Grenzen der Methode liegen (36).

3. Literaturdiskussion

3.1 Epidemiologie und Historie

3.1.1 Kinderradiologie in Deutschland

In Deutschland betreiben von den ca. 2.200 Krankenhäusern ungefähr 800 eine eigene radiologische Fachabteilung (37). Meist werden Kinder und Jugendliche dort nicht von speziell ausgebildeten Fachärzten und Fachärztinnen für Radiologie mit Schwerpunkt Kinderradiologie betreut, da es bereits im Jahr 2021 lediglich 66 praktizierende Kinderradiologen und Kinderradiologinnen im Bundesgebiet (38) gab. Dem gegenüber standen im Jahr 2014 80.775 durchgeführte MR-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen bis zu einem Alter von 15 Jahren (39). Die MRT ist dementsprechend längst keine seltene Untersuchungsmethode bei Kindern mehr und wird regelhaft auch bei Patientinnen und Patienten im Alter von unter einem Jahr durchgeführt (40). Um den Besonderheiten und Fallstricken in der Diagnostik von Kindern gerecht zu werden, sollten die betreuenden Ärzte und Ärztinnen ein hohes Maß an fachspezifischer Expertise mitbringen und die Untersuchungen evidenzbasiert und leitliniengerecht durchführen. Dies ist nur möglich, wenn eine flächendeckende Ausbildung garantiert werden kann und entsprechende Leitlinien und evidenzgestützte Verfahrensanweisungen verfügbar sind (41).

Die Geschichte der Kinderradiologie in Deutschland beginnt 1903 in der Charité-Kinderklinik Berlin und in der Universitätskinderklinik Leipzig mit der Etablierung einer eigenen Röntgenabteilung (42). Zwar wurden bereits zuvor vereinzelt Röntgenaufnahmen von Kindern durchgeführt (42), jedoch war diese Art der Diagnostik initial hauptsächlich erwachsenen Patientinnen und Patienten zugänglich. Mit der Einrichtung einer eigenen Radiologieabteilung begann jedoch auch das Interesse der Pädiaterinnen und Pädiater für diese Untersuchungsmöglichkeit zu steigen. So stammen die ersten Veröffentlichungen zum Thema „Kinderradiologie“ auch von Kinderärzten (39, 42). Die Frage der Zugehörigkeit zu einem Fachgebiet klärte sich im Jahr 1987, als die Kinderradiologie als Subspezialität der Radiologie anerkannt wurde (39, 42). Die Entwicklung von speziell auf die Untersuchung von Kindern ausgelegten Hilfsmitteln, wie beispielsweise der Babixhülle im Jahr 1950,

ermöglichten den standardisierten und sicheren Ablauf der Röntgen-Bildgebung (42). 1963 wurde mit der Gründung der Arbeitsgemeinschaft für Pädiatrische Radiologie (1970 Umbenennung in Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie, GPR) der Grundstein für die Vernetzung von (Kinder-) Radiologen und Radiologinnen und interessierten Angehörigen weiterer Fachrichtungen im deutschsprachigen Raum gelegt. Die GPR ist seit 1981 Mitglied der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V. (AWMF) und veröffentlicht regelmäßig Leitlinien zum Thema, beispielsweise die S1-Leitlinie zur Ganzkörpermagnetresonanztomografie im Kindes und Jugendalter im Jahr 2021 (41) oder ist an interdisziplinären Leitlinien, wie z. B. der S3-Leitlinie „Kindesmisshandlung, -missbrauch, -vernachlässigung unter Einbindung der Jugendhilfe und Pädagogik (Kinderschutzleitlinie)“ aus dem Jahr 2019 beteiligt (43).

3.1.2 Geschichte der MRT

Anders als die Geschichte der Röntgentechnik, kann die Entwicklung der Magnetresonanztomographie (MRT) nicht auf einen Menschen oder ein einzelnes Ereignis zurückgeführt werden. Sie ist vielmehr ein Zusammenspiel aus den Ideen und Forschungen Vieler. Die Grundlagen wurden bereits im 18. Jahrhundert von Jean-Baptiste Fourier (1768-1830) und Nikola Tesla (1856-1943) gelegt: Fourier beschrieb die mathematischen Überlegungen für die nach ihm benannte Fourier-Transformation, welche die Grundlage für die Bildberechnung der MRT bietet. Tesla erforschte unter anderem die Entstehung und Auswirkungen von Magnetfeldern und ist Namensgeber der internationalen Einheit für die Stärke eines Magnetfeldes „Tesla“ (T) (44).

Felix Bloch (1905-1983) und Edward Purcell (1912-1997) beschrieben im Jahr 1946 unabhängig voneinander ihre Beobachtung, dass Atomkerne in der Lage sind, hochfrequente Radiowellen zu absorbieren, wenn sie sich innerhalb eines externen Magnetfelds befinden (45, 46). Beide erhielten 1952 den Nobelpreis im Fachbereich Physik für ihre Forschung an der *Nuclear Induction* (Bloch) bzw. der *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR) (Purcell) (47).

Die Technik der NMR wurde in den frühen Jahren jedoch vor allem im nicht-medizinischen Kontext genutzt (44). Erst durch die Forschungen des Arztes Erik Odeblad (1922-2019), welcher Felix Bloch im Jahr 1952 an der Universität Stanford traf und sich mit dessen Forschung zur NMR auseinandersetzte, hielt die Technik

Einzug in die Medizin (44). Odeblad begann Experimente mit humanen Proben und konnte in den folgenden Jahren wichtige Beiträge zur Forschung zu Relaxationszeiten verschiedener Gewebetypen leisten (48, 49).

Nach diesen ersten Schritten erkannten viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Bandbreite an Möglichkeiten zum Einsatz der NMR und die Forschung auf diesem Gebiet wurde intensiviert. 1968 beschrieben Jasper A. Jackson und Wright H. Langham den ersten Ganzkörperscan einer sedierten Ratte (50). Paul C. Lauterbur (1929-2007) veröffentlichte 1973 seine Forschung zur MRT, in der er die Theorie beschrieb, dass die bildkontrasterzeugenden Parameter insbesondere durch die unterschiedlichen Relaxationszeiten verschiedener Gewebe entstehen (51). Er gilt seitdem als der „Erfinder“ der medizinisch genutzten MRT-Bildgebung (44). Im Jahr 2003 erhielt er, gemeinsam mit Sir Peter Mansfield, der die mathematischen Berechnungen entwickelte, um aus den Relaxations-Signalen Bildinformationen zu gewinnen, den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für seine Forschungen (47). Richard Ernst (1933-2021), Professor für Physikalische Chemie aus Zürich, welcher Lauterbur's Theorien 1974 auf der Konferenz der *International Society of Magnetic Resonance* (ISMAR) in Raleigh, North Carolina hörte, veröffentlichte 1975 die Idee der „*NMR Fourier Zeugmatography*“ (52), auf deren Grundlage bis heute die Daten der MR-Bilder berechnet werden.

Nach diesen bahnbrechenden Veröffentlichungen entwickelte sich die Technik der MRT immer schneller: 1977 konnte R. Damadian das erste echte MRT-Bild eines menschlichen Thorax präsentieren (53) – jedoch reichte die örtliche Auflösung nicht für diagnostische Zwecke aus. Zudem waren die Aufnahmezeiten mehrere Stunden lang und die MRT somit nicht als flächendeckendes diagnostisches Mittel nutzbar (44). Damadian gründete 1978 das Unternehmen "Fonar", welches bereits 1980 sein erstes MRT-Gerät vorstellte und ab 1981 auch zur kommerziellen Nutzung verkaufte. Der FONAR-QED80 arbeitete mit 450G. Dies entspricht umgerechnet 0.045 T (54, 55).

In Deutschland wurde im Frühjahr 1983 das erste MRT an der Medizinischen Hochschule Hannover installiert. Der von Siemens, Erlangen bereitgestellte Prototyp wurde zu Forschungszwecken verwendet und mit einem ölkühlten, normalleitenden 0,2-Tesla-Magneten betrieben. Da die Feldstärke des Geräts den Kernspin und damit maßgeblich die Bildqualität beeinflusst, war es notwendig, Geräte mit höherer Feldstärke zu entwickeln. Um dies zu erreichen, wurden die in den Prototypen

verwendeten normalleitenden Widerstandsmagneten durch supraleitende Magnetspulen ausgetauscht (56).

Das erste kommerziell nutzbare MRT-Gerät der Firma, der Siemens MAGNETOM 1 (1983), arbeitete dann bereits mit einer Feldstärke von 0,35T, das Nachfolgergerät (1987) MAGNETOM GBS 2 bis mit zu 2T (56). In den Jahren darauffolgenden Jahren verbesserte sich die Leistungsfähigkeit und Bildqualität von MRT-Geräten erheblich. Ein wichtiger Faktor war neben der Erhöhung der Feldstärke des Hauptmagnetfeldes die Erhöhung der Feldstärke der Gradienten. Die Entwicklung neuer, schnellerer MR-Sequenzen, wie beispielsweise der *Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement* (RARE)-Sequenz, entwickelt von A. Nauerth, Hartmut Friedburg und Jürgen Hennig im Jahr 1986 (57) oder auch der *Fast Low Angle Shot* (FLASH)-Sequenz, entwickelt von Axel Haase, Jens Frahm, Dieter Matthaei, Wolfgang Hänicke und Dietmar K. Merboldt (58), ermöglichten schließlich die Nutzung als diagnostische Bildgebung, da die Aufnahmezeiten mit Hilfe dieser Techniken drastisch reduziert werden konnten. Dauerte die Erzeugung von MRT-Bildern zuvor über einen halben Tag, reduzierte die FLASH-Technik diese Zeit um den Faktor 100 und somit auf wenige Minuten. Nachdem die kommerzielle medizinische Nutzung von MRT-Geräten nun möglich war, konzentrierten sich die Forschenden darauf, die Bildqualität weiter zu verbessern, die Aufnahmezeit zu verkürzen und neue Indikationen und Möglichkeiten der Nutzung zu entwickeln: Die MR-Angiografie, welche 1986 von dem Chemiker Charles L. Dumoulin und dem Physiker Howard R. Hart entwickelt wurde, sowie die Diffusions-MRT, im gleichen Jahr patentiert von dem Radiologen Denis Le Bihan, ermöglichten die bessere Darstellung des Gehirns und intrazerebraler Pathologien (59, 60). Der Biophysiker Seiji Ogawa entdeckte im Jahr 1990 den BOLD-Kontrast, welcher die Grundlage für die Suszeptibilitätsgewichtete Bildgebung und die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) bildete (3, 61, 62). Durch die Kopplung an ein EKG, wurde neben der Darstellung der Anatomie auch die funktionelle Beurteilung der Herzleistung möglich, jedoch nur, solange die Patientinnen oder Patienten die Luft während der Untersuchung anhalten konnte (3, 63). Dieses Problem wurde durch die Entwicklung der Echtzeit-Magnetresonanztomographie gelöst: Die von Jens Frahm und Kollegen im Jahr 2010 vorgestellte FLASH-2 Methode bildet die Grundlage für die Echtzeit-MRT. Durch die hohe zeitliche Auflösung eröffneten sich völlig neue diagnostische Möglichkeiten: Das schlagende Herz kann bei freier Atmung dargestellt

oder komplexe Bewegungsabläufe, wie zum Beispiel Schlucken, können beobachtet werden (64, 65).

Doch nicht nur die Sequenzentwicklung schritt voran, auch die Gerätetechnik wurde stetig optimiert: Das 0,35-Tesla-Modell des MAGNETOM 1 wog ca. 3,5 Tonnen und benötigte eine Raumgröße von ca. 95qm für die spezielle Abschirmung des Magneten. Diese Eisendirektabschirmung wog zusätzliche 30 Tonnen. Unter anderem durch die Entwicklung der aktiven Abschirmung (durch supraleitende Magnetspulen oder Permanentmagneten) konnte die benötigte Raumfläche bei dem 1T MAGNETOM Impact (1991) auf einer Fläche von 40 Quadratmetern oder beim MAGNETOM P8 (1991) auf 25 qm reduziert werden. Zudem verringerte sich das Gewicht, so dass die möglichen Standorte für das MRT-Gerät variabler wurden (56). Ab den frühen 2000er Jahren waren die ersten kommerziell nutzbaren Ultrahochfeld-MR (z.B. MAGNETOM Trio (2000) von Siemens und Signa 3T von GE Healthcare (2002)) mit 3T Feldstärke verfügbar. Heute finden sich Geräte mit 7T (z.B. MAGNETOM Terra von Siemens oder Signa 7.0T von GE) in der klinischen Anwendung, Geräte mit bis zu 11,7 Tesla stehen für Forschungszwecke zur Verfügung (56).

Mit Entwicklung von MR-geeigneten Kontrastmitteln wurden die Indikationen für die MRT-Bildgebung noch vielfältiger: Die Idee, den Kontrast von MRT-Aufnahmen mithilfe einer Substanz zu erhöhen, wurde bereits 1978 von Paul C. Lauterbur, Maria Helena Mendonça-Dias and Andrew M. Rudin beschrieben (66) und konnte schließlich 1988 mit der Entwicklung der ersten Kontrastmittel auf Gadopentetat-Dimeglumin- (Magnevist®, Schering AG) oder Gadotersäurebasis (Dotarem®, Guerbet) auch für den klinischen Einsatz verfügbar gemacht werden (44).

3.2 Indikation und Durchführung von MR-Untersuchungen bei neonatologischen Patientinnen und Patienten und Säuglingen

Die Indikationen für eine MR-Untersuchung bei Neugeborenen und Säuglingen sind so vielfältig wie die Erkrankungen, an denen die Patientinnen und Patienten leiden. Eine der häufigsten Indikationen für ein neonatales MRT ist der Verdacht auf eine perinatale Asphyxie. Kommt es unter der Geburt zu einem Sauerstoffmangel, kann es in Folge zu einem Missverhältnis zwischen O₂-Angebot und -bedarf (Hypoxie) oder einer unzureichenden Gewebedurchblutung (Ischämie) kommen. Diese Minderversorgung mit Sauerstoff kann eine hypoxisch-ischämische Enzephalopathie (HIE), Leber- und Nierenschädigungen oder eine hämorrhagische Enteritis bedingen (5, 67). Klinische Anzeichen für Asphyxie sind primäre Apnoe, initial mit stabilen kardiorespiratorischen Verhältnissen. Ohne adäquate Behandlung kommt es im Verlauf zur Zyanose mit sekundärer Apnoe, welche mit Hypotonie und Bradykardie einhergeht.

Weitere Gründe für eine neonatale MRT sind der Verdacht auf eine Fehlbildung oder die Suche nach weiteren Fehlbildungen im Rahmen eines angeborenen Syndroms (4, 41), der Verdacht auf eine Hirnblutung oder Durchblutungsstörung (z.B. Sinusvenenthrombose), eine Liquorzirkulationsstörung, Makrozephalie oder intrakranielle Zysten (68). Ganzkörperaufnahmen werden insbesondere bei der Tumorsuche im Rahmen maligner Erkrankungen und zur OP-Planung im Rahmen komplexer Fehlbildungen z.B. von Lunge oder Herz, durchgeführt.

Die MRT eignet sich insbesondere bei onkologischen Erkrankungen als bildgebende Maßnahme, da eine gute Gewebsdifferenzierung möglich ist (3) und die Untersuchung auch mehrfach wiederholt werden kann, ohne dass eine Strahlenexposition berücksichtigt werden muss (14). Die Möglichkeit des Verzichts auf Kontrastmittelgaben zur Gefäßdarstellung ermöglicht zudem eine nicht-invasive Diagnostik, auch bei unreifem Organstatus der Nieren (4, 12, 63). Mit Hilfe der Time-of-Flight (TOF)-Angiographie können insbesondere die Gefäße der Kopf- und Halsregion kontrastmittelfrei dargestellt werden, die Phase-Contrast (PC)-Angiographie bietet sich zur Untersuchung von Venen oder Hirnsinus an. Arterial Spin Labeling (ASL) erlaubt zudem die Beurteilung von Tumorvaskularisationen oder des zerebralen Blutflusses (3, 13, 63).

3.3 Sedierung und Allgemeinanästhesie

Als Sedierung (von lat. „sedare“ = beruhigen) oder Sedation definiert ist die medikamentöse Dämpfung des zentralen Nervensystems. Dies wird üblicherweise über die Applikation von Sedativa (Beruhigungsmittel) aus der Klasse der Benzodiazepine, Opiate oder der Narkotika erreicht. Kommt zusätzlich ein Schmerzmittel zur Anwendung, spricht man von einer Analgosedierung (23). Meist sind sedierte Patientinnen und Patienten jedoch auf laute Ansprache erweckbar. Der Übergang von der Sedierung zur Allgemeinanästhesie kann fließend sein. Häufig geht eine Narkose jedoch mit einer Form der Atemwegssicherung einher, da die Schutzreflexe (z.B. Schluck- und Hustenreflex) der Patientinnen und Patienten medikamentös unterdrückt werden (23).

Die Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (DGAI) veröffentlicht in regelmäßigen Abständen überarbeitete Leitlinien mit Empfehlungen zu Ablauf und Durchführung anästhesiologischer Prozeduren.

3.3.1 Vorteile der Untersuchung in Sedierung oder Narkose

Der Hauptvorteil einer Bildgebung in Sedierung bzw. Narkose liegt in der hervorragenden Bildqualität durch fehlende Bewegungsartefakte. Durch das ruhig schlafende Kind können zudem alle Sequenzen in gewünschter Reihenfolge durchgeführt werden. Bei unsedierten Patientinnen und Patienten wird versucht, die lauterer MR-Sequenzen, wenn möglich, zum Ende der Untersuchung zu planen, falls das Kind durch die Geräusche aufgeweckt werden sollte. Darauf muss bei Sedierung keine Rücksicht genommen werden. Auch können Sequenzen problemlos wiederholt werden, sollten diese beispielsweise auf Grund technischer Schwierigkeiten keine gute Bildqualität aufweisen.

Bestimmte Sequenzen, welche optimalerweise in Apnoe durchgeführt werden, können bei Kindern dieser Altersklasse nur in Allgemeinanästhesie durchgeführt werden, da die Patientinnen und Patienten nicht selbstständig die Luft anhalten können (3, 4). So werden bei der Narkose die Atemreflexe durch Medikamente unterdrückt bzw. aufgehoben und das Kind wird von einem Respirator beatmet. Dieser kann für eine kurze Zeitspanne eine bestimmte Atemlage in Inspiration oder Expiration halten. Allerdings muss für die maschinelle Beatmung immer eine Atemwegssicherung in Form einer extraglottischen Atemwegshilfe (Larynxtubus, Larynxmaske) oder eines

Endotrachealtubus erfolgen (23). Durch moderne Sequenztechnik sind Untersuchungen in Atemstillstand heute jedoch nur noch selten erforderlich.

3.3.2 Nachteile der Untersuchung in Sedierung oder Narkose

Die Sedierung oder Narkose bringt einige Nachteile mit sich, darunter die erforderliche Nüchternheit der Kinder, die Notwendigkeit der Anlage eines intravenösen Zugangs sowie die Verabreichung von Narkosemedikamenten wie Narkosegase, Propofol oder Chloralhydrat, welche jeweils ein individuelles Nebenwirkungsprofil mit sich bringen und mit Risiken für unerwünschte Arzneimittelwirkungen (UAW) einhergehen. Insbesondere Chloralhydrat wird auf Grund der vielfältigen unerwünschten Arzneimittelwirkungen nur noch selten angewendet: Zu erwartende Nebenwirkungen sind neben Bradykardie, Hypotonie und Arrhythmien auch Atemdepression, gastrointestinale Beschwerden wie Übelkeit, Erbrechen und Bauchschmerzen. Auf Grund der hepatischen Metabolisierung zu Trichlorethanol kann eine wiederholte Gabe gewebstoxische Effekte hervorrufen. Zudem ist eine Sedierung mit Chloralhydrat schlecht steuerbar, eine verzögerte Elimination kann zu längerer Wirkdauer führen und insbesondere bei Kindern besteht ein erhöhtes Risiko für paradoxe Reaktionen wie Agitation und Unruhe (23, 69).

Zudem bestehen die allgemeinen Narkoserisiken, insbesondere Probleme bei der Atemwegssicherung, Aspirationsrisiko und Beatmungsprobleme.

Wie bereits beschrieben, ist die Nüchternheit für elektive Sedierungen oder Narkosen zwingend erforderlich, um das Aspirationsrisiko zu reduzieren (16, 23, 70). Übermäßig lange Nüchternzeiten sollten jedoch vermieden werden. Diese führen zu vermehrtem Stress, eingeschränkter Kooperation und Dehydratation, was insbesondere für schwer vorerkrankte Kinder eine zusätzliche Belastung darstellt (70, 71).

Das Etablieren eines venösen Zugangs bei sehr kleinen oder chronisch kranken Kindern kann schwierig sein und gelingt auch dem erfahrenen Behandler bei Patientinnen und Patienten im ersten Lebensjahr nur in 50-80% der Fälle beim ersten Versuch (72). Auch kann die Anlange des Zugangs beim Kind mit Angst und Stress verbunden sein, da es hierfür festgehalten werden muss. So spielt auch die Compliance von Eltern und Kind eine wichtige Rolle für den zeitlichen Ablauf, da ohne einen venösen Zugang keine Sedierung oder Allgemeinanästhesie möglich ist und die Untersuchung dementsprechend nicht stattfinden kann.

Bei unbemerkter Fehllage des Zugangs außerhalb der Vene kann es durch die Gabe von Medikamenten wie beispielsweise Propofol „nach intramuskulärer Applikation zu Gewebeschäden an der Injektionsstelle“ (73) und bei paravenöser bzw. subkutaner Injektion zu „entzündlichen Infiltrationen und fokaler Fibrose“ kommen (73).

Weiterhin ist zu beachten, dass die verwendeten Narkosepharmaka ggf. Nebenwirkungen verursachen und Indikations- und Altersbeschränkungen unterliegen, die einen Einsatz bei sehr jungen oder vorerkrankten Kindern einschränken. So ist Propofol in Deutschland zur Allgemeinanästhesie erst nach dem 31. Lebenstag zugelassen (73, 74). Eine Studie von Welzing et al. (75) beschreibt relevante Blutdruckabfälle nach Narkoseeinleitung mit Propofol, wobei diese Ergebnisse in anderen Studien wie z.B. von Nauta et al. (76) nicht reproduziert werden konnten. Allerdings weisen auch die Fachinformationen der Hersteller auf einen möglichen Blutdruckabfall bei sehr kleinen und schwer vorerkrankten (ASA III & IV; die ASA-Klassifikation der *American Society of Anesthesiologists* ist ein System zur Einschätzung des präoperativen Gesundheitszustands) Säuglingen hin (73).

Eine solche Kreislaufinstabilität kann die Untersuchung verzögern oder zum Abbruch der Untersuchung führen. Kommen bei der Sedierung oder Narkose Inhalationsanästhetika oder Muskelrelaxantien zum Einsatz, besteht zudem die Gefahr einer malignen Hyperthermie (77), einer potentiell lebensbedrohlichen Stoffwechselerkrankung, welche bei allen Patientinnen und Patienten, die eine Allgemeinanästhesie erhalten, potentiell auftreten kann.

Ein Punkt, mit dem sich Behandelnde zudem immer wieder konfrontiert sehen, sind Fragen der Eltern bezüglich der Neurotoxizität von Anästhetika. Als Neurotoxizität bezeichnet man die Eigenschaft bestimmter chemischer oder biologischer Stoffe, das Nervensystem zu schädigen (78), d.h. Nervenzellen abzutöten oder funktionslos werden zu lassen. Die Frage ob und in welchem Ausmaß Narkosemedikamente neurotoxisch wirken, wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten kontrovers diskutiert. In den frühen 2000er Jahren publizierte tierexperimentelle Studien alarmierten die Ärzteschaft, da gezeigt wurde, dass die (wiederholte) Exposition von Nagetier- und Affenjungen mit (inhalativen) Narkotika zu relevanten neurokognitiven Einschränkungen führte (79-85). Dies konnte für viele in der Kinderanästhesie eingesetzte Medikamente, wie z.B. Narkosegase, Propofol, Ketamin, Benzodiazepine und Barbiturate belegt werden (86). Zum jetzigen Zeitpunkt wurden mehr als 500

tierexperimentelle Studien publiziert, die den Zusammenhang von Neurotoxizität und Anästhetikaexposition im Kindesalter beschreiben (86). Da die Ergebnisse von tierexperimentellen Studien nicht direkt auf den Menschen übertragen werden können, wurden mehrere retro- und prospektive Studien angelegt. Eine retrospektive Analyse aus Kanada von Graham et al. verglich eine Gruppe von Kindern unter vier Jahren Lebensalter, die eine Anästhesie erhalten hatten, mit ca. 14.000 Kindern, die keine Narkose erhalten hatten. Es konnte kein erhöhtes Risiko für neurokognitive Einschränkungen im Zusammenhang mit (mehreren) Anästhesieexpositionen festgestellt werden (87). Drei große, prospektive Studien, GAS (*General Anesthesia and awake regional anesthesia in infancy Study*; (88)), MASK (*Mayo Anesthesia Safety in Kids*; (89)) und PANDA (*Pediatric Anesthesia Neurodevelopment Assessment*; (90)) konnten keinen Zusammenhang zwischen einer einmaligen Exposition mit Anästhesiepharmaka und kognitiven Defiziten aufzeigen. Lediglich die mehrmalige Exposition war mit reduzierter Feinmotorik und möglichen Lernschwierigkeiten vergesellschaftet (89, 91).

Die große multizentrische, prospektive Kohortenstudie NECTARINE (*NEonate and Children audit of Anaesthesia pRactice IN Europe*; (20)) beobachtete die Rate an „adverse events“ (engl.: unerwünschtes Ereignis; *AE*) bei Früh- und Reifgeborenen bis zu einem Alter von 60 Wochen postmenstrual (Gestationsalter (GA) zum Zeitpunkt der Geburt plus Anzahl der Lebenstage), die auf Grund einer Operation oder einer diagnostischen Maßnahme eine Sedierung oder Allgemeinanästhesie erhielten. Eingeschlossen wurden 5609 Patientinnen und Patienten aus 31 Europäischen Ländern. 35,7% der Kinder waren Frühgeborene, 460 davon konnten als Extrem-Frühgeborene (<28 SSW) klassifiziert werden. Von den 6542 erfassten anästhesiologischen Prozeduren (Allgemein- und/oder Regionalanästhesie) wurden 340 im Rahmen einer MR-Untersuchung durchgeführt. Die Rate an interventionsbedürftigen *AE* im Rahmen aller anästhesiologischen Prozeduren betrug 35,3%. Besonders häufig wurden kritische Blutdruckabfälle während der Narkose beobachtet (20). Es konnte gezeigt werden, dass Frühgeburtlichkeit und angeborene Fehlbildungen mit dem Risiko für *AE* unter Sedierung oder Narkose vergesellschaftet sind. Studien wie die NECTARINE stützen die Annahme, dass besonders Frühgeborene und vorerkrankte Säuglinge von einer sedierungsfreien Untersuchung profitieren.

Bei der Narkoseeinleitung sind Atemwegsprobleme vor allem bei kleinen Kindern häufig (92) und eine nicht ausreichende Atemwegssicherung ist dementsprechend das Hauptrisiko bei Kindernarkosen (93). Insgesamt sind Komplikationen häufiger als bei volljährigen Patientinnen und Patienten, die Letalität ist bei Kindern in den ersten Lebensjahren ca. 10-fach höher als bei Erwachsenen (94). Auch haben kardiovaskulär vorerkrankte Patientinnen und Patienten ein erhöhtes Narkoserisiko (95). So empfiehlt die Strahlenschutzkommission das (größere) Sedierungsrisiko von Kleinkindern bei der Indikationsstellung für eine MRT zu berücksichtigen (10). Dies kann in der Praxis dazu führen, dass insbesondere schwer vorerkrankte Kinder mit erhöhtem Narkoserisiko keine MR-Diagnostik erhalten (können), wenn kein sedierungsfreies Protokoll zur Verfügung steht. Ebenfalls können Patientinnen und Patienten, die eine akute Kontraindikation für eine Allgemeinanästhesie aufweisen (z.B. akuter Atemwegsinfekt) nicht untersucht werden. Die sich daraus ergebende diagnostische Lücke, kann sich nachteilig auf die weitere medizinische Versorgung des Kindes auswirken.

3.4 *Feed-and-wrap*- Methode

Der Begriff der *“feed-and-wrap”*- Methode (FAWM) ist in der Literatur auch als *„feed-and-sleep“*, *„feed-and-swaddle“*- oder *„feed-and-bundle“*-Methode (15) aufgeführt. Diese Begriffe beschreiben eine im grundsätzlichen Aufbau ähnliche Methodik, um Neugeborene und Säuglinge durch schlafinduzierende Maßnahmen ohne Sedierung oder Allgemeinanästhesie zu untersuchen. Sie unterscheiden sich jedoch in einzelnen Aspekten der Durchführung. Allen gemeinsam zugrunde liegt die Beobachtung, dass Neugeborene und junge Säuglinge zwischen kurzen Wachphasen und Schlafphasen wechseln (96) und die Schlafphasen sich zumeist an eine Nahrungsaufnahme anschließen (97). So wird versucht, die Untersuchung nach einer Fütterung zu terminieren, um den natürlichen Schlafrhythmus des Kindes auszunutzen. Weitere Hilfsmittel, wie eine vorangegangene Phase der Nahrungs- und/oder Schlafkarenz, spezielle Wickel- und Immobilisationstechniken, Geräuschabschirmung und nicht-medikamentöse Beruhigungskonzepte finden je nach Standort Anwendung (15, 26-30, 32, 33, 35, 98-105).

Die unterschiedlichen Ansätze zur Durchführung der FAW-Methode unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander, so dass sowohl die Umsetzung als auch die Ergebnisse der jeweiligen Studien unterschiedlich ausfallen.

Bereits im Jahr 1998 beschrieben Hüppi et al. (106) die Untersuchung von 100 Früh- und Neugeborenen, welche prospektiv innerhalb der ersten zwei Lebenswochen im MRT untersucht wurden. Ziel der Studie war jedoch die Analyse hirnganischer Entwicklungen von gesunden Kindern und nicht die Implementierung sedierungsfreier Untersuchungsprotokolle. Somit beschreiben Hüppi et al. in ihrer Veröffentlichung (106) nur marginal die Bedingungen, unter denen die sedierungsfreien MRT-Untersuchungen entstanden sind.

Sury et al. (107) führten im Jahr 2005 erstmals den Begriff der *„feed-and-sleep“*-Methode als Möglichkeit, an Patientinnen und Patienten jünger als drei Monate Lebensalter sedierungsfreie, diagnostische Bildgebung durchzuführen, ein. Allerdings wurde auch in dieser Veröffentlichung nicht näher beschrieben, welche Protokolle und Maßnahmen für die Schlafinduktion zum Einsatz kamen.

Auch Saunders et al. (34) beschrieben 2007 die Möglichkeit, Kinder unter zwei Monaten Lebensalter ohne Sedierung oder Allgemeinanästhesie während eines

natürlichen Schlafzeitraums zu untersuchen. Sie führten MRT-Untersuchungen des Gehirns und der Wirbelsäule durch.

Die Veröffentlichung von Mathur et al. (101) aus dem Jahr 2008 beschäftigte sich als eine der ersten dezidiert mit der Fragestellung, welche Möglichkeiten und Limitationen sedierungsfreie MRT-Bildgebung bietet. Über 1000 Untersuchungen des Schädels wurden ohne Sedierung oder Allgemeinanästhesie in einem Zeitraum von ca. 14 Jahren durchgeführt und ausgewertet. Mathur et al. (101) beschrieben die klinikeigenen Abläufe und gaben eine Erfolgsrate (hier definiert als die Beantwortung der klinischen Fragestellung durch die MRT-Bildgebung) von über 90% an (101). Sie beschrieben zudem detailliert die genutzten Hilfsmittel wie Gehörschutz und Vakuummatratzen.

S. Hansen (33) veröffentlichte 2009 die Daten aus einem 15-monatigen Beobachtungszeitraum, in dem 36 Patientinnen und Patienten sedierungsfrei in 1,5T MRT-Geräten untersucht wurden. Hauptsächlich wurden Untersuchungen des Gehirns durchgeführt. Die Kinder wurden eine halbe Stunde vor Beginn der Untersuchung einbestellt und hatten zu diesem Zeitpunkt vier Stunden gefastet (33). Nach dem Füttern wurden sie unter Verwendung einer Vakuummatratze immobilisiert. Die Eltern oder die Betreuungsperson war während der Untersuchung im Untersuchungsraum anwesend.

Nachdem die Forschungsergebnisse in den frühen 2000er Jahren bewiesen hatten, dass die sedierungsfreie MRT-Untersuchung grundsätzlich möglich ist, wurden die Bemühungen in den folgenden Jahren intensiviert, um auch die Limitationen der Methode erfassen zu können. Insbesondere die Frage nach geeigneten Körperregionen wurde intensiv beforscht:

Fogel et al. (108) beschrieben 2011 die Durchführbarkeit von sedierungsfreier MRT-Bildgebung bei Aortenbogendeformitäten, Windram et al. (35) (2012) und Shariat et al. (105) (2015) die sedierungsfreie MRT-Bildgebung bei Kindern mit angeborenen kardiovaskulären Fehlbildungen. Während manche Autorinnen und Autoren die einzelnen Schritte der Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung im Detail angaben, fehlen diese Informationen in anderen Arbeiten. So gingen Fogel et al. (108) nicht näher darauf ein, ob die Patientinnen und Patienten vor der Untersuchung eine Nüchtern-Zeit einhalten mussten. Sie beschrieben bei der Durchführung der FAWM in ihrer Studie lediglich, dass die Kinder kurz vor der Untersuchung durch die Mutter oder

eine Betreuungsperson gefüttert und dann mit Hilfe eines Tuchs immobilisiert wurden. Sowohl auf die Verwendung von sonstigen externen Immobilisationshilfen als auch auf das Monitoring der Vitalparameter gingen die Autoren nicht ein.

Shariat et al. (105) und auch Windram et al. (35) hingegen beschrieben, dass die eingeschlossenen Patientinnen und Patienten bis vier Stunden vor dem Scan nicht gefüttert wurden. Einen intravenösen Zugang, sowie die EKG- und SpO₂-Überwachung und den Gehörschutz erhielten die Kinder unmittelbar vor der Untersuchung. Immobilisiert wurden die Patientinnen und Patienten in beiden Studien mit Hilfe von Tüchern und einer Vakuummatratze.

Neubauer et al. (32), Dean et al. (109), Ibrahim et al. (28) und Caro-Domínguez et al. (24) beschäftigten sich explizit mit zerebraler Bildgebung:

Neubauer et al. untersuchten zwischen 2007 und 2010 insgesamt 89 Patientinnen und Patienten im Rahmen eines prospektiven Studiendesigns. Die eingeschlossenen Patientinnen und Patienten waren Frühgeborene, welche vor der 32. SSW zur Welt kamen und nach der Geburt auf der Neugeborenenintensivstation betreut werden mussten. Die Untersuchung fand zum Zeitpunkt des errechneten Geburtstermins statt. Neubauer et al. (32) beschrieben, dass die Eltern angewiesen wurden, den Fütterungsrhythmus der Kinder so anzupassen, dass die Kinder 20-30 Minuten vor Beginn der Untersuchung gefüttert werden konnten. Eine explizite Nüchternperiode wird nicht angegeben. Im Rahmen der Vorbereitungen wurden die Patientinnen und Patienten mit Ohrschützern ausgestattet. Die Kinder wurden in ein Tuch gewickelt, zudem kam eine Vakuummatratze zur Immobilisation zum Einsatz. Das Monitoring umfasste Herzfrequenz, peripher gemessene Sauerstoffsättigung und audio-visuelle Überwachung. Die Eltern waren während der Untersuchung im Untersuchungsraum anwesend und wurden dazu angehalten, ihre Kinder, falls sie aufwachen sollten, zurück in den Schlaf zu wiegen. Falls notwendig, wurde den Kindern oral verabreichte Glukoselösung auf einem Schnuller angeboten. Ein Radiologe oder einer Radiologin wertete die Bilder während der Untersuchung aus. Im Falle von schlechter Bildqualität durch Kindsunruhe konnte die Untersuchung jederzeit abgebrochen werden. Erfasst wurde die Untersuchungszeit, definiert als Zeit für die Vorbereitungen zuzüglich der Zeit für die eigentliche MR-Untersuchung.

Dean et al. (109) untersuchten zwischen Januar 2010 und April 2013 220 Patientinnen und Patienten im Alter zwischen drei Monaten und vier Jahren im Rahmen einer

longitudinalen Studie zur Beobachtung der natürlichen Entwicklung der weißen Hirnsubstanz. Eingeschlossen wurden gesunde, reifgeborene Kinder ohne psychische oder physische Erkrankungen und mit unkompliziertem Schwangerschaftsverlauf. 164 der Kinder wurden zusätzlich zur Eingangsuntersuchung je nach Initialalter in verschiedenen Intervallen erneut untersucht: Kinder jünger als zwei Jahre wurden im Abstand von 6 Monaten erneut untersucht, ältere Kinder nur jährlich.

Die Untersuchungen wurden zumeist abends geplant, um den natürlichen Schlafrhythmus der Kinder auszunutzen. Die Eltern wurden angehalten, den Kindern am Untersuchungstag idealerweise keinen Mittagsschlaf zu erlauben. Wenige Untersuchungen an jüngeren Kindern (unter sechs Monaten) wurden tagsüber durchgeführt. Um die Kinder für die Untersuchung vorzubereiten, wurden Räumlichkeiten mit Kinderbetten, Schaukelstühlen, Spielsachen und weiteren Annehmlichkeiten vorgehalten. So konnte die Durchführung der Abendroutine der Patientinnen und Patienten ermöglicht werden. Nachdem die Kinder eingeschlafen waren, erhielten sie analog zu oben genannten Studien Ohrschützer sowie Kopfhörer und wurden mit Hilfe von Vakuummatratzen immobilisiert. Die Vitalparameter überwachten die Ärztinnen und Ärzte über eine am Finger oder Zeh angebrachte Pulsoxymetrie. Zusätzlich wurden auch die durchgeführten Sequenzprotokolle angepasst, um die durch das MRT entstehenden Geräusche zu reduzieren. Dean et al. (109) konnten eine 97%-ige Erfolgsrate für einen erfolgreichen Scan erheben.

Ibrahim et al. (28) untersuchten in zwei aufeinanderfolgenden Studienphasen insgesamt 71 Patientinnen und Patienten. In der initialen Studienphase wurden die Kinder (n=48) mit der FAW-Methode untersucht. Detaillierte Angaben zum Ablauf wurden nicht gemacht. In der zweiten Studienphase wurden alle eingeschlossenen Patientinnen und Patienten (n=23) mit Hilfe von Chloralhydrat sediert, in einer Vakuummatratze immobilisiert und durch anwesendes medizinisches Personal überwacht. 10% der in FAW durchgeführten Untersuchungen mussten wiederholt werden, unter Sedierung waren keine Wiederholungen notwendig.

Caro-Domínguez et al. (24) untersuchten im Jahr 2019 insgesamt 94 Patientinnen und Patienten im Rahmen einer prospektiven Fall-Kontroll-Studie. Eingeschlossen wurden Kinder jünger als drei Monate, welche eine MRT-Untersuchung des Gehirns benötigten. Der Studiengruppe (n=47) zugeteilt wurden Kinder, welche kreislaufstabil waren und ohne Beatmungsunterstützung untersucht werden konnten. Für die

Kontrollgruppe (n=47) wurden kardio-respiratorisch instabile Kinder ausgewählt, welche mit den Studiengruppenteilnehmenden in Alter und Geschlecht übereinstimmten. Sowohl stationär aufgenommene als auch ambulant versorgte Patientinnen und Patienten wurden in die Studie eingeschlossen. Die Studiengruppe wurde mit Hilfe der FAWM untersucht, die Kontrollgruppe in Sedierung bzw. Narkose. In der Studiengruppe wurden die Kinder nach zwei bis drei Stunden Nüchternheit gefüttert und anschließend wurde abgewartet, bis sie eingeschlafen waren. Die Fütterung der Kinder, welche taggleich ambulant untersucht wurden, fand kurz vor der MRT in der radiologischen Fachabteilung statt. Die stationär versorgten Kinder wurden bereits früher auf der jeweiligen Station gefüttert. Nach dem Füttern wurden die Kinder in Decken gewickelt und 10-15 Minuten durch die Eltern oder eine Pflegefachperson getragen, bis sie eingeschlafen waren. Danach immobilisierte man die Patientinnen und Patienten mit Hilfe einer Vakuummatratze. Die Kinder wurden mit Gehörschutz, MRT-Helmen und Schlafmasken, welche in der UV-Lichttherapie verwendet werden, ausgestattet, um sie von den audio-visuellen Einflüssen abzuschirmen. Die Überwachung der Vitalfunktionen beinhaltete die Messung der Herzfrequenz und der Sauerstoffsättigung via am Fuß ableitendem Pulsoxymeter und die Aufzeichnung von Zwerchfellbewegungen.

Die Untersuchungen in der Kontrollgruppe wurden mit Hilfe von Sevoflurankurznarkosen durchgeführt. Die Kinder erhielten das Narkosegas über eine Gesichtsmaske ohne supraglottische Atemwegshilfe oder Intubation.

Die erhobenen Daten wurden von drei Fachärzten bzw. Fachärztinnen für Kinderradiologie ausgewertet und die einzelnen Sequenzen auf einer Skala von eins bis vier bewertet. Hierbei berücksichtigten die Auswertenden das Vorhandensein von Bewegungsartefakten. Ebenfalls wurde erhoben, ob die klinische Fragestellung beantwortet werden konnte und ob die Untersuchung wiederholt werden musste. 89% der in FAW durchgeführten MRT waren erfolgreich, wobei 60% der Bilddaten als „optimal“ und 30% als „suboptimal“ bewertet wurden. Im Vergleich hierzu wurden 89% der Bilddaten in der Kontrollgruppe als „optimal“ bewertet und 11% als „suboptimal“.

Tsiflikas et al. (103) und Kurugol et al. (100) nutzten die FAWM zur Durchführung von MR-Urografien. Tsiflikas et al (103) beschrieben die Durchführung von 61 funktionellen MR-Urografien zwischen 2010 und 2017. Die Studiengruppe (n=42) beinhaltete Patientinnen und Patienten zwischen 131 ± 61 Tagen Lebensalter, die Kontrollgruppe

(n= 19) zwischen 192 ± 87 Tagen Lebensalter. Alle Kinder erhielten im Rahmen der Untersuchung einen peripheren Venenzugang und einen transurethralen Blasenkatheter, wobei die Teilnehmenden der Studiengruppe mindestens zwei Stunden vor der Untersuchung katheterisiert wurden. Zudem mussten sie mindestens vier Stunden vor der Untersuchung Nahrungskarenz einhalten. Die Patientinnen und Pateinten der Kontrollgruppe wurden erst während der Sedierung bzw. Narkose katheterisiert. Analog zu den meisten bereits beschriebenen Studienprotokollen, wurden die Kinder der Studiengruppe direkt vor der Untersuchung gefüttert und mit einem Gehörschutz ausgestattet. Anschließend wickelte man sie in Tücher und immobilisierte sie mit Hilfe einer Vakuummatratze. Die Vitalfunktionen wurden mit einem peripheren Sauerstoffsensor überwacht. In der FAW-Kohorte wurden 90% der Untersuchungen als „erfolgreich“ bewertet, 10% der Untersuchungen mussten vorzeitig abgebrochen werden, zwei Untersuchungen wurden in Sedierung bzw. Narkose wiederholt.

Kurugol et al. (100) führten 18 sedierungsfreie Magnetresonanz-Urographien im Zeitraum zwischen März 2017 und Mai 2018 durch. Die Patientinnen und Patienten waren zwischen 0,9 und 5,1 Monaten alt. Die Eltern der Kinder wurden angehalten sicherzustellen, dass für den Zeitraum vor der Untersuchung Nahrungs- und Schlafkarenz eingehalten wurde. Eine genaue Zeitangabe wie lange diese Phase dauerte, wurde von Kurugol et al. nicht gemacht. Bei Aufnahme erhielten die Patientinnen und Patienten einen peripheren Venenzugang und einen Gehörschutz, anschließend wurden die Kinder zur Immobilisation in Decken gewickelt und gefüttert. Nach dem Einschlafen positionierte man die Studienteilnehmenden mit Hilfe eines Sitzsacks auf dem Patiententisch des MR-Geräts. Die Überwachung der Vitalfunktionen wurde auch hier über die periphere Sauerstoffsättigung sichergestellt. 17 der 18 MR-Urografien konnten erfolgreich durchgeführt werden, eine Untersuchung wurde in Sedierung wiederholt.

Während die meisten der verfügbaren Studien sich explizit mit der Untersuchung von einzelnen Körperregionen oder Indikationen beschäftigt haben, veröffentlichten Antonov et al (15) sowie Gale et al (26) Daten zu verschiedenen Körperregionen bzw. Ganzkörperuntersuchungen. Antonov et al. (15) veröffentlichten im Jahr 2017 retrospektiv ausgewertete Daten, welche zwischen April 2012 und März 2014 erhoben wurden. Sie beschrieben 279 Untersuchungen an 179 Kindern bis zu einem Alter von

drei Monaten. Inkludiert wurden alle in FAWM untersuchten Fälle, so dass Daten zu verschiedenen Körperregionen, Indikationen und Fragestellungen eingeschlossen werden konnten. Zudem wurden ausgewählte patientenbezogene Daten wie Vorerkrankungen oder Frühgeburtlichkeit dokumentiert.

Der Ablauf der sedierungsfreien Untersuchungen gestaltete sich analog zu vielen bereits beschriebenen Studien: Einer drei- bis vierständigen Nahrungskarenz folgte die Fütterung des Kindes. Ein Gehörschutz wurde etabliert und das Kind zur Immobilisation in Decken oder Tücher gewickelt. Eine Vakuummatratze zur Immobilisation kam jedoch nicht zum Einsatz. Die periphere Sauerstoffsättigung und die Herzfrequenz wurden standardmäßig überwacht, zusätzliches Monitoring wie EKG oder Temperaturmessung kamen zum Einsatz, falls medizinisch indiziert. Antonov et al. (15) beschrieben die vollständige Beantwortung der klinischen Fragestellung in 79% der Untersuchungen. In 20% der Untersuchungen konnte die klinische Fragestellung zumindest teilweise beantwortet werden.

Gale et al. (26) führten in einem Beobachtungszeitraum von 10 Jahren 457 Ganzkörperuntersuchungen zu Forschungszwecken durch, von denen 133 Untersuchungen an Frühgeborenen und 324 an Reifgeborenen stattfanden. Die untersuchten Kinder wurden kurz vor der Untersuchung gefüttert, das Gehör wurde mithilfe von Watte und Kopfhörern geschützt und die Überwachung der Vitalparameter erfolgte mittels EKG- und peripherer Sauerstoffsättigungsableitung. Die Erfolgsquote, definiert als eine gute Bildqualität ohne Bewegungsartefakte konnte in 94% aller Untersuchungen dokumentiert werden. Insbesondere in der Gruppe der Frühgeborenen konnte eine hohe Erfolgsrate (99%) festgestellt werden, wobei die Erfolgsquote mit zunehmendem Alter der Kinder abnahm.

Übersichtsarbeiten von Jaimes et al. (29) aus dem Jahr 2016, Dong et al. (25) aus dem Jahr 2019 und Harrington et al. (110) aus dem Jahr 2020 beschreiben die unterschiedlichen Herangehensweisen an die sedierungsfreie Untersuchung von Kindern. Neben angepassten MR-Protokollen, welche die Scan-Zeit und die Geräuschenstehung reduzieren, wurden altersangepasste psychologische und audiovisuelle Konzepte vorgestellt und verglichen. Die Autoren beschrieben zudem spezielle MR-Protokolle zur Reduktion bewegungsbedingter Artefakte. Durch die Verwendung von schnellen Sequenzen wie TSE oder FSE, single-shot Techniken (z.B. SSFSE), parallele Bildgebung und Echo Planar Imaging (EPI) kann die Aufnahmezeit

verringert werden. Durch die Verwendung von bewegungskompensierenden Sequenzen (z.B. BLADE) ist es möglich, Bewegungsartefakte zu unterdrücken. Die Planung der Sequenzabfolge sollte nach klinischer Relevanz priorisiert werden, zudem sollten geräuschintensive Sequenzen eher zum Ende der Untersuchung stattfinden (25, 29, 110).

Um die Mitarbeit der Patientinnen und Patienten zu erhöhen, wurden verschiedene Konzepte beschrieben. Grundsätzlich sollen die Umgebungsbedingungen besonders bei der Untersuchung von Kindern optimiert werden. Dies schließt freundliche, warme Lichtverhältnisse im Untersuchungsraum, beruhigende Musik oder natürliche Geräusche über Lautsprecher oder Kopfhörer (z.B. Vogelzwitschern) und eine angenehme Raumtemperatur mit ein. Die Gestaltung des Untersuchungsraums und des MRT-Geräts kann kindgerecht angepasst werden.

Ältere Kinder sollen aktiv in die Untersuchung miteinbezogen werden, ausführliche Erklärungen zum Untersuchungsablauf und die Möglichkeit, sich das MRT-Gerät vor der Untersuchung anzusehen, erhalten. Zu diesem Zweck, wurde den Eltern ausführliches Informations- und Anschauungsmaterial (z.B. MRT-Modelle, Bilder der Untersuchungsräume) zur Verfügung gestellt. Audio-visuelle Scan-Begleitunterhaltung mit Hilfe von speziellen Spiegelbrillen oder VR („virtual reality“)-Brillen zeigte eine signifikante Reduzierung der Notwendigkeit einer Sedierung bei Kindern, die älter als drei Jahre waren, jedoch keinen Effekt bei jüngeren Kindern (110, 111). Für Patientinnen und Patienten, die jünger als zwei Jahre waren, wurden insbesondere das Anbieten eines Schnullers (mit oder ohne Glukoselösung), das enge Wickeln in Tücher oder Decken zur Immobilisation und das Füttern direkt vor der Untersuchung beschrieben (25, 110).

Torres et al. (112) veröffentlichten im Jahr 2020 eine Metaanalyse, in welcher viele der oben genannten Studien eingeschlossen wurden und welche die Quellen der Heterogenität zwischen den verschiedenen Autoren und Autorinnen offenlegte: Auf Grund der unterschiedlichen Herangehensweise und Studiendesigns sei ein Vergleich zwischen den verschiedenen Arbeiten nur schwer möglich. Beginnend bei den Beschreibungen der Vorbereitungen und des Untersuchungsablaufs, welche in ihrer Detailliertheit stark variieren, über die Definition einer „erfolgreichen“ Untersuchung, welche durch jeden Autor bzw. jede Autorin individuell festgelegt wurde, finden sich zahlreiche Punkte, die eine direkte Vergleichbarkeit der Studienergebnisse unmöglich

machen. Da die Methoden sich teilweise enorm unterscheiden, können laut Torres et al. (112) Parameter wie „Erfolgsrate“, „Wiederholungsrate“ oder Zeitaufwand nicht direkt verglichen werden. Auch das untersuchte Patientenklientel spielt keine unerhebliche Rolle, wenn es um die Durchführbarkeit und die Ergebnisse der Studien geht. So ist es nachvollziehbar, dass in einer Studiengruppe, in welcher auch schwer vorerkrankte Patientinnen und Patienten eingeschlossen werden, eine höhere Wahrscheinlichkeit für Zwischenfälle und Untersuchungsabbrüche gegeben ist. Werden nur gesunde Kinder untersucht, ist davon auszugehen, dass medizinische Zwischenfälle wie kardio-respiratorische Instabilität seltener auftreten. Die Vergleichbarkeit von Studien- und Kontrollgruppe spielt ebenfalls eine große Rolle und muss bei der Auswertung der Ergebnisse kritisch betrachtet werden (112).

3.4.1 Vorteile der *Feed-and-wrap*-Methode

Die Vorteile der Methode im Vergleich zur Durchführung der MR-Untersuchung in Sedierung oder Narkose sind vielfältig: Es ist (wenn nicht durch die Grunderkrankung bedingt) kein stationärer Aufenthalt für die Bildgebung nötig. Zudem erfordern die Vorbereitung sowie die Durchführung der Untersuchung keine invasiven Maßnahmen und (mit Ausnahme einer selten notwendigen Kontrastmittelgabe) keine Medikamentenapplikation. Ebenso kann die nur kurze Trennung von Eltern und Kind dazu beitragen, eine ruhige und angstfreie Stimmung bei den Patientinnen und Patienten und Betreuungspersonen beizubehalten (113, 114). Durch die Möglichkeit der ambulanten MR-Untersuchung verringert sich die finanzielle Belastung des Gesundheitssystems, da die Kosten für die stationäre Aufnahme des Kindes und ggf. eines Elternteils wegfallen. Die Gesundheitskosten (hierzu zählen Güter und Leistungen und mit dem Ziel der Prävention, Behandlung, Rehabilitation und Pflege sowie Ausgaben für die Verwaltung des Gesundheitssystems) im Bereich der unter 15-Jährigen machten bereits im Jahr 2020 mit 27,878 Millionen Euro (115) ca. 6,33 % der Gesamtgesundheitskosten aus. Dies zeigt, dass die Frage nach Wirtschaftlichkeit auch in diesem Sektor der Gesundheitsversorgung relevant ist. Durch den Wegfall von Personal- und Unterbringungskosten können die verfügbaren Ressourcen optimal und fair genutzt werden.

Da die Anlange eines intravenösen Zugangs für die Untersuchung meist nicht notwendig ist, muss kein dafür geschultes Fachpersonal vorgehalten werden und das

Kind kann ohne vorherige invasive Maßnahme direkt zur Untersuchung kommen. Lediglich die Untersuchung mit Kontrastmittel erfordert auch bei unsedierten Patientinnen und Patienten einen intravenösen Zugang. Die Zeit, in der das MRT-Gerät zwecks Patientenvorbereitung nicht genutzt werden kann, verkürzt sich durch den Wegfall der Sedierung oder Allgemeinanästhesie, im Rahmen derer die Ein- und Ausleitung der Narkose meist im gleichen Raum stattfindet (103).

Mögliche Nebenwirkungen und Komplikationen durch die Gabe von Sedativa müssen nicht berücksichtigt werden. Somit eignet sich die Methode auch für schwer vorerkrankte Kinder und neonatologische Patientinnen und Patienten, bei denen eine Narkose mit hohem Risiko für unerwünschte Ereignisse vergesellschaftet sein kann (93).

3.4.2 Nachteile der *Feed-and-wrap-Methode*

Als nachteilig an der FAWM kann sich die geringe oder fehlende Mitarbeit der Eltern oder der Kinder auswirken. Dies kann eine unzureichende Bildqualität durch Bewegungsartefakte zur Folge haben. Durch qualitativ schlechte Aufnahmen kann sich die Untersuchungsdauer verlängern, da einzelne Sequenzen wiederholt werden müssen. Ein Abbruch der Untersuchung kann notwendig sein, wenn keine Aussicht auf ausreichend gute Bildqualität besteht.

In diesen Fällen kann die klinische Fragestellung ggf. nicht beantwortet werden und die MRT muss unter Umständen in Sedierung oder Narkose wiederholt werden. Dies verlängert die Zeit bis zur Diagnosestellung, da die Patientinnen und Patienten nach einem Versuch in sedierungsfreier Untersuchung nicht nüchtern sind und somit beim Versagen der Methode nicht direkt sediert werden können (70).

Durch unzureichende Mitarbeit von Seiten der Eltern kann eine zu kurz gehaltene Nahrungskarenz der Kinder dazu führen, dass eine Fütterung vor der Untersuchung durch das Kind abgelehnt wird. In diesem Fall kann es schwierig sein, eine Schlafphase zu induzieren und der Untersuchungsbeginn muss verschoben werden. Durch eine gute Kommunikation zwischen radiologischer Fachabteilung und den Eltern kann deren Mitarbeit verbessert werden, so dass zeitliche Verzögerungen durch Missverständnisse in im Fütterungsprotokoll vermieden werden können (25).

Die Mitarbeit der Kinder ist der hauptsächlich limitierende Faktor der Methode. Sollte das Kind nicht einschlafen oder sich während der Untersuchung zu stark bewegen,

kann die notwendige Bildqualität nicht erreicht werden. Insbesondere bei sehr langen (> 60 Minuten) Untersuchungsprotokollen sollte auf Grund der geringen Erfolgsaussichten ggf. bereits initial die Entscheidung über eine Sedierung oder Allgemeinanästhesie geprüft werden, da davon ausgegangen werden kann, dass das Kind mit höherer Wahrscheinlichkeit nicht die komplette Untersuchung schlafend verbringen wird. Jedoch sollte das individuelle Narkoserisiko auch in diesem Fall bei der Indikationsstellung bedacht werden (10).

3.5 Alternative Methoden

Neben der FAWM gibt es derzeit nur wenige Ansätze, MR-Untersuchungen bei Kindern, insbesondere von Neonaten und Säuglingen ohne anästhesiologische Maßnahmen durchzuführen.

Das Anbieten von Glukoselösung auf einem Schnuller kann zur Beruhigung und Schmerzreduktion bei Neugeborenen und Säuglingen beitragen (31), reicht jedoch meist nicht aus, eine MR-Untersuchung ohne weitere Maßnahmen durchzuführen.

An vielen Zentren in Deutschland wird versucht, Kinder mit Hilfe von pädagogischen Konzepten und/oder speziell auf die entsprechende Altersklasse abgestimmten Umgebungen und audiovisuellen Eindrücken eine stressfreie MR-Untersuchung ermöglichen. Diese, unter anderem von Dong et al. (25) beschriebenen Methoden, eine MR-Untersuchung kindgerecht zu gestalten, richten sich jedoch an Patientinnen und Patienten jenseits des Säuglingsalters. Die Methoden umfassen unter anderem: die Anpassung der Raumbeleuchtung, der Temperatur und der Umgebungsgeräusche. Dies sorgt für eine angenehmere Untersuchungsumgebung und somit für eine entspanntere Grundhaltung der Kinder. Auch die Anwesenheit einer Vertrauensperson im Untersuchungszimmer kann die Angst vor dem Unbekannten lindern (25).

Technische Optimierungen, wie die Anpassung der Sequenzauswahl sowie die Nutzung des so genannten Echtzeit-MRT ermöglichen zudem eine relevante Verkürzung der Untersuchungszeit bei guter Bildqualität. Die Echtzeit-MRT, basierend auf der FLASH-2-Technik, erzeugt bis zu 50 Bilder pro Sekunde, so dass Bewegungen die Bildqualität nicht relevant beeinflussen (116, 117). Allerdings ist die Bildauflösung der Echtzeit-MRT derzeit noch auf ca. $0,9 \times 0,9 \times 3$ mm begrenzt und es sind nicht alle im konventionellen MRT verfügbaren Kontraste darstellbar. Die begrenzte Auflösung schränkt die Darstellung von sehr kleinen Strukturen, wie z.B. Lungenrundherden ($<0,5$ cm) ein. Spezielle Sequenzen, wie die Diffusionswichtung, die unter anderem für die Diagnostik von intrazerebralen Infarkten oder Tumoren relevant ist, sind zudem nicht verfügbar (117).

3.6 Magnetresonanztomografie

Die MRT eignet sich auf Grund ihres hohen Weichteilkontrasts besonders gut zur genauen Darstellung der anatomischen Gegebenheiten und kommt zudem ohne ionisierende Strahlung aus (2, 3, 6). Somit eignet sie sich insbesondere zur Verlaufsbeurteilung, da mehrere Untersuchungen ohne Inkaufnahme von möglicherweise auftretenden Strahlenschäden durchgeführt werden können (6, 63). Durch die rasch fortschreitende Weiterentwicklung der MR-Technik erweitert sich das Einsatzgebiet stetig und die Darstellung funktioneller Prozesse rückt immer weiter in den Fokus. Zwar sind die gängigen Kontrastmittel gut verträglich und haben nur wenige Kontraindikationen, jedoch ermöglichen spezielle Sequenzprotokolle auch z. B. die kontrastmittelfreie Darstellung von Gefäßanomalien und Zirkulationsstörungen (3, 118, 119)

3.6.1 Physikalische Grundlagen

Das Prinzip der Kernspinresonanz bildet die Grundlage für die Funktion der MRT, welche im Gegensatz zur CT ohne ionisierende Strahlung auskommt und ausschließlich auf der Wechselwirkung eines Magnetfeldes und Radiofrequenzimpulsen besteht (3, 63, 118). Die Atomkerne (bzw. das Proton innerhalb des Kerns) von Wasserstoffatomen werden durch ein starkes Magnetfeld angeregt und so aus ihrer natürlichen Bewegungsachse abgelenkt. Im nicht angeregten Zustand rotieren die Protonen im Raum (Eigendrehimpuls, (Kern-) Spin). Durch das Anlegen eines statischen Magnetfeldes richten sich die Protonen entlang der Achse des Magnetfeldes aus (Längsmagnetisierung, Longitudinale Magnetisierung). Dies geschieht in paralleler oder antiparalleler Weise, wobei sich mehr Protonen in paralleler Weise ausrichten. In diesen Zustand der Längsmagnetisierung kommen die Protonen immer wieder zurück, solange sich das zu untersuchende Gewebe im eingeschalteten MR-Gerät befindet. Zusätzlich zum Spin bewegen sich die Protonen auf eine charakteristische Art um ihre eigene Achse, was man Präzession nennt. Die Frequenz, mit der die Protonen präzessieren, ist abhängig von der Stärke des angelegten Magnetfeldes (3, 6, 118-120).

Die Längsmagnetisierung der Protonen kann im MR-Gerät nicht gemessen werden, da das starke Magnetfeld des Gerätes dies verhindert.

Stattdessen wird die Longitudinalmagnetisierung mit Hilfe eines Radiofrequenzimpulses (Hochfrequenzimpuls, HF-Impuls), der in Resonanz mit der Präzession der Protonen eingestrahlt wird, kurzzeitig ausgelenkt. Zum einen nimmt die Längsmagnetisierung durch die Energieaufnahme der Protonen ab, zum anderen werden die Protonen synchronisiert (= in Phase gebracht) und es entsteht eine neue Quermagnetisierung (Transversalmagnetisierung). Die Transversalmagnetisierung präzessiert ebenfalls um die eigene Achse, welche jetzt jedoch nicht mehr in Richtung des Hauptmagnetfeldes des MRT steht. Der so entstehende Strom kann durch eine Spule gemessen werden. (3, 6, 118, 120).

Nach Abschalten des HF-Impulses streben die Protonen wieder die Ausgangsform an, man bezeichnet dies als Relaxation. Man unterscheidet zwischen dem Abbau der Transversalmagnetisierung (T2-Relaxation) und dem Aufbau der Longitudinalmagnetisierung (T1-Relaxation). Der Terminus „T1-Zeit“ bezeichnet die Zeit, bis die Längsmagnetisierung zu 63% wiederhergestellt ist. Die „T2-Zeit“ beschreibt die Zeit, bis die Transversalmagnetisierung um 63% abgenommen hat. Diese Prozesse laufen zeitgleich ab (3, 6, 118, 120).

Um diagnostisch verwertbare Bilder zu generieren, reicht es nicht, die Protonen nur einmal „auszulenken“, da die Kontraststärken, die so generiert werden würden, für das menschliche Auge nicht zu beurteilen wären. So werden mehrere HF-Impulse in zuvor festgelegten Abständen, genannt „time to repetition“ (TR-Zeit, Repetitionszeit) hintereinandergeschaltet. Die TR-Zeit ist neben weiteren Parametern maßgeblich für die Art der MR-Sequenz, die generiert wird und sie beeinflusst überwiegend den T1-Kontrast. Neben der Repetitionszeit ist auch die Echozeit (TE, Time to Echo, Echozeit) ein veränderbarer Parameter, welcher vor allem den T2-Kontrast beeinflusst. Die TE beschreibt die Zeit zwischen der Anregung der Protonen und der Messung des MR-Signals. Auch der Kippwinkel (Flip angle, Pulswinkel), mit dem die Protonen aus der Längsmagnetisierung ausgelenkt werden, ist veränderbar und nimmt Einfluss auf die T1-Gewichtung des entstehenden Bildes (3, 6, 118-120).

3.6.2 Bildentstehung

Das MR-Gerät generiert in Abhängigkeit der Relaxationszeiten (und der Protonendichte) zweidimensionale schwarz-weiß Bilder. Da die jeweiligen „T1- bzw. T2-Zeiten“ abhängig von den chemischen Eigenschaften und der Umgebung des Protons sind, unterscheiden sich verschiedene Gewebearten (Knochen, Fett, Flüssigkeiten) in ihrer Signalintensität. Grundsätzlich ist die T1-Zeit von Geweben länger als die T2-Zeit. Allgemein gesprochen haben Flüssigkeiten eine lange T1- und eine lange T2-Zeit. Fett hingegen hat eine kurze T1-Zeit und eine kürzere T2-Zeit als z.B. Wasser. Um diese Gewebearten nun voneinander unterscheiden zu können bzw. verwertbare Bilder zu generieren, werden die Protonen mehrfach hintereinander angeregt. Da die Gewebeart mit einer kürzeren T1-Zeit schneller relaxiert, hat sich die Längsmagnetisierung vor dem 2. HF-Impuls bereits vollständig erholt und kann ein starkes Signal induzieren. Die Längsmagnetisierung des Gewebes mit einer längeren T1-Zeit hat sich noch nicht vollständig erholt und kann bei erneutem HF-Impuls dementsprechend nur ein weniger starkes Signal ausstrahlen (3, 118-120). Demzufolge unterscheidet man zwischen T1-gewichteten Bildern, welche mit kurzer TR- sowie kurzer TE-Zeit generiert werden und T2-gewichteten Bildern, die mit einer langen TR- und einer langen TE-Zeit generiert werden. So stellen sich in T1-gewichteten Bildern Gewebe mit kurzer bzw. kürzerer T1-Zeit hyperintens (z.B. Hirngewebe, Fettgewebe) und Gewebe mit längerer T1-Zeit hypointens (z.B. Flüssigkeiten wie Liquor) dar. In T2-gewichteten Bildern ist die Situation dementsprechend gegensätzlich und Flüssigkeiten erscheinen hyperintens. Es ist auch möglich, protonendichte-gewichtete Bilder zu erstellen. In diesem Fall werden TR- und TE-Zeit so gewählt, dass nur die Dichte der Spins bestimmt wird und T1- und T2-Kontrasteffekte ausgeblendet werden. Dies wird durch eine lange TR und eine kurze TE erreicht. So zeigen sich Gewebe mit hoher Protonendichte hyperintens und Gewebe mit niedriger Protonendichte hypointens im entstehenden Bild (3, 6, 118-120).

3.6.3 Sequenzbeschreibung

In Abhängigkeit u.a. der gewählten oben genannten veränderlichen Parameter, lassen sich eine Vielzahl von unterschiedlichen MR-Sequenzen generieren. Um die Unterscheidung der einzelnen Sequenzen zu erleichtern, bietet es sich an, sie in zwei Gruppen zu betrachten: Spin-Echos (SE) und Gradienten-Echos (GE) (119).

Die oben beschriebene Technik der Einstrahlung von HF-Impulsen erzeugt die Spin-Echo-Sequenzen. Eine klassische SE-Sequenz besteht aus einem 90° -Hochfrequenzimpuls und einem nachfolgenden 180° -Invertierungsimpuls, der nach der Hälfte der geplanten TE eingestrahlt wird. Klassischerweise erfolgt die Bildrekonstruktion als Einzeilenauslese. Dies bedingt eine relativ lange Messzeit. Um diese zu verkürzen, bedient man sich der Mehrzeilenauslese, dann als Turbospin-Echo (TSE), Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement (RARE) oder Fast Spin-Echo (FSE) - Sequenz bezeichnet (118).

Werden die Spinvektoren anstelle von HF-Impulsen durch schnelles Schalten von Gradienten zwischen den Gradientenspulen in Bewegung versetzt, entstehen Gradientenechosequenzen (Gradient Recalled Echo, GRE). Diese können durch kleinere Anregungswinkel (als die 90° bzw. 180° der SE) weitere spezifische Bildgebungen ermöglichen, wie beispielsweise Diffusions- und Gefäßabbildungen (6) und zeichnen sich durch kurze Aufnahmezeiten und hohe Signalstärken bei kurzen TR aus (118). GRE-Sequenzen wiederum können inkohärenten (SSI) und kohärenten (SSC) Varianten zugeordnet werden. Zu den SSI zählt man die FLASH (Fast Low Angle Shot)-Sequenz, die auch die Grundlage für die 3D-MR-Diagnostik stellt (118) und T1-gewichtete Bilder erzeugt.

Die Kontrasteigenschaften der einzelnen Bildgebungssequenzen werden maßgeblich durch die unterschiedlichen Eigenschaften der zu untersuchenden Gewebearten bestimmt. Dementsprechend werden die Messparameter, wie oben bereits beschrieben, an die Gewebeart adjustiert, um den entstehenden Bildeindruck je nach Fragestellung anzupassen. Reicht dieser sog. intrinsische Kontrast nicht aus, um die gewünschte Wichtung zu erzielen, kann eine Magnetisierungspräparation (MP) vor die Sequenz geschaltet werden (118).

Zu diesen kontrasterhöhenden MP zählt die Methode der Inversion-Recovery-Magnetisierungspräparation (IR-MP), die zum Beispiel bei der Unterdrückung des Signals von Fettgewebe oder Liquor Anwendung findet. Ziel ist es, das Signal von

Gewebe mit sehr langen z.B. (Liquor) oder kurzen (z.B. Fett) T1-Relaxationszeiten zu unterdrücken, um einen besseren Gewebekontrast zu erzielen (3, 118). Die Namen der Sequenzen die mit IR-MP akquiriert werden, lassen sich am „IR“ im Namen erkennen, beispielsweise STIR, FLAIR oder TIRM (6, 118) und beschreiben klassischerweise die Vorschaltung einer IR-MP vor eine TSE-Sequenz. Die STIR-Sequenz (Short Tau Inversion Recovery, „Fettunterdrückung“, „Fettsuppression“) kommt z. B. bei der Diagnostik von Knochenmarksödemen zum Einsatz (3, 63, 118). Die FLAIR (Fluid Attenuated Inversion Recovery, sog. „Flüssigkeitsunterdrückung“) ermöglicht die Differenzierung von Liquor und Ödem im Hirngewebe (3). Auch zur Darstellung extrem T1-gewichteter Bilder, wie der Magnetization-Prepared-Rapid-Acquisition-Gradient-Echo-Sequenz (MPRAGE-Sequenz), wird eine IR-MP vorgeschaltet. Die MPRAGE ist eine 3D-Variante einer Turbo-Flash-Sequenz und zeichnet sich durch eine sehr gute Abgrenzung zwischen weißer und grauer Substanz im Hirngewebe bei gleichzeitig hoher Ortsauflösung aus (118, 121).

Ebenfalls zur Kontrasterhöhung kann die sog. Fettsättigung (FAT SAT, SE fs) genutzt werden: Ein HF-Impuls, dessen Mittenfrequenz mit der Frequenz des Fettgewebes übereinstimmt, wird vor die eigentliche Sequenz gelegt, um das Signal des Gewebes zu unterdrücken (3, 118).

Gefäße lassen sich in der MRT auf verschiedene Weise, mit oder ohne Kontrastmittel darstellen. Da die Gabe von Kontrastmittel bei Neonaten und Säuglingen nur unter strenger Indikationsstellung erfolgen darf und ggf. durch die Organunreife der Nieren gänzlich kontraindiziert ist (63), kommen in der neonatologischen MR-Diagnostik bevorzugt kontrastmittel-freie Gefäßdarstellungen zum Einsatz.

Die Time-of-flight-Angiografie (TOF) wird häufig zur Abbildung der großen Hirnarterien genutzt, die Phasenkontrastangiografie eignet sich besonders gut zur Darstellung von langsam fließendem venösem Blut (3, 63). Bei der TOF werden, ähnlich der oben genannten IR-Magnetisierungspräparation, der Sequenz vorgeschaltete Impulse genutzt, um sowohl das Signal der Gefäßwand als auch das des Blutes innerhalb des Gefäßes zu sättigen. Somit generiert nur „neu einfließendes“ Blut ein bildgebendes Signal (3, 63, 118). Die Phasenkontrastangiografie (PCA) stellt mit Hilfe von Gradientenechos die Flussgeschwindigkeit von Blut dar und eignet sich somit besonders gut für die Diagnostik von Hirnsinusthrombosen (6).

Die suszeptibilitätsgewichtete Bildgebung (SWI), welche sich zur Darstellung von intrazerebralen Blutungen und Kalzifikationen eignet, basiert auf der unterschiedlichen magnetischen Suszeptibilität („Magnetisierbarkeit“) verschiedener Gewebe. Diese kleinen Unterschiede führen zu Inhomogenitäten im Magnetfeld, welche in der Bilddarstellung zum Tragen kommen (3, 6, 122). Sauerstoffreiches Blut ist diamagnetischer als sauerstoffarmes Blut und kann somit in der „Blut-Sauerstoff-abhängigen-Bildgebung“ (blood-oxygen-level-dependent, BOLD) unterschieden werden. Üblicherweise werden die SWI-Datensätze zusätzlich in Form einer Minimalwertprojektion (mIP/MINIP) beurteilt: Hier können auch die Gefäßverläufe beurteilt werden (3, 13, 122).

Bei Verdacht auf eine Diffusionsstörung können diffusions-gewichtete Sequenzen (diffused-weighted images, DWI) gewählt werden. Grundlage der Bildentstehung ist die Darstellung der zufälligen Diffusion der Wassermoleküle im Gewebe (Brown´sche Molekularbewegung). Durch zwei hintereinander geschaltete Impulse werden die Spins der Protonen zuerst dephasiert und anschließend wieder in Phasenkohärenz gebracht. Findet zwischen den beiden Impulsen ein (physiologisches) Maß an Bewegung (= Diffusion) statt, hebt der zweite Impuls die Dephasierung nicht vollständig auf, was zu einem Signalabfall führt. Somit werden die Bereiche, in denen eine gestörte Diffusion vorliegt, signalreicher dargestellt. Diese T2-ähnlichen Sequenzen können als Rohdatensatz (DWI) betrachtet oder zu einer sog. ADC-Karte („apparent diffusion coefficient map“) zusammengefügt werden. Bei letzterer handelt es sich um eine Darstellung unter Herauskalkulation der T2-Elemente. So stellen sich diffusionseingeschränkte Bereiche in der ADC-Karte hypointens dar (2, 3, 13, 123).

3.6.4 Kontrastmittel

Mit der Entwicklung des ersten MR-Kontrastmittels (1988) eröffneten sich neue diagnostische Wege in der Darstellbarkeit von Läsionen mittels MRT. Durch die Gabe von entsprechendem Kontrastmittel kann der bereits sehr gute Weichteilkontrast noch weiter optimiert werden. Die verbesserte Kontrastierung beruht auf der magnetischen Wechselwirkung mit dem umgebenden Gewebe. Die Aufnahme des Kontrastmittels (KM) ist, je nach Gewebeart und -zustand, unterschiedlich. Zu betonen ist, dass die Wirkweise von MR-Kontrastmittel meist auf der Änderung der Relaxationszeit der Wasserstoffprotonen begründet ist und nicht, wie bei Ultraschall oder CT-Kontrastmittel, auf der direkten Darstellung des Kontrastmittels (118, 119).

Zu den am häufigsten verwendeten MR-Kontrastmitteln zählen die gadolinium-basierten KM (124, 125). Da in ionischer Form schwer toxisch, darf Gadolinium ausschließlich als Metallionenkomplex appliziert werden (118). Man unterscheidet lineare von makrozyklischen Kontrastmitteln, die sich in Ihrer chemischen Struktur und Stabilität unterscheiden. Bei den weniger stabilen linearen gadoliniumbasierten Kontrastmitteln (lgKM) wie z.B. Gadodiamid, ist das Gadolinium in einer offenen, kettenförmigen Ligandenstruktur eingebunden. Dies bedingt, dass das Gadolinium-Ion (Gd^{3+}) leichter freigesetzt werden kann. Makrozyklische gadoliniumbasierte Kontrastmittel (mgKM), z.B. Gadoteridol, sind stabiler, da das Gadolinium in einem ringförmigen (makrozyklischen) Liganden-Komplex gebunden ist (3).

LgKM werden im klinischen Alltag nur noch bei wenigen Indikationen eingesetzt: Intravenös applizierte Gadoxetsäure und Gadobensäure sind für die Untersuchung bei V.a. hepatische Pathologien zugelassen, zudem kann Gadopentetsäure intraartikulär eingesetzt werden. Die Zulassungen für die anderen lgKM ist in der EU seit 2018 ausgesetzt (126), da Studienergebnisse nahegelegt haben, dass es nach mehrfacher intravenöser Applikation von lgKM zu Gadoliniumablagerungen im Körper kommen kann (127, 128). Insbesondere die Fragestellung nach toxischen Effekten bei zerebralen Ablagerungen steht bis heute im Zentrum von Studien (129).

Zwar sind mgKM nach derzeitigem Kenntnisstand sicher in der Anwendung und haben nur ein geringes allergenes Potential (6, 130), jedoch führte die Debatte um neurotoxische Effekte unter anderem zu der Empfehlung, auch mgKM nur nach strenger Risiko-Nutzen Abwägung zu verabreichen (126). Bei Patientinnen und Patienten mit Niereninsuffizienz besteht zudem nach Gabe von gadoliniumhaltigen KM

die Gefahr einer nephrogenen systemischen Fibrose (NSF), die mit fibrotischen Veränderungen von Muskulatur, Gelenken, Nieren, Herz und Lunge einhergeht (118, 131).

Bei Neugeborenen und Säuglingen bis zu einem Jahr sollten gadoliniumhaltige Kontrastmittel nur nach strenger Indikationsstellung zum Einsatz kommen, da auf Grund der unreifen Nierenfunktion mit einer verzögerten Elimination zu rechnen ist (131).

4. Material und Methoden

4.1 Patientinnen und Patienten

Eingeschlossen in die Beobachtungen wurden alle Patientinnen und Patienten, die durch die Sektion Kinderradiologie der Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie an der UMM seit dem Jahr 2008 im MRT untersucht wurden und zum Zeitpunkt der Untersuchung das Alter von 4 Monaten nicht überschritten hatten. Auf die Prüfung durch eine Ethik-Kommission konnte auf Grund der retrospektiv erhobenen Daten verzichtet werden.

4.2 Erhobene Daten

Die Auswertung der MR-Sequenzen und der dazugehörigen Datensätze beinhaltete folgende erhobene Parameter:

- Alter des Kindes (in Tagen)
- Datum der Untersuchung
- Vorliegen von Frühgeburtlichkeit
- Geschlecht des Kindes
- Größe des Kindes
- Gewicht des Kindes
- Dauer der Untersuchung (in Minuten)
- Feldstärke des MRT-Geräts
- Indikation
- Untersuchte Körperregion
- Kontrastmittelgabe
- Untersuchungsmethode
- Anzahl der durchgeführten Sequenzen
- Anzahl der Sequenzen, die wiederholt wurden
- Grund für die Wiederholung der Sequenzen
- Ggf. Abbruch der Untersuchung
- Grund für den Abbruch der Untersuchung
- Ggf. Wiederholung der Untersuchung

Aus dem Alter des Kindes am Untersuchungstag und dem Datum der Untersuchung wurde das korrigierte Alter der Patientinnen und Patienten abgeleitet, um die ggf. bestehende Frühgeburtlichkeit in der statistischen Auswertung berücksichtigen zu können. Als Frühgeburtlichkeit definiert ist eine Geburt vor der vollendeten 37. Schwangerschaftswoche (36). Das korrigierte Alter berücksichtigt die Anzahl an Tagen, die das Kind zu früh geboren wurde. Es ergibt sich aus dem chronologischen Alter minus der Differenz zwischen dem errechneten und dem tatsächlichen Geburtstermin. Bei reifgeborenen Patientinnen und Patienten entspricht das korrigierte Alter dem chronologischen Alter.

Die Dauer der Untersuchung (in min) beschreibt den Zeitraum von der ersten bis zur letzten MR-Sequenz, inklusive ggf. wiederholten MR-Sequenzen. Später berechnete Analysen bzw. durch Bearbeitungsprogramme erstellte Sequenzanalysen wurden nicht in die Untersuchungsdauer mit einbezogen.

Die Indikation für die MR-Untersuchung wurde mit Hilfe der klinische(n) Fragestellung(en) definiert:

- Neurologische Fragestellung / Indikation
- Onkologische Fragestellung / Indikation
- Viszerale Fragestellung / Indikation
- Kardio-Vaskuläre Fragestellung / Indikation
- Sonstige Fragestellung / Indikation (z.B. Trauma)
- Mehrere Fragestellungen / Indikationen

Die untersuchte Körperregion wurde anhand der klinischen Fragestellung und des Abrechnungssystems erhoben und mit den tatsächlich generierten MR-Sequenzen abgeglichen. Unterschieden wurden:

- Schädel
- Hals/Thorax
- Abdomen
- Muskulo-Skelettal
- Ganzkörper-MRT/mehrere Regionen
- Sonstiges

Die Kontrastmittelgabe wurde anhand des Abrechnungssystems erhoben und mit den tatsächlich generierten MR-Sequenzen abgeglichen. Unterschieden wurden:

- Keine Kontrastmittelgabe
- Kontrastmittelgabe

Die Erhebung der Untersuchungsmethode wurde nach Abschluss der Erhebung der anderen Parameter durchgeführt. Unterschieden wurden:

- Kind in Sedierung bzw. Narkose untersucht
- Kind mit FAW-Methode untersucht

Die Anzahl der Sequenzen entspricht der tatsächlichen Anzahl der durchgeführten Sequenzen (inkl. aller wiederholten Sequenzen).

Die Anzahl der Sequenzwiederholungen wurde erhoben, ebenso der Grund für die Wiederholung.

- Eine Sequenz ein Mal wiederholt = 1 Wiederholung
- Eine Sequenz x Mal wiederholt = x Wiederholungen
- Mehrere Sequenzen insg. x Mal wiederholt = x Wiederholungen

Als Grund für die Wiederholung wurde angegeben:

- Anästhesiologische Gründe
- Technische Gründe
- Kind zu unruhig / Bewegungsartefakte
- Sonstige Gründe

Für den Fall eines Untersuchungsabbruchs wurde erhoben, warum die Untersuchung abgebrochen wurde:

- Anästhesiologische Gründe
- Technische Gründe
- Kind zu unruhig / Bewegungsartefakte
- Sonstige Gründe

Anästhesiologische Gründe, die zur Wiederholung einer oder mehrerer Sequenzen oder zum Abbruch der Untersuchung führten, waren beispielsweise kardiopulmonale Instabilität des Kindes oder die Dislokation des venösen Zugangs.

Technische Gründe, die zur Wiederholung einer oder mehrerer Sequenzen oder zum Abbruch der Untersuchung führten, waren Fehlfunktionen des MR-Geräts oder Fehleinstellungen (falsche Spule o.Ä.)

Bewegungsartefakte wurden durch den anwesenden Facharzt oder die anwesende Fachärztin direkt während der Untersuchung festgestellt und eine Wiederholung der Sequenz lag im Ermessen dieser.

Für den Fall eines Untersuchungsabbruchs wurde erhoben, ob die Untersuchung wiederholt wurde.

4.3 MRT

Bei der Untersuchung der Patientinnen und Patienten kamen drei verschiedene MRT-Geräte zum Einsatz: Der 1,5T-Scanner Magnetom Avanto® von Siemens, Erlangen, Deutschland, sowie die 3T-Scanner Magnetom Skyra® von Siemens bzw. Magnetom Vida® von Siemens. Die Zuordnung, welche Untersuchung in welchem Gerät durchgeführt wurde, war abhängig von der klinischen Fragestellung und den organisatorischen Gegebenheiten.

Entsprechend der Indikation und der untersuchten Körperregion wurden geeignete Spulen und Standardprotokolle verwendet.

4.4 Ablauf der MRT in Sedierung oder Allgemeinanästhesie

Die im Folgenden geschilderten Abläufe basieren auf den Empfehlungen der DGAI und den hauseigenen SOP der UMM.

Kinder, bei denen eine MR-Untersuchung in Sedierung oder Narkose geplant ist, sind entweder bereits stationär im Zentrum für Kinder- und Jugendmedizin (ZKJM) der UMM oder werden am Tag der Untersuchung ggf. auch tagesstationär aufgenommen. Neben der fristgerechten Aufklärung für die MRT muss auch eine Aufklärung der Eltern für die geplante Sedierung bzw. Narkose erfolgt sein. Dies geschieht durch ärztliches Personal aus dem Fachbereich der Anästhesiologie. Das Kind wird vom betreuenden Arzt oder der betreuenden Ärztin körperlich untersucht, um sicherzustellen, dass keine Kontraindikation für die medikamentöse Sedierung oder Narkose vorliegt.

Eine Nahrungskarenz ist bei elektiven Untersuchungen in Sedierung oder Narkose zwingend notwendig (70). Dies bedeutet, dass bis sechs Stunden vor Beginn der Sedierung oder Narkose feste Nahrung aufgenommen werden darf, bis vier Stunden vorher darf Kuhmilch oder Joghurt konsumiert werden. Gestillt werden darf das Kind bis drei Stunden vor der Untersuchung, Wasser darf bis eine Stunde vorher getrunken werden (70). Diese Vorgaben sind strikt einzuhalten und längere Nüchtern-Zeiten unbedingt zu vermeiden, da bei Patientinnen und Patienten mit längeren Nüchtern-Zeiten vermehrt Stress, schlechte Kooperation, Dehydratation und Blutdruckabfälle bei der Narkoseeinleitung beobachtet werden (71). Fehlende Nüchternheit geht mit einem deutlich erhöhten Aspirationsrisiko einher (77), somit kann eine elektive MRT-Untersuchung in Sedierung oder Narkose beim nicht-nüchternen Kind nicht durchgeführt werden.

Um die Narkosemedikamente applizieren zu können, wird ein intravenöser Zugang benötigt. Bei Patientinnen und Patienten, die bereits stationär aufgenommen sind, ist dieser häufig bereits vorhanden. Ambulant betreute Kinder erhalten diesen am Tag der Untersuchung direkt nach der Aufnahme. Der Transport des Kindes vom ZKJM zur MR-Untersuchung erfolgt entweder durch die Eltern oder durch Personal der UMM.

In der Abteilung für Radiologie wird das Kind von der Anästhesistin oder dem Anästhesisten und der Fachpflegekraft im Vorraum des MRT auf die Sedierung vorbereitet.

Ein für das MRT zugelassenes Monitoring (Expression MR400, Philips, Amsterdam, Niederlande) wird angeschlossen (SpO₂, ggf. RR-Messung, ggf. EKG) und der intravenöse Zugang erneut auf die korrekte intravenöse Lage und Durchgängigkeit überprüft. Ein spezieller pädiatrischer Narkose- bzw. Notfallwagen mit MRT-tauglichen Materialien wird vorgehalten, um möglichen Komplikationen sofort entgegenwirken zu können.

Der Beginn der Sedierung wird in enger Absprache mit dem radiologischen Fachpersonal durchgeführt, um die Sedierungszeit bzw. Narkosezeit möglichst gering zu halten. Wann immer möglich, wird die Sedierung bzw. Allgemeinanästhesie begonnen, während die Patientin oder der Patient sich auf dem Arm eines Elternteils befindet. Sobald das Kind schläft, wird es in den Untersuchungsraum getragen und die Eltern verlassen die Räumlichkeiten, um im Besucheraufenthaltsbereich der Radiologie zu warten.

Meist wird die Narkose als balancierte Anästhesie durchgeführt. Das bedeutet, dass zur Einleitung der Sedierung oder Narkose intravenös applizierbare Medikamente (hier Propofol) zur Anwendung kommen, die Aufrechterhaltung der Anästhesie wird durch Narkosegase (hier Sevofluran) sichergestellt (23). Bei Kontraindikationen gegen Narkosegase (z.B. Verdacht auf maligne Hyperthermie) wird die Allgemeinanästhesie als TIVA (Total intravenöse Anästhesie) geführt, es werden in diesem Fall ausschließlich intravenöse Medikamente verwendet (23).

Die Atemwegssicherung erfolgt bei Kindern mit geringem Körpergewicht (< 5 kg) und je nach sonstigen Risikofaktoren nach Einschätzung des behandelnden Anästhesisten bzw. der behandelnden Anästhesistin ggf. als endotracheale Intubation. Diese wird aus Kapazitäts- und Sicherheitsgründen durch ärztliches Personal bereits auf der Intensivstation der Kinderklinik durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, dass die

vulnerable Phase der Narkoseeinleitung unter optimalen räumlichen und personellen Voraussetzungen durchgeführt werden kann und die Kinder dann, in stabilem Zustand und unter Narkose, aus der Kinderklinik in die radiologische Abteilung gebracht werden.

Schwerere, kardiorespiratorisch stabile Kinder erhalten bei fehlenden Kontraindikationen meist eine Larynxmaske zur Atemwegssicherung. Diese wird nach Beginn der Allgemeinanästhesie direkt auf der Patientenliege des MRT eingelegt.

Diese Gewichtsgrenzen sind jedoch nur als Empfehlung anzusehen, die individuelle Entscheidung, welche Atemwegssicherung erfolgt und wo die Narkoseeinleitung stattfindet, obliegt der verantwortlichen Anästhesistin oder dem Anästhesisten.

Nach der Narkoseeinleitung wird das MR-geeignete Narkosegerät (Fabius MRI, Dräger, Lübeck, Deutschland) angeschlossen und die Beatmungsparameter sowie der Narkosegasfluss werden eingestellt. Das Kind wird durch das radiologische Fachpersonal entsprechend den Untersuchungsvorgaben gelagert und das Monitoring wird erneut überprüft.

Wird die Untersuchung in Sedierung und nicht in Allgemeinanästhesie durchgeführt, ist es möglich, dass die Sedierungstiefe zu gering ist und das Kind während der Untersuchung aufwacht und sich bewegt. Dann kann die Untersuchung kurz unterbrochen und die verabreichte Medikamentendosis erhöht werden, so dass die Sedierungstiefe wieder ausreicht. Bei einer Untersuchung in Allgemeinanästhesie ist der Patient oder die Patientin so tief sediert, dass Bewegungen üblicherweise nicht vorkommen (23).

Nach dem Untersuchungsgang wird die Larynxmaske entfernt und die Patientin oder der Patient in noch schlafendem Zustand aus dem Untersuchungsraum in den Vorraum verbracht. Dort verbleibt das Kind unter Beobachtung und Monitoring, bis die Wirkung der Sedierung oder Narkose ausreichend nachgelassen hat. Die Eltern werden so früh wie möglich hinzugerufen, um die Trennungszeit gering zu halten. So sind die Eltern meist bereits wieder im Raum, wenn das Kind aus der Sedierung oder Allgemeinanästhesie aufwacht.

Wenn die Wirkung der Narkotika ausreichend abgeklungen ist, kann das Kind durch den qualifizierten Transportdienst der UMM oder in Begleitung von Fachpersonal aus der Pädiatrie zurück in die Kinderklinik gebracht werden.

Die meisten Patientinnen und Patienten, die ambulant durchgeführte MRT-Untersuchungen benötigen, verlassen die Klinik noch am selben Tag.

Kommt es zu Narkosezwischenfällen und damit zum Abbruch der Untersuchung, kann es notwendig sein, den Aufenthalt zu verlängern.

Intubierte Patientinnen und Patienten verlassen die radiologische Fachabteilung auch in diesem Zustand und werden erst auf der Kinder-Intensivstation extubiert.

4.5 Ablauf der MRT mit der *Feed-and-wrap-Methode*

Die im Folgenden geschilderten Abläufe basieren auf den hauseigenen Standards der Sektion Kinderradiologie der Universitätsmedizin Mainz und beziehen sich auf MR-Untersuchungen von Neugeborenen und Säuglingen bis zum vollendeten vierten Lebensmonat.

Die Untersuchung eines Neugeborenen oder Säuglings im MRT in FAWM ist an der Universitätsmedizin Mainz (UMM) eine gut etablierte Untersuchungsmethode, welche während der Kernarbeitszeiten routinemäßig durchgeführt wird.

Für den Fall der Notfall-MR-Bildgebung, findet diese in Rücksprache mit den behandelnden Kinderradiologinnen und Kinderradiologen sowie Anästhesistinnen und Anästhesisten meist, oft auch auf Grund des Gesundheitszustands des Kindes, in Sedierung oder Allgemeinanästhesie statt.

Den Eltern wird im Vorfeld bei der allgemeinen Aufklärung für die MR-Untersuchung ihres Kindes der Ablaufplan für den Untersuchungstag erläutert. Die Patientinnen und Patienten sollen vor der Untersuchung möglichst ca. 3-4 Stunden wachgehalten werden und Nahrungskarenz einhalten, um ein physiologisches Hungergefühl zu induzieren. Diese Zeitspanne ist jedoch nicht als strikte Vorgabe, sondern als Empfehlung zu betrachten. Die Eltern bringen ihre Kinder, sofern möglich, in die radiologische Fachabteilung, wo sie in einem separaten Raum warten. Dort sollen die Kinder bis möglichst kurz vor der Untersuchung gefüttert werden. Ist die Anlage eines peripheren Venenkatheters zur Kontrastmittelgabe erforderlich, wird dieser durch Fachpersonal optimalerweise vor Beginn der Nahrungsaufnahme gelegt. Dadurch steht ausreichend Zeit vor Untersuchungsbeginn zur Verfügung, um das Kind durch das Füttern wieder zu beruhigen. Die Art der Fütterung (Stillen, Flaschennahrung, Sondennahrung) ist für die Methode und den Untersuchungsablauf nicht von Bedeutung. Im Idealfall schläft das Kind im Anschluss an die Nahrungsaufnahme ein und wird schlafend in den Untersuchungsraum verbracht. Dort wird die geplante Überwachung (SpO₂, ggf. EKG) und ein Gehörschutz („Mini Muffs“, Natus Medical Inc., Oakville, Kanada) etabliert. Je nach Größe und Alter des Kindes wird es in hierfür vorgehaltenen Baumwolltüchern gewickelt, was eine Bewegungsrestriktion und Vertiefung des Schlafes bewirken soll (30, 132).

An der UMM wird das Kind zusätzlich durch eine Vakuummatratze (MedVac VMR433X01N, Kohlbrat & Bunz GmbH, Radstadt, Österreich) immobilisiert, welche durch Absaugen der Luft im Inneren der Matratze fest wird, und zusätzliche Stabilität bietet. Sollte das Kind während der Vorbereitungen erwachen, kann durch erneutes Füttern oder das Anbieten eines mit 40%-iger Glukoselösung beträufelten Schnullers das erneute Einschlafen erreicht werden (31). In einigen Fällen, z. B. bei intensivmedizinisch betreuten Kindern, finden die Immobilisationsmaßnahmen sowie der Anschluss des Monitorings bereits im Vorbereitungsraum statt (Abb. 1).



Abbildung 1:

Immobilisation eines Kindes im MRT-Vorbereitungsraum. Das Kind wird aus dem Inkubator gehoben und auf die Vakuummatratze gelegt, MRT-kompatibles Monitoring wird etabliert (a) und ein Schnuller (b, roter Pfeil) wird verwendet. Nachdem das Vakuum angelegt wurde, wird das Kind in den MRT-Scanner transferiert (c).

Quelle: (1)

Der Untersuchungsablauf bzw. die Reihenfolge der MR-Sequenzen wird vom betreuenden Facharzt oder der betreuenden Fachärztin, die auch die Vorbereitung des Kindes vornimmt oder überwacht, im Vorfeld festgelegt. Berücksichtigt werden die zu priorisierenden Sequenzen und die zu erwartende Geräuscentwicklung. So kann

sichergestellt werden, dass die für die klinische Fragestellung besonders relevanten Sequenzen zu Beginn realisiert werden, während das Kind noch tief schläft.

Geräuschintensive Sequenzen werden, soweit möglich, zum Ende des Untersuchungsgangs durchgeführt. Sollte das Kind sich während einer Sequenz zu sehr bewegen oder aufwachen, kann durch die Anwesenheit des Facharztes bzw. der Fachärztin vor Ort direkt beurteilt werden, ob die Bildqualität noch diagnostisch ausreichend ist oder die Sequenz wiederholt werden muss. Nach Beendigung der Untersuchung wird das Kind nach Entfernung von Vakuummatratze und Monitoring wieder der Betreuungsperson übergeben und kann ggf. sofort nach Hause entlassen werden.

4.6 Bild- und Qualitätsanalyse

Die Auswertung der akquirierten MR-Sequenzen und der vorliegenden Patientendaten aus dem Abrechnungsprogramm wurde retrospektiv im Konsens mit einem Facharzt für Radiologie mit Schwerpunkt Kinderradiologie vorgenommen.

Initial erfolgte die qualitative Auswertung der Bildsequenzen der eingeschlossenen MR-Untersuchungen ohne Kenntnis weiterer Untersuchungsdetails anhand einer vordefinierten semiquantitativen 4-Punkte-Skala, die die einzelnen Sequenzen in Abhängigkeit von Bewegungsartefakten gruppiert:

- Bewertung 4: sehr gute Bildqualität, keine relevanten Bewegungsartefakte
- Bewertung 3: gute Bildqualität, vereinzelte Bewegungsartefakte, welche den diagnostischen Bildeindruck nur minimal verringern
- Bewertung 2: annehmbare Bildqualität mit teils erheblichen Bewegungsartefakten, aber geeignet zur Beantwortung der klinischen Fragestellung
- Bewertung 1: schlechte Bildqualität, keine diagnostische Verwertbarkeit

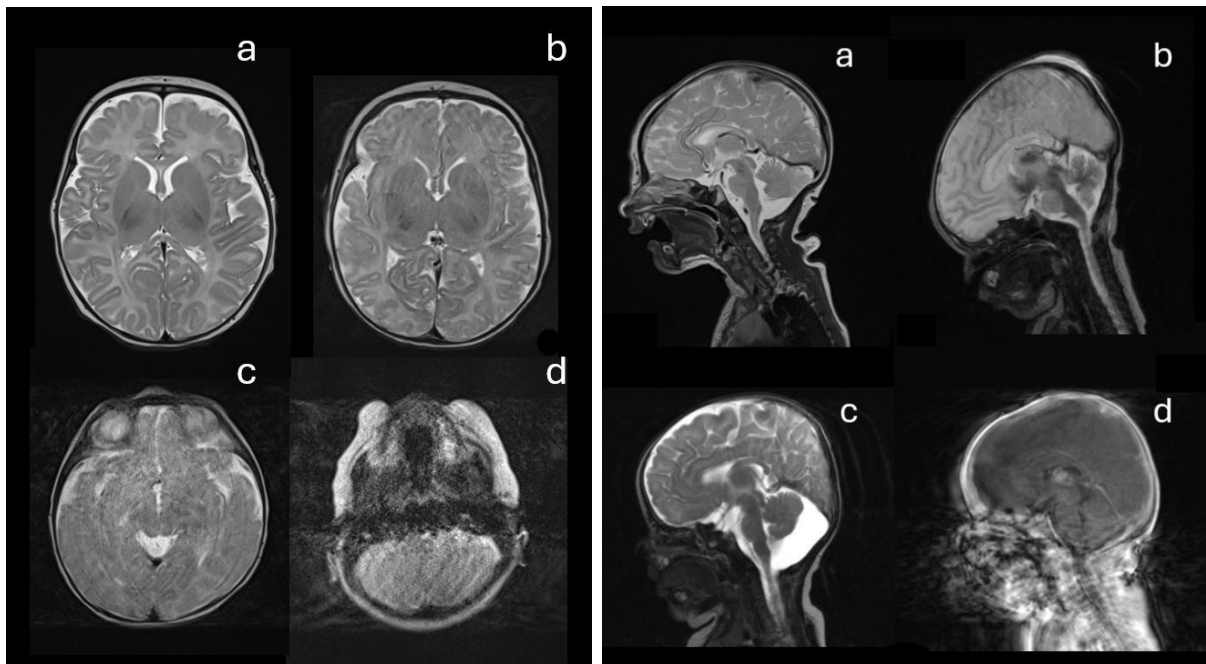


Abbildung 2 (links, transversale Schnitfführung) und 3 (rechts, sagittale Schnitfführung):

Bewertungsskala qualitative Sequenzbewertung in Transversal- und Sagittalebene; Bewertung 4: sehr gute Bildqualität, keine relevanten Bewegungsartefakte (a), Bewertung 3: gute Bildqualität, vereinzelte Bewegungsartefakte, welche den diagnostischen Bildeindruck nur minimal verringern (b), Bewertung 2: annehmbare Bildqualität mit teils erheblichen Bewegungsartefakten, aber geeignet zur Beantwortung der klinischen Fragestellung (c), Bewertung 1: schlechte Bildqualität, keine diagnostische Verwertbarkeit (d)

Für jede Untersuchung wurden Mittelwert und Standardabweichung der Sequenzbewertung berechnet. Dies wurde als Gesamtbewertung der Untersuchung dokumentiert.

4.7 Statistik

Die statistischen Auswertungen wurden mit SPSS Statistics (*Statistical Package for the Social Sciences*, Version 23 Sciences, Version 23.0; IBM, Armonk, NY, USA) bzw. R (Version 4.3) berechnet.

Eine deskriptive Analyse wurde für alle erfassten klinischen und radiologischen Parameter durchgeführt.

Gruppenunterschiede wurden mithilfe des exakten Fisher-Tests oder des Mann-Whitney-U-Tests ausgewertet.

Zur Korrelation der Sequenzqualität mit dem korrigierten Alter wurde Spearmans Rho berechnet.

Ein p-Wert $< 0,05$ wurde in allen statistischen Analysen als signifikant definiert. Da es sich um explorative Analysen handelt, wurden die dargestellten p-Werte deskriptiv interpretiert.

Zusätzlich wurden logistische- und Poisson-Regressionsmodelle eingesetzt, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens diagnostischer Einschränkungen in einer Sequenz sowie die Wahrscheinlichkeit einer Sequenzwiederholung zu analysieren. Untersuchungen, die vorzeitig abgebrochen wurden, wurden von diesen Analysen ausgeschlossen.

Zudem wurde ein negativ binomiales Regereessionsmodell angepasst, um das Inzidenzratenverhältnis (IRR) unter Berücksichtigung von Alter, Geschlecht und Körpergewicht, untersuchter Körperregion und der verwendeten Feldstärke zu schätzen.

Einige Kinder wurden im festgelegten Altersbereich mehrfach untersucht. Da keine dieser Untersuchungen am selben Tag erfolgte, wurden sie als stochastisch unabhängig betrachtet.

5. Ergebnisse

5.1 Charakterisierung des Patientenkollektivs

In die Studie eingeschlossen wurden im Zeitraum zwischen Juli 2009 und August 2022 insgesamt 382 Patientinnen und Patienten, die den oben genannten Einschlusskriterien entsprachen. 345 der Patientinnen und Patienten wurden während des Beobachtungszeitraums einmal untersucht, 26 Kinder wurden zweimal, neun Kinder dreimal und zwei Kinder viermal untersucht. Keiner der Patientinnen und Patienten wurde am selben Tag zweimal untersucht. Häufige Gründe für erneute Untersuchungen waren onkologische Fragestellungen (z.B. Re-Staging) und Verlaufskontrollen. In 14 Fällen erfolgte ein Wechsel der Untersuchungsmethode von FAWM auf Sedierung oder Narkose, in 5 Fällen von Sedierung bzw. Narkose auf FAWM. 18 Kinder (4 FAWM, 14 Sedierung/Narkose) wurden auf die gleiche Art wie initial untersucht.

Somit ergaben sich 432 durchgeführte MRT-Untersuchungen, in denen insgesamt 3691 Sequenzen akquiriert wurden.

Von den 432 insgesamt durchgeführten Untersuchungen wurden 243 Untersuchungen (56,3%) bei 210 Patientinnen und Patienten in Sedierung oder Narkose durchgeführt (SON-Kohorte). 189 Untersuchungen (43,8%) bei 172 Patientinnen und Patienten wurden in FAWM durchgeführt (FAW-Kohorte).

Tabelle 1 zeigt die Verteilung von Geschlecht, Alter, Gewicht, Körpergröße und Frühgeburtlichkeit in den jeweiligen Kohorten:

	SON-Kohorte (n=243)	FAW-Kohorte (n=189)	Gesamtkohorte (n= 432)	p-Wert
Geschlecht				
Weiblich	131 (54%)	183 (44%)	214 (50%)	0,042
Männlich	112 (46%)	106 (56%)	218 (50%)	
Alter (in Tagen)				
Mittelwert ± Standardabweichung	59 ± 38	27 ± 26	45 ± 37	< 0,001
Korrigiertes Alter (in Tagen) *				
Mittelwert ± Standardabweichung	51 ± 40	19 ± 28	37 ± 39	< 0,001
Frühgeburtslichkeit				
ja	43 (18%)	33 (17%)	76 (18%)	> 0,999
nein	200 (82%)	156 (83%)	356 (82%)	
Körpergröße (in cm)				
Mittelwert ± Standardabweichung	55 ± 5,5	52 ± 4,6	54 ± 5,3	< 0,001
Betreuung auf Normalstation**	175 (72%)	133 (70%)	308 (71%)	0,748
Betreuung auf Intensivstation**	68 (28%)	56 (30%)	124 (29%)	
Körpergewicht (in kg)				
Mittelwert ± Standardabweichung	4,5 ± 1,3	3,7 ± 1,1	4,1 ± 1,3	< 0,001
Minimum	2,1	1,6		
Maximum	9,0	9,3		
≤ 3kg KG	31 (13%)	52 (28%)	83 (19%)	
> 3kg KG	212 (87%)	137 (72%)	349 (81%)	

Tabelle 1: Patientencharakteristika, die Prozentwerte wurden gerundet

* Das korrigierte Alter beschreibt die Anzahl an Tagen, die das Kind zu früh geboren wurde. Es ergibt sich aus dem chronologischen Alter minus der Differenz zwischen dem errechneten und dem tatsächlichen Geburtstermin. Bei reifgeborenen Patientinnen und Patienten entspricht das korrigierte Alter dem chronologischen Alter.

** zum Zeitpunkt der Untersuchung

Es zeigt sich, dass Patientinnen und Patienten der FAW-Kohorte ein signifikant geringeres Alter, eine geringere Körpergröße und ein niedrigeres Gewicht aufwiesen. Zudem war die Anzahl der Patienten mit einem Gewicht von ≤ 3 kg in der FAW-Gruppe signifikant ($p < 0,001$) höher.

Das Jüngste in die Studie eingeschlossene Kind wurde bei einem korrigierten Alter analog der SSW 33+1 untersucht. Bei dieser Patientin konnte an ihrem 8. Lebenstag bei einem Körpergewicht von ca. 1,8 kg erfolgreich eine MRT-Untersuchung in FAWM durchgeführt werden.

5.2 Erfolgsraten der MRT

Als erfolgreich durchgeführte MRT wurde eine Untersuchung definiert, die nicht abgebrochen werden musste, was in 97% der Fälle ($n=420$) in der Gesamtkohorte vorlag.

In der SON-Kohorte konnten in 242 der 243 Fälle Sequenzen akquiriert werden, lediglich eine Untersuchung musste bereits vor der Bildaufzeichnung abgebrochen werden. Insgesamt mussten drei Untersuchungen abgebrochen werden:

Ein Kind war bereits vor Beginn der Bildaufzeichnung kardiorespiratorisch instabil, so dass lediglich Orientierungssequenzen aufgenommen werden konnten. Die Untersuchung des Kindes wurde wenige Tage später ebenfalls in Sedierung wiederholt, jedoch verschlechterte sich der Zustand des Kindes während der Untersuchung erneut und auch diese Untersuchung musste abgebrochen werden. Auf eine weitere Wiederholung wurde auf Grund der in der zweiten Untersuchung bereits aufgenommenen Sequenzen verzichtet.

Bei der dritten Untersuchung dieser Kohorte, welche abgebrochen werden musste, dislozierte der venöse Zugang, so dass die sedierenden Medikamente nicht adäquat verabreicht werden konnten. Diese Untersuchung wurde wenige Tage später erfolgreich wiederholt. Alle Patientinnen und Patienten der SON-Kohorte, bei denen Untersuchungen abgebrochen werden mussten, waren reifgeborene Kinder.

Die Rate vorzeitig beendeter Untersuchungen in der FAW-Kohorte betrug 5% ($n = 9$). Drei Untersuchungen wurden bereits vor Beginn der Bildaufzeichnung aufgrund von extremer Patientenunruhe abgebrochen, so dass keine Bilder ausgewertet werden konnten.

In vier anderen Fällen wurde eine Wiederholung ohne oder mit Sedierung durch den betreuenden Radiologen oder die betreuende Radiologin empfohlen. Zwei dieser Untersuchungen wurden in Narkose wiederholt, die anderen wurden aufgrund fehlender Einverständniserklärung der Eltern (n = 1) bzw. Rücknahme der Indikation im interdisziplinären Konsens (n = 4) nicht wiederholt.

In zwei Fällen konnte die klinische Fragestellung trotz Abbruch der Untersuchung beantwortet werden und eine Wiederholung der Untersuchung war nicht notwendig.

Es ist hervorzuheben, dass die Abbruchrate bei Untersuchungen der besonders vulnerablen Gruppe der Frühgeborenen in beiden Kohorten unter 7 % lag (SON 0 %, FAW 6,1 %). Sechs der Untersuchungen der FAW-Kohorte, die abgebrochen werden mussten, waren reifgeborene Kinder, zwei waren Frühgeborene.

Somit konnte in der Gesamtkohorte in insgesamt 424 Fällen die klinische Fragestellung beantwortet werden, obwohl die Untersuchung ggf. vorzeitig beendet wurde.

Tabelle 2 zeigt die erfolgreiche Beantwortung der klinischen Fragestellung:

Beantwortung klinische Fragestellung Gesamtkohorte	SON-Kohorte (n=243)	FAW-Kohorte (n=189)
Ja	99,6% (n=242)	96,3% (n=182)
Nein	0,4% (n=1)	3,7% (n=7)

Beantwortung klinische Fragestellung Reifgeborene	SON-Kohorte (n=200)	FAW-Kohorte (n=156)
Ja	99,5% (n=199)	96,2% (n=150)
Nein	0,5% (n=1)	3,8% (n=6)

Beantwortung klinische Fragestellung Frühgeborene	SON-Kohorte (n=43)	FAW-Kohorte (n=33)
Ja	100% (n=43)	97% (n=32)
Nein	-	3% (n=1)

Tabelle 2: Beantwortung der klinischen Fragestellung verschiedener Subgruppen

Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den in FAW durchgeführten Untersuchungen zwischen Reifgeborenen und Frühgeborenen ($p=1,0$). Ebenfalls zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen Frühgeborenen der SON- und der FAW-Kohorte ($p=0,427$).

5.3 Unterschiede zwischen SON- und FAW-Kohorte

Die Tabellen 3 und 4 zeigen die MRT-bezogenen Parameter der SON- und der FAW-Kohorte, sowie deren Unterschiede:

	SON-Kohorte (n=243)	FAW-Kohorte (n=189)	Gesamtkohorte (n= 432)	p-Wert
Untersuchungsdauer (in min)	39 ± 14 (n=243)	32 ± 12 (n=189)	36 ± 14 (n=432)	<0,001
Feldstärke				
1,5T	39% (n=95)	34% (n=65)	37% (n=160)	0,366
3T	61% (n=148)	66% (n=124)	63% (n=272)	
Kontrastmittelgabe				
Nein	70% (n=169)	94% (n=177)	82% (n=346)	
Ja	30% (n=74)	6% (n=12)	20% (n=86)	
Untersuchte Körperregion				
Schädel	57% (n=138)	65% (n=122)	60% (n=260)	0,096
Hals/Thorax	2% (n=5)	3% (n=6)	2% (n=11)	
Abdomen	12% (n=30)	15% (n=28)	13% (n=58)	
Muskuloskeletal	8% (n=19)	4% (n=8)	6% (n=27)	
Ganzkörper-Scan/mehrere Regionen*	21% (n=51)	14% (n=25)	18% (n=76)	

Tabelle 3: Vergleich der MRT-assoziierten Daten zwischen der SON- und der FAW-Kohorte

Die Untersuchungsdauer ist als Mittelwert ± Standardabweichung angegeben;

absolute Patientenzahlen in Klammern (n)

*Ganzkörper (n = 35), Kopf und Wirbelsäule (n = 17), Kopf und Hals/Thorax (n = 6), Abdomen und Wirbelsäule (n = 6), Kopf und Abdomen (n = 4), Hals/Thorax/Abdomen (n = 4), Schädel und muskuloskelettales System (n = 3), Abdomen und muskuloskelettales System (n = 12)

	SON-Kohorte (n=243)	FAW-Kohorte (n=189)	Gesamtkohorte (n= 432)	p-Wert
Indikation				
Neurologisch	54% (n=132)	62% (n=117)	58% (n=249)	0,086
Onkologisch	17% (n=42)	10% (n=19)	14% (n=61)	
Viszeral	6% (n=15)	10% (n=19)	8% (n=34)	
Kardio-Vaskulär	(n=1)	1% (n=2)	1% (n=3)	
Andere	7% (n=17)	6% (n=12)	7% (n=29)	
Mehrere	15% (n=36)	11% (n=20)	13% (n=56)	
Gesamtzahl Sequenzen	8,9 ± 3	8,1 ± 2,4	8,5 ± 2,8	0,023
Wiederholte Sequenzen	0,13 ± 0,43	0,24 ± 0,56	0,18 ± 0,49	0,007
Grund Sequenzwiederholung				
Technisch	1% (n=3)	3% (n=6)	2% (n=9)	
Bewegungsartefakte	7% (n=17)	15% (n=28)	10% (n=45)	
Andere	1% (n=3)	1% (n=1)	1% (n=4)	
Sequenzen mit diagnostischen Limitationen (N)*	0,07 ± 0,31	0,49 ± 0,96	0,25 ± 0,59	<0,001
IRR (=N/t) (t= Gesamtzahl Sequenzen)	0,0077 ± 0,0033	0,07 ± 0,16	0,035 ± 0,07	<0,001
Gesamtbewertung Untersuchung	3,96 ± 0,11	3,7 ± 0,43	3,9 ± 0,32	<0,001

Tabelle 4: Vergleich der MRT-assoziierten Daten zwischen der SON- und der FAW-Kohorte

Alle quantitativen Parameter sind als Mittelwert ± Standardabweichung angegeben; absolute Patientenzahlen in Klammern (n); IRR = „incidence rate ratio“, Inzidenzratenverhältnis

* Definiert als Qualitätswert unter 3

In allen Kohorten stellte der Schädel die am häufigsten untersuchte Körperregion dar, wobei zwischen der SON- und der FAW-Kohorte kein signifikanter Unterschied bestand (SON: 57 %, FAW: 65 %). Analog war die häufigste Indikation in beiden Kohorten neurologisch (SON: 54 %, FAW: 62 %). Untersuchungen in dieser Altersklasse wurden insbesondere zur Detektion intrazerebraler Blutungen, bei Verdacht auf perinatale Asphyxie oder kongenitale Fehlbildungen durchgeführt.

Am zweithäufigsten wurden mehrere Körperregionen untersucht oder ein Ganzkörper-Scan ausgeführt. Dies fand etwas häufiger unter Sedierung oder Narkose statt (SON 21%, FAW 14%). Onkologische Fragestellungen, wie beispielsweise der Verdacht auf ein Neuroblastom, stellten in der Gesamtkohorte die zweithäufigste Indikation dar. In der FAW-Kohorte wurde signifikant weniger häufig Kontrastmittel verabreicht (SON 30%, FAW 6%, $p < 0,001$).

Unter FAWM war die Gesamtuntersuchungszeit signifikant kürzer als in der SON-Kohorte (Durchschnitt 32 min versus 39 min, $p < 0,001$). Dies konnte in einer Subgruppenanalyse ebenfalls für Schädel, Abdominal- und Ganzkörperuntersuchungen festgestellt werden (Tabelle 5).

Untersuchungsdauer (in min)	SON- Kohorte (n=243)	FAW- Kohorte (n=189)	Gesamtkohorte (n= 432)	p- Wert
Alle Patientinnen und Patienten	39 ± 14 (n=243)	32 ± 12 (n=189)	36 ± 14 (n=432)	<0,001
Mit Kontrastmittelgabe	44 ± 15 (n=74)	42 ± 17 (n=12)	44 ± 15 (n=86)	0,995
Ohne Kontrastmittelgabe	36 ± 13 (n=169)	31 ± 11 (n=177)	34 ± 13 (n=346)	<0,001
Schädel	38 ± 10 (n=138)	21 ± 9 (n=122)	35 ± 10 (n=260)	<0,001
Hals/Thorax	37 ± 7 (n=5)	33 ± 21 (n=6)	34 ± 15 (n=11)	0,429
Abdomen	31 ± 12 (n=30)	22 ± 9 (n=28)	26 ± 11 (n=58)	0,001
Muskuloskeletal	28 ± 12 (n=19)	30 ± 16 (n=8)	28 ± 13 (n=27)	0,897
Ganzkörper-Scan/ mehrere Regionen	50 ± 19 (n=51)	40 ± 15 (n=25)	47 ± 18 (n=76)	0,043

Tabelle 5: Unterschiede in der Gesamtuntersuchungsdauer, Analyse verschiedener Untergruppen basierend auf der Verwendung von Kontrastmittel und Körperregion.

Alle Werte sind als Mittelwert ± Standardabweichung angegeben; Absolute Untersuchungszahlen in Klammern (n)

Die Qualität der 2160 aufgenommenen Einzelsequenzen in der SON-Gruppe wurde in 97,4% (n = 2104) der Fälle mit „Exzellente“ (4 Punkte) bewertet, in der FAW-Kohorte waren es 82,6% (n = 1265). Die durchschnittliche Gesamtbewertung der in FAWM durchgeführten Untersuchungen lag nur wenig unter denen in Sedierung oder Narkose (Mittelwert ± Standardabweichung [SD]: SON 3,96 ± 0,11 versus FAW 3,7 ± 0,43, p < 0,001).

Die Qualität der Einzelsequenzen variierte nicht signifikant zwischen frühgeborenen und reifgeborenen Kindern (Mittelwert ± SD: 3,8 ± 0,48 versus 3,7 ± 0,42; p = 0,108). In Sedierung oder Narkose akquirierte Sequenzen hatten signifikant weniger diagnostische Einschränkungen, definiert als Bewertung unter drei Punkten auf der semiquantitativen Bewertungsskala (Mittelwert ± SD: SON 0,07 ± 0,31, FAW 0,49 ±

0,96, $p < 0,001$) und eine niedrigere IRR (Mittelwert $\pm$ SD: SON $0,0077 \pm 0,0033$, FAW $0,07 \pm 0,16$, $p < 0,001$).

Das multivariate negative binomiale Regressionsmodell ergab, dass das Risiko, eine Sequenz mit diagnostischen Einschränkungen zu erhalten, in FAWM etwa 8- bis 9-fach höher ist. Dies gilt insbesondere für Untersuchungen des Schädels (im Vergleich zu Ganzkörper- oder Abdominaluntersuchungen).

Wir stellten zudem eine signifikante Abnahme der Bildqualität ($\rho = -0,18$; $p = 0,013$) mit zunehmendem korrigiertem Alter, sowie einen signifikanten Anstieg der IRR in der FAW-Kohorte fest (Tabelle 6).

Prädiktor	IRR (95% Konfidenzintervall)	p-Wert
Technik		
FAW versus SON	8,74 (6,73 – 11,37)	< 0,001
Korrigiertes Alter (in Tagen)		
	1,006 (1 – 1,012)	0,048
Geschlecht		
Weiblich versus Männlich	0,95 (0,76 – 1,29)	0,948
Gewicht (in kg)		
	0,86 (0,73 – 1,02)	0,086
Untersuchte Körperregion		
Hals/Thorax versus Schädel	1,91 (0,89 – 4,07)	0,096
Abdomen versus Schädel	0,46 (0,031 – 0,68)	< 0,001
Muskuloskeletal versus Schädel	0,63 (0,35 – 1,15)	0,132
Ganzkörper-Scan/mehrere Regionen versus Schädel	0,33 (0,22 – 0,48)	< 0,001
Feldstärke		
1,5T versus 3T	1,23 (0,94 – 1,6)	0,129

Tabelle 6: Geschätzte Inzidenzratenverhältnisse

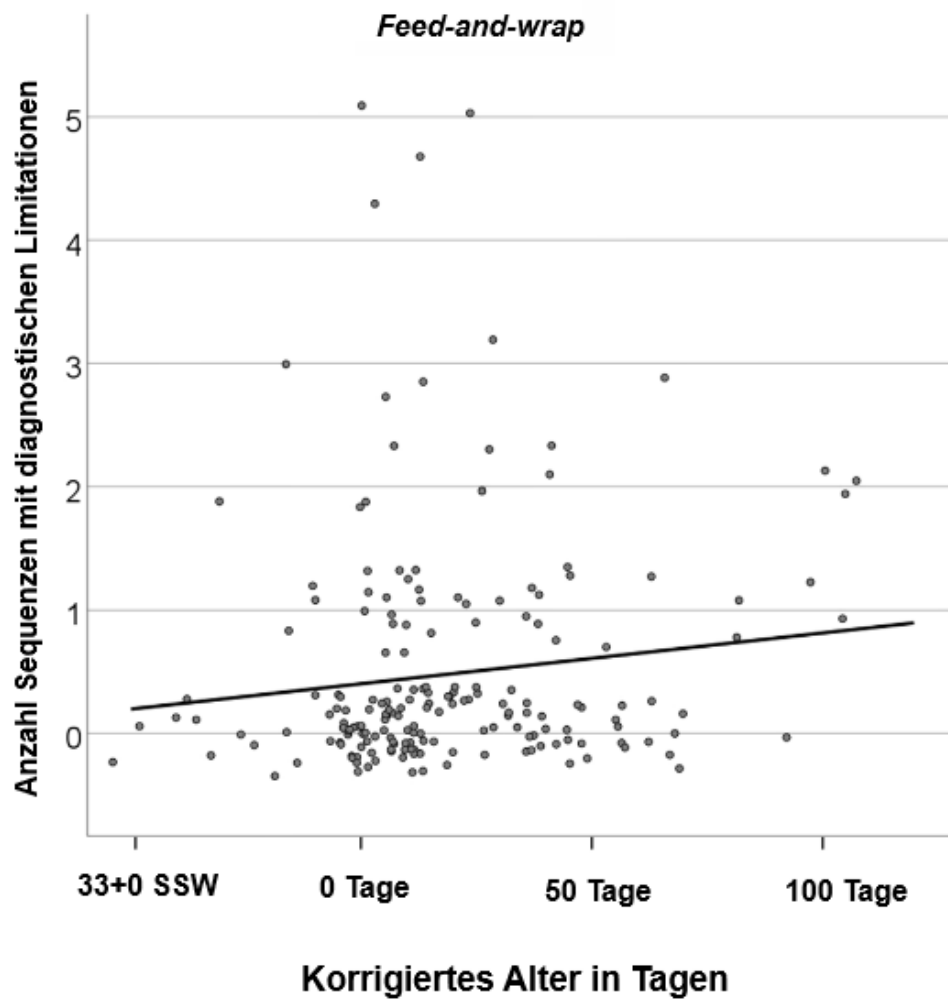


Abbildung 4: Anzahl der Sequenzen mit diagnostischen Einschränkungen in Abhängigkeit des korrigierten Alters in der „Feed-and-Wrap“-Gruppe. Zur besseren Visualisierung (Vermeidung überlappender Datenpunkte) wurde eine Jitter-Technik angewendet.

Die Anzahl an wiederholten Sequenzen war in der FAW-Kohorte signifikant höher (Mittelwert $\pm$ SD: SON $0,13 \pm 0,43$, FAW $0,24 \pm 0,56$, p 0,007), jedoch war die durchschnittliche Anzahl an aufgenommenen Sequenzen pro Untersuchung in der FAW-Kohorte geringer (Mittelwert $\pm$ SD: SON $8,9 \pm 3$, FAW $8,1 \pm 2,4$).

In der SON-Kohorte mussten in 23 der 243 Untersuchungen einzelne Sequenzen wiederholt werden (9,5%). Meist (6,6%, n= 16) wurde eine Sequenz pro Untersuchung wiederholt, nur selten waren es zwei (2,9%, n = 7) oder mehr Sequenzen. Der häufigste Grund (7%, n = 17) für die Wiederholung einzelner Sequenzen war ein zu unruhiges Kind. Technische Schwierigkeiten bzw. andere Gründe, die nicht durch ein zu unruhiges Kind oder technische Probleme bedingt waren, wurden in 2,5% der Fälle (n = 6) beobachtet.

In der FAW-Kohorte war eine Wiederholung einzelner Sequenzen bei 35 von 189 Untersuchungen (18,5%) erforderlich. Die Neuaufnahme einer Sequenz pro Untersuchung war in 13,2% (n = 25) der Untersuchungen notwendig, in 10 (5,3%) Fällen wurde mehr als eine Sequenz wiederholt. In der Mehrheit der Fälle (15%, n = 28) war ein zu unruhiges Kind und dementsprechende Bewegungsartefakte der Grund für eine Sequenzwiederholung.

Technische Schwierigkeiten bzw. andere Gründe, die nicht durch ein zu unruhiges Kind oder technische Probleme bedingt waren, wurden in 3,7% der Fälle (n = 7) beobachtet. Es gab keine anästhesiologischen Gründe für eine Sequenzwiederholung in der FAW-Kohorte.

	SON-Kohorte (n=243)	FAW-Kohorte (n=189)	Gesamtkohorte (n=432)
Abbruch der Untersuchung			
Nein	99% (n=240)	96% (n=181)	97% (n=421)
Ja	1% (n=3)	4% (n=8)	3% (n=11)
Grund Untersuchungsabbruch			
Anästhesiologisch	(n=2)	-	(n=2)
Bewegungsartefakte	-	(n=8)	(n=8)
Andere	(n=1)	-	(n=1)

Tabelle 7: Häufigkeit der Abbruchrate in SON-, FAW- und Gesamtkohorte

5.4 Beispiele für erfolgreiche Untersuchungen mittels *Feed-and-wrap-Methode*

Beispiel 1

Bei einem reifen, männlichen Neugeborenen bestand auf Grundlage einer vorangegangenen sonographischen Routineuntersuchung der dringende Verdacht auf eine linksseitige Thalamusblutung. Die MRT erfolgte am 8. Lebenstag in insgesamt stabilem Allgemeinzustand und bei durchgehend kardio-respiratorisch stabilem Kind.

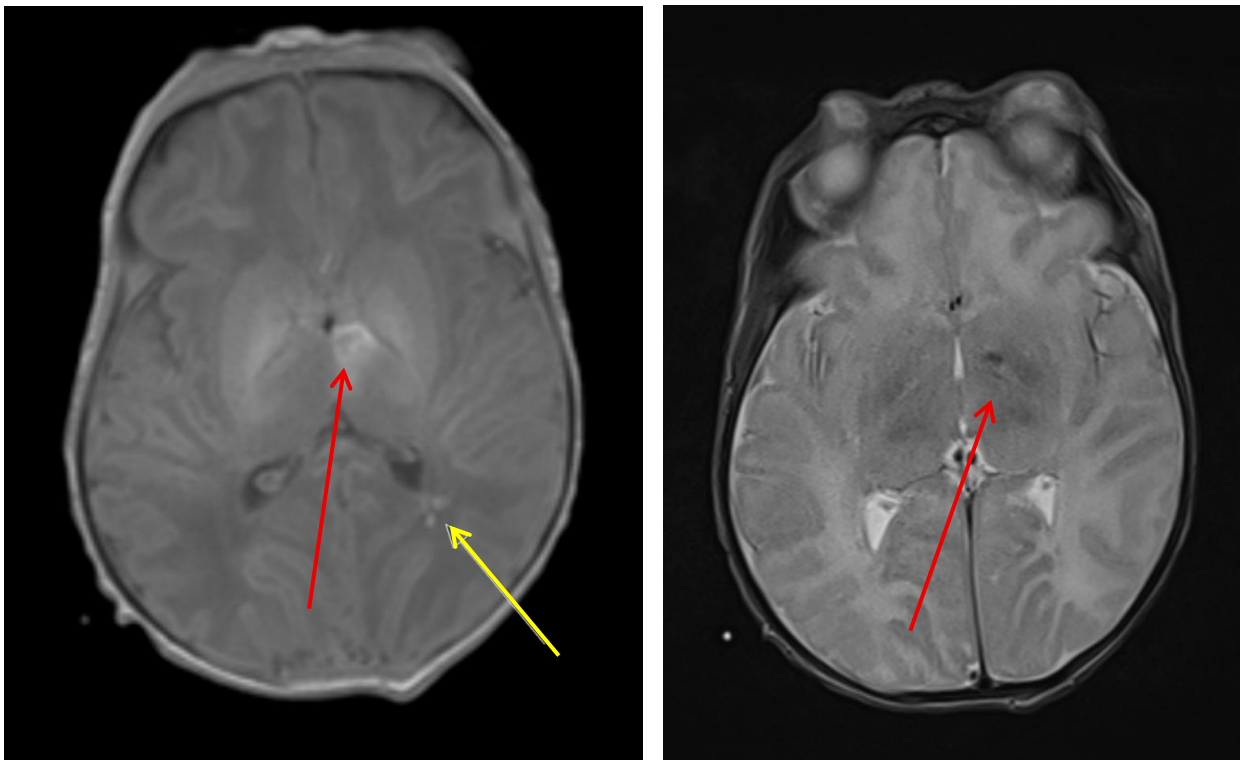


Abbildung 5 (links): T1-gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 6 (rechts): T2-gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Befund:

Es zeigt sich eine Thalamusblutung links ohne Hinweis auf eine ischämische Genese (roter Pfeil) sowie punktförmige Einblutungen im peritrigonalen Marklager, links mehr als rechts (gelber Pfeil).

Beispiel 2

Bei einem männlichen Frühgeborenen (32 + 0 SSW) mit perinataler Azidose, Panzytopenie sowie Verdacht auf eine hypoxisch-ischämische Enzephalopathie unklarer Genese und ausgedehnten linksseitigen cerebralen Infarkten erfolgte am 59. Lebenstag – entsprechend dem korrigierten 9. Lebenstag – eine MRT-Verlaufskontrolle in kardio-respiratorisch stabilem Zustand.

Die initiale Bildgebung war etwa neun Wochen zuvor, am 9. Lebenstag bei einem korrigierten Alter von -41 Tagen, in Sedierung durchgeführt worden, zu einem Zeitpunkt, an dem der Patient aufgrund eines ausgeprägten Lungenödems und eines peripartal entstandenen, erheblichen Blutverlustes mit nachfolgendem hämorrhagischem Schock intubiert und beatmet, sowie katecholaminpflichtig in einem kritischen Allgemeinzustand war.

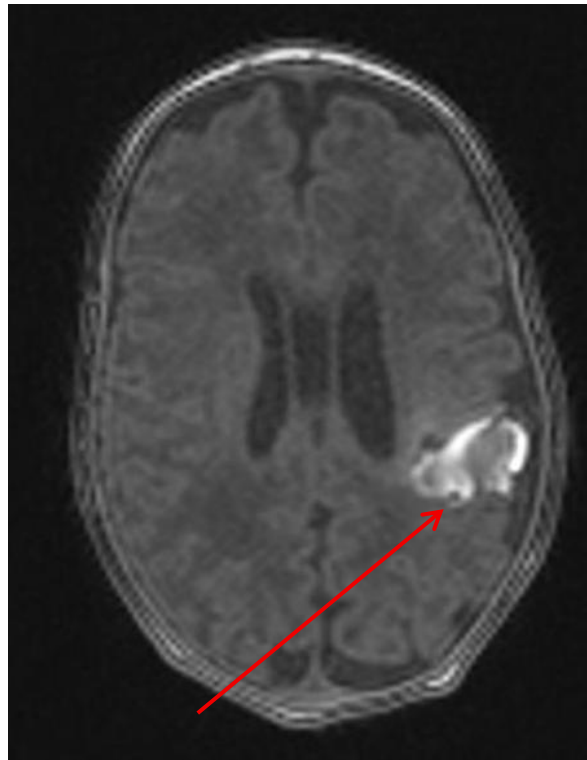
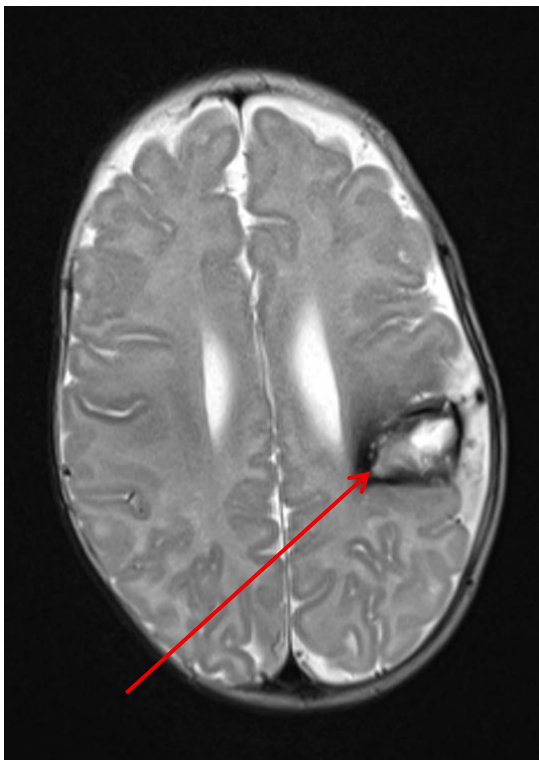


Abbildung 7 (links): T2-gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 8 (rechts): T1-gewichtete Sequenz (multiplanare Rekonstruktion einer MP-RAGE), Transversalschnitt

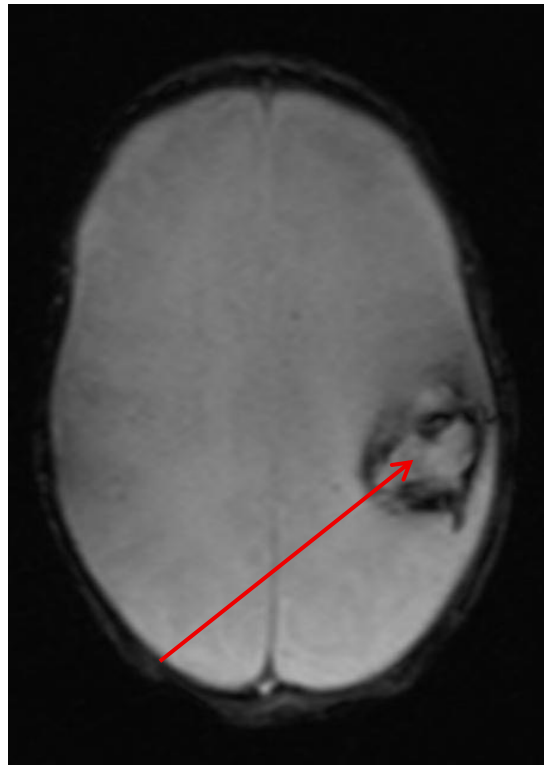
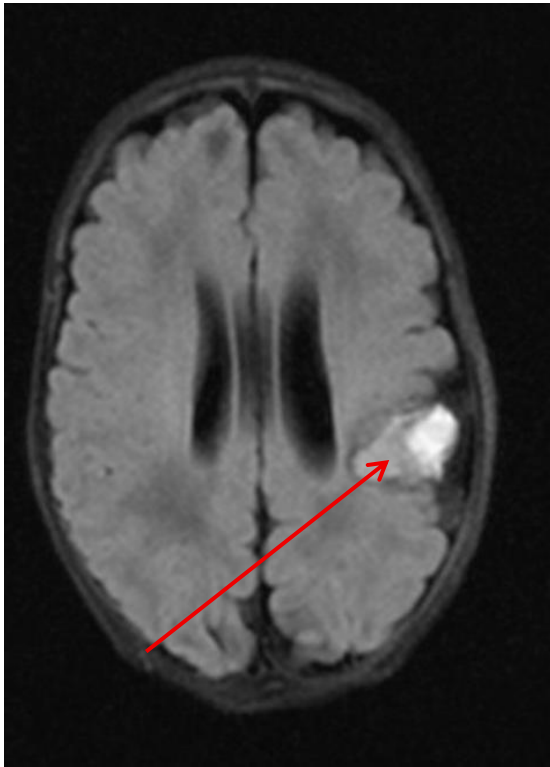


Abbildung 9 (links): FLAIR-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 10 (rechts): T2*-gewichtete (Hemo-)Sequenz, Transversalschnitt

Befund:

Es zeigt sich der in der Voruntersuchung diagnostizierte Mediateilinfarkt links mit weiter in Resorption befindlicher Einblutung (roter Pfeil).

Beispiel 3

Bei einem reifen, weiblichen Zwillingsneugeborenen kam es zu rezidivierenden Krampfanfällen. Perinatal bestand aufgrund mütterlichen Fiebers der Verdacht auf ein Amnioninfektionssyndrom, woraufhin die Entbindung per elektiver Sectio erfolgt war. Die MRT-Untersuchung wurde am 17. Lebenstag in kardio-respiratorisch stabilem Zustand durchgeführt.

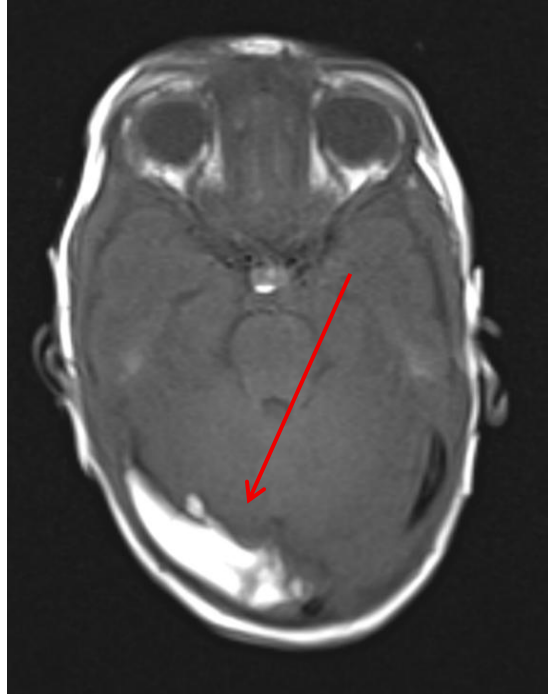
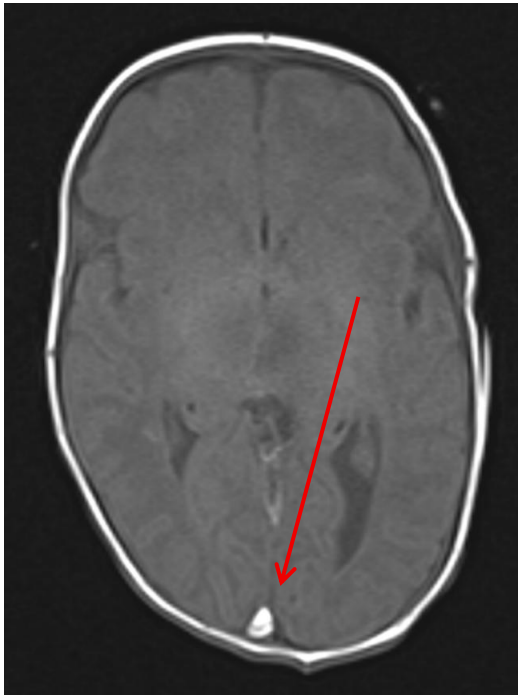


Abbildung 11 (links oben): T1-gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 12 (rechts oben): T1 gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 13 (unten): T2 gewichtete TSE-Sequenz, Sagittalschnitt

Befund:

Es zeigt sich eine akute Thrombose des Sinus transversus rechts mit Fortsetzung bis in den Sinus sagittalis superior sowie in den Sinus rectus (roter Pfeil).

Beispiel 4:

Bei einem männlichen, reifgeborenen Kind wurde im Rahmen der U3 ein Harnstau rechts sowie eine Raumforderung, am ehesten von der Wirbelsäule ausgehend, festgestellt. Das Kind wurde am 38. Lebenstag und in kardio-respiratorisch stabilem Zustand untersucht.

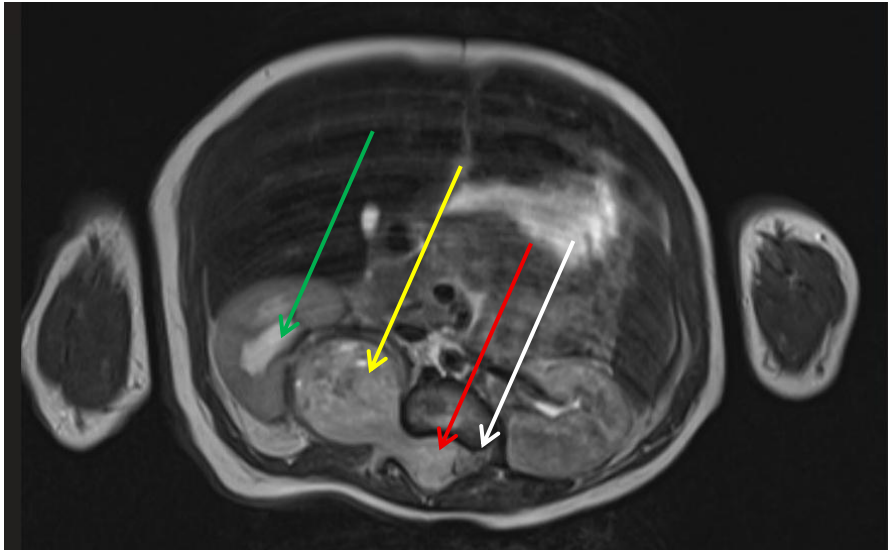
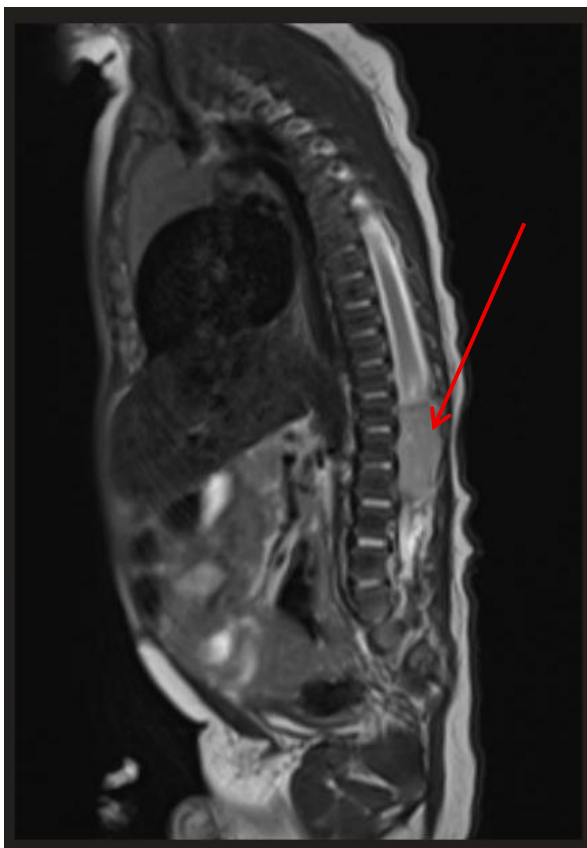


Abbildung 14 (oben): T2-gewichtete TSE-Sequenz, Transversalschnitt

Abbildung 15 (unten): T2-gewichtete TSE-Sequenz, Sagittalschnitt



Befund:

Es zeigt sich ein sanduhrförmiger Tumor mit intra- (roter Pfeil) sowie extraspinalen Anteilen (gelber Pfeil), wobei der Duralsack sich nach links verlagert darstellt (weißer Pfeil). Zudem besteht ein intrarenaler Harnstau rechts (grüner Pfeil).

6. Diskussion

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, in FAWM durchgeführte Untersuchungen in Bezug auf die Erfolgsquote zur Beantwortung der klinischen Fragestellung und die Bildqualität mit Untersuchungen in Sedierung oder Allgemeinanästhesie zu vergleichen.

Zudem sollten die Vorteile der FAWM für besondere Patientengruppen, Eltern und Personal gezeigt, sowie die Limitationen der Methode herausgearbeitet werden, um ihre Stärken und potenziellen Einschränkungen im diagnostischen Alltag adäquat einordnen zu können.

Im Vergleich beider Subgruppen zeigte sich, dass die Beantwortung der klinischen Fragestellung in beiden Kohorten in über 95% der Fälle (SON 99,6% vs. FAW 98,4%) gelang. Dementsprechend konnte die MRT als sinnvolle bildgebende Diagnostik für die genannte Altersgruppe, wie auch in zahlreichen Studien bereits belegt (24, 27, 32, 35, 102-104, 109), bestätigt werden. Des Weiteren zeigte die hohe Erfolgsrate der FAWM bei der Beantwortung der klinischen Fragestellung, dass der sedierungsfreie Untersuchungsgang eine gut praktikable und zweckdienliche Alternative zur Untersuchung unter Sedierung oder Narkose darstellt – insbesondere bei frühgeborenen Säuglingen mit niedrigem Geburtsgewicht, bei denen eine Untersuchung in Sedierung häufig nicht möglich ist. Die niedrige Rate an Zwischenfällen (*Adverse Events*, *AE*) bescheinigt zudem die Sicherheit der Untersuchungsmethode.

Die vorliegenden Studienergebnisse reihen sich in Bezug auf die Erfolgsquote von Untersuchungen in FAWM in die Daten der gesichteten Literatur ein, welche zwischen 89% (24, 33) und 100% (35, 105) beschrieben wurden. Lediglich Antonov et al. (15) gaben eine niedrigere (79%) Erfolgsquote an.

Zu beachten ist, dass sedierungsfreie Diagnostik in FAWM durch verschiedene Protokolle und technische Unterstützungen, wie Immobilisationshilfen oder Wickeltechniken, auf unterschiedlichste Weise realisiert werden kann.

Um die Studienergebnisse zumindest in Teilen vergleichbar zu machen, zeigt Tabelle 8 eine Zusammenfassung, in der die Qualität der Bildsequenzen wie folgt definiert wurde: Als „diagnostisch verwertbar“ wurden alle Daten gezählt, die eine Beantwortung der klinischen Fragestellung, unabhängig vom Vorhandensein von Bewegungsartefakten, ermöglichen.

	SON-Kohorte Diagnostisch verwertbar/ Gesamtkohorte	FAW-Kohorte Diagnostisch verwertbar/ Gesamtkohorte
Hansen et al. (2009)	-	32/36 (88,9 %)
Haney et al. (2010)	-	151/155 (97,4 %)
Windram et al. (2012)	23/23 (100%)	20/20 (100%)
Gale et al. (2012)		
Shariat et al. (2015)	-	60/60 (100%)
Anatov et al. (2016)	-	221/279 (79,2 %)
Templeton et al. (2019)	-	200/217 (92,2 %)
Tsiflikas et al. (2019)	19/19 (100%)	38/42 (90,5 %)
Caro-Dominguez et al. (2020)	-	42/47 (89,4 %)
Weng et al. (2020)		46/53 (86,8%)
Eigenes Kollektiv (2024)	242/243 (99,6%)	182/189 (96,3%)

Tabelle 8: Überblick Studienergebnisse; die Prozentwerte wurden gerundet

Die gesichtete Literatur beschreibt nur marginal, ob und wie die genauen Abläufe der prädiagnostischen Maßnahmen standardisiert durchgeführt werden. Somit bleibt Platz für interindividuelle Handlungsabläufe, welche ggf. auch in unterschiedlichen Ergebnissen resultieren. Metaanalysen, wie beispielsweise von Torres et al. (112) beschrieben die Unterschiede in der Durchführung und die dementsprechend variierenden Ergebnisse der vorliegenden Arbeiten.

Auch die unterschiedlichen Zeitpunkte der Studierhebung, die Größe und Zusammensetzung der Studienpopulationen und die untersuchte Körperregion erschweren die direkte Vergleichbarkeit der gesichteten Literatur.

Zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführte Studien, beispielsweise von Hansen et al. (33) aus dem Jahr 2009, konnten nicht auf die gleichen technischen Ressourcen

(neuere MRT-Geräte, optimierte Sequenzprotokolle z.B. FLASH-2) zurückgreifen, wie erst kürzlich publizierte Arbeiten. Dies könnte sich negativ auf den Erfolg der FAWM ausgewirkt haben, da ggf. längere und geräuschintensivere MRT-Sequenzen genutzt wurden, als dies heute üblich wäre.

Daten aus kleinen Studienpopulationen mit 20 Patientinnen und Patienten, beispielsweise Windram et al. (35) sind statistisch, insbesondere in Bezug auf Teststärke, Präzision der Schätzwerte und Signifikanz (p-Wert), anders zu werten als Studien mit über 450 Studienteilnehmenden wie z.B. Gale et al. (26) (133).

Auch die Zusammensetzung der Studiengruppe kann Einfluss auf den Erfolg oder Misserfolg der Methodik haben. Arbeiten, deren Studienpopulation ausschließlich aus gesunden Kindern bestand, wie beispielsweise von Dean et al. (109), wiesen möglicherweise eine geringere Rate an *AE* auf als Studien, die auch Frühgeborene und schwer erkrankte Patientinnen und Patienten einbezogen.

Zahlreiche der analysierten Studien bewerten die Durchführbarkeit der FAWM ausschließlich in Bezug auf eine spezifische Körperregion, häufig den Schädel. Im Gegensatz dazu berücksichtigt diese Arbeit sämtliche durchgeführten MRT-Untersuchungen, unabhängig von der untersuchten anatomischen Region. In der vorliegenden Studie wurde der Schädel am häufigsten untersucht, wobei 57% in Sedierung oder Allgemeinanästhesie und 64% der MRT in FAWM durchgeführt wurden. Zweithäufigste Körperregion war die Ganzkörperuntersuchung/die Untersuchung mehrerer Körperregionen, welche etwas häufiger in Sedierung durchgeführt wurde (SON: n=51, FAW: n=25).

Studien, die sich nur mit Untersuchungen einer Körperregion befassten, wie beispielsweise Templeton et al. (104) (ausschließlich craniale Bildgebung), Gale et al. (26) (Ganzkörperbildgebung) oder Windram et al. (35) (kardio-vaskuläre Bildgebung) können entsprechend für den Vergleich der Erfolgsquote der FAWM weniger gut herangezogen werden.

Studiendaten aus Arbeiten mit vergleichbarem Studienprotokoll wie in der vorliegenden Arbeit, beispielsweise von Antonov et al. (15), welche ebenfalls einen Hauptanteil an kranialen Untersuchungen (172/279), jedoch auch Bildgebungen der Wirbelsäule (58/279), des Abdomens (10/279) und anderer Körperregionen durchführten, eignen sich für den direkten Vergleich besser.

Antonov et al. (15) beschrieben die vollständige Beantwortung der klinischen Fragestellung in 79% der Untersuchungen. In 20% der Untersuchungen konnte die klinische Fragestellung jedoch zumindest teilweise beantwortet werden.

Folgende Faktoren, die mit schlechter Bildqualität bzw. der nur teilweisen Beantwortung der klinischen Fragestellung vergesellschaftet waren, benannten Antonov et al. (15): Wirbelsäulenuntersuchungen, Patientenbewegungen, technische Probleme beim Scan und Frühgeburtlichkeit. Im multivariaten Regressionsmodell erwiesen sich jedoch nur Wirbelsäulenuntersuchungen und Frühgeburtlichkeit als Risikofaktoren für eine verminderte Bildqualität.

Die Untersuchung der Wirbelsäule wurde in der vorliegenden Arbeit nicht als einzelne Körperregion erfasst, sondern fand in Verbindung mit anderen Körperteilen statt (Schädel und Wirbelsäule n = 17, Abdomen und Wirbelsäule n = 6).

Anhand des Regressionsmodells konnten wir jedoch zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Sequenz diagnostisch aufgrund von Bewegungsartefakten nicht verwertbar ist, bei einer Ganzkörperuntersuchung niedriger ist als bei der Darstellung des Gehirns. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass Atembewegungsartefakte bei Ganzkörperaufnahmen den Gesamteindruck dominieren und andere Bewegungsartefakte dadurch weniger ins Gewicht fallen. Zudem ist die Schichtdicke der Einzelsequenzen bei einer Kopfuntersuchung häufig geringer, wodurch Bewegungsartefakte stärker ins Gewicht fallen.

Die Studie von Gale et al. (26) legte ebenfalls nahe, dass Ganzkörperuntersuchungen in FAWM sinnvoll durchführbar sind. Die Studie beschrieb die Ganzkörperuntersuchung von 457 Kindern in FAW- Technik, 386 während der Neonatalperiode und 71 im Alter zwischen 6 und 12 Wochen nach der Geburt. Die Erfolgsrate, hier definiert als Untersuchung ohne Bewegungsartefakte, betrug zwischen 84 und 99%, in Abhängigkeit des Alters des Kindes.

Wir konnten die Aussage, dass die Untersuchung von Frühgeborenen in FAWM, wie von Antonov et al. (15) statuiert, mit einer schlechteren Bildqualität einhergeht, anhand der erhobenen Daten dieser Studie nicht bestätigen, da wir keinen signifikanten Unterschied in der Bildqualität der Einzelsequenzen zwischen Früh- und Reifgeborenen feststellen konnten (Mittelwert $\pm$ SD: SON: $3,8 \pm 0,48$ versus FAW: $3,7 \pm 0,42$, $p = 0,108$).

Die Mehrheit der in dieser Arbeit analysierten Studien differenzierte in der Ergebnisdiskussion zwischen „diagnostisch verwertbar“ und „nicht diagnostisch verwertbar“. Teilweise wurde die Bildqualität der ersten Kategorie noch weiter unterschieden, häufig fanden sich Begrifflichkeiten wie „exzellente“ oder „gute“ Bildqualität (= gänzlich ohne Bewegungsartefakte), „annehmbare“ oder „diagnostische“ Bildqualität, wenn Bewegungsartefakte vorhanden waren sowie „schlechte“ oder „nicht-diagnostische“ Bildqualität, wenn eine Auswertung der Bilder auf Grund von Bewegungsartefakten nicht möglich war.

Eine numerische Bewertung der Einzelsequenzen bzw. der Untersuchung als Gesamtwert fand sich in der gesichteten Literatur nur selten, da zumeist nur eine Gesamtauswertung der Untersuchungen, häufig als dichotome Bewertung „diagnostisch“ oder „nicht diagnostisch“ oder „optimale Bildqualität“ vs. „suboptimale Bildqualität“ angegeben wurde.

Unsere Ergebnisse belegten einen etwas geringeren Mittelwert bei der Einzelsequenzqualität in der FAW-Kohorte (Mittelwert $\pm$ SD: $3,7 \pm 0,43$) im Vergleich zur SON-Kohorte (Mittelwert $\pm$ SD: $3,96 \pm 0,11$). Diese Werte gliedern sich in die von Caro-Dominguez et al. (24) erhobenen Daten ein, welcher einen mittleren Wert von 3,6 für die FAW-Gruppe und 3,9 für die Sedierungskohorte beschrieb.

Auch die Studie von Tsiflikas et al. (103) beschrieb ähnliche Ergebnisse, wobei beachtet werden muss, dass hier eine 3-Punkte Skala verwendet wurde (Mittelwerte 2,5 FAW- vs. 3 in der SON-Kohorte).

Die Frage nach der Bildqualität der Einzelsequenzen ist in diesem Zusammenhang jedoch primär von theoretischem Interesse, da sie im Vergleich zur klinischen Relevanz der vollständigen Beantwortung der klinischen Fragestellung eine untergeordnete Rolle spielt. In der klinischen Praxis liegt der Fokus auf der diagnostischen Aussagekraft der Gesamtuntersuchung. Daher sind die zuvor beschriebenen leichten Beeinträchtigungen der Bildqualität in der FAW-Kohorte, die keinen direkten Einfluss auf die Beantwortung der klinischen Fragestellung haben, von geringerer diagnostischer Bedeutung.

Bei der Bewertung der Eignung einer Untersuchungsmethode für den klinischen Alltag darf die diagnostische Relevanz jedoch nicht isoliert betrachtet werden. Auf dem Thema Patientensicherheit muss, gerade bei der vulnerablen Gruppe der pädiatrischen Patientinnen und Patienten, besonderes Augenmerk liegen. Ob eine Narkose oder Sedierung für eine MR-Untersuchung notwendig ist, sollte sich an dem medizinischen Zustand des Kindes orientieren und nicht durch Argumente, wie eine vermeintliche Zeitersparnis oder die Antizipierung besserer Bildqualität beeinflussen lassen (4, 134). Auf die Frage nach einer möglichen Neurotoxizität von Narkosemedikamenten wurde im Literaturdiskussionsteil dieser Arbeit bereits eingegangen. Obschon die Datenlage hierzu derzeit noch unklar ist, erscheint eine Vermeidung von Sedierungen bzw. Narkosen auch in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Als objektives Maß für die Sicherheit der jeweiligen Methode kann die Rate an Zwischenfällen (engl. *adverse events*; *AE*) herangezogen werden. Die Rate an *AE* steht in einem signifikanten Zusammenhang mit dem Gesundheitszustand der Patientinnen und Patienten. Insbesondere Patienten mit vorbestehenden Erkrankungen oder solche in einem kritischen Gesundheitszustand weisen häufig eine höhere Inzidenz von *AE* auf, da ihre physiologischen Voraussetzungen zur Stabilisierung während der Untersuchung beeinträchtigt sein können (135).

Um den Gesundheitszustand der Studienpopulation zu erfassen, berücksichtigten Templeton et al. (104) in ihrer Arbeit den ASA-Status der Patientinnen und Patienten. Sie konnten jedoch keinen Unterschied zwischen der medianen ASA-Einteilung und der diagnostischen Verwertbarkeit der MR-Untersuchungen feststellen. So war der mediane ASA-Status der Kohorte der <90 Tage alten Patientinnen und Patienten sowohl in der diagnostischen Kohorte als auch in der nicht-diagnostischen Kohorte ASA III, bei den >90 Tage alten Kindern im Median ASA II. Die Kohorte der Frühgeborenen zeigte sogar einen medianen ASA-Score von III in der diagnostischen Gruppe, jedoch nur einen ASA-Score von II in der nicht-diagnostischen Gruppe. Aus diesen Daten kann abgeleitet werden, dass auch (schwer) vorerkrankte Kinder erfolgreich in FAWM untersucht werden können. Zudem traten die durch Templeton et al. (104) beschriebenen Zwischenfälle ausschließlich in der SON-Kohorte auf: Hypoxämie ($\text{SpO}_2 < 92\%$) in 14,2%, Hypothermie (Körperkerntemperatur $< 36^\circ\text{C}$) in

18,9%, Bradykardie (Herzfrequenz <100 Schläge pro Minute) in 10,1% und Hypotension (mittlerer arterieller Blutdruck <65mmHg) in 4,2% der Untersuchungen waren die häufigsten auftretenden Zwischenfälle. In einem Fall erlitt das Kind unter Intubation einen Laryngospasmus, was als schwerer Zwischenfall definiert wurde.

Auch Haney et al. (98) dokumentierten die Rate an Zwischenfällen, welche während ihrer Studienphase aufgetreten waren: Als „milde Komplikation“ wurden die Notwendigkeit einer Erhöhung des inspiratorischen O₂-Flusses, eine auftretende Bradykardie sowie eine kurzzeitige Entsättigung der SpO₂ definiert. Diese waren schnell reversibel oder sistierten durch kurze, manuelle Stimulation des Kindes. Als „moderate Komplikation“ wurde die Notwendigkeit zur Beutel-Beatmung oder die Anpassung eines positiven endexpiratorischen Druckes definiert. „Schwere Komplikationen“ beinhalteten die Intubation auf Grund einer Ateminsuffizienz oder die ungeplante Extubation während der Untersuchung. Es traten signifikant weniger Komplikationen auf, wenn das Kind für die Untersuchung nicht sediert werden musste (9% vs. 3%), insbesondere traten ausschließlich bei sedierten Patientinnen und Patienten „moderate“ Komplikationen auf.

In dieser, an der UMM durchgeführten Studie wurde im betreffenden Zeitraum drei Zwischenfälle in der Gruppe der sedierten Patientinnen und Patienten dokumentiert. Ein Kind, welches von der neonatologischen Intensivstation betreut war, wurde nach dem Transport in die radiologische Abteilung kardio-respiratorisch instabil und konnte nicht untersucht werden. Bei der geplanten Wiederholung der MRT wenige Tage später wurde das Kind erneut kardio-respiratorisch instabil und die Untersuchung wurde abgebrochen. Bei einem weiteren Fall dislozierte der venöse Zugang des Patienten, so dass die Narkosemedikamente nicht weiter appliziert werden konnten und die Untersuchung ebenfalls abgebrochen werden musste. Obwohl die ASA-Klassifikationen der Kinder in unserer Studie nicht erhoben wurde, deutet die Tatsache, dass 30 % der Patientinnen und Patienten der FAW-Kohorte zum Zeitpunkt der Untersuchung auf der Intensivstation betreut wurden, auf einen potenziell kritischen Gesundheitszustand dieser Patientinnen und Patienten hin. Es wurden jedoch keine medizinischen Zwischenfälle in der FAW-Kohorte dokumentiert. Dies Bestätigt die Sicherheit der Untersuchungstechnik.

Angemerkt werden muss, dass die Informationen über Zwischenfälle aus der Falldokumentation der radiologischen Fachabteilung übernommen wurden.

Zwischenfälle oder Probleme, die sich ggf. nach dem Verlassen der Abteilung ereignet haben und durch die jeweilige Station der Kinderklinik dokumentiert wurden, konnten nicht berücksichtigt werden. Dies erklärt ggf. teilweise die sehr geringe Rate an AE in unserem Studienzentrum. Vergleichbare Studien (26, 35, 103) dokumentierten jedoch ebenfalls keine Zwischenfälle in der FAW-Kohorte.

Die Gruppe der Frühgeborenen ist im Hinblick auf AE besonders gefährdet (136). Diese Patientinnen und Patienten haben auf Grund von Organunreife und Kreislaufinstabilität häufig ein erhöhtes Narkoserisiko (5). Bedingt durch das geringe Körpergewicht ist eine maschinelle Beatmung mit einem Narkosegerät zudem ggf. nicht möglich und die sedierungsfreie Bildgebung die einzige Möglichkeit zur Durchführung eines MRT. Dementsprechend ist die Frage nach der sicheren Durchführung bei Frühgeborenen von besonderer Relevanz.

Die Kohorte der Frühgeborenen (n=74) wurde zu 57% in Sedierung oder Narkose und zu 43% in FAWM untersucht. Nur zwei der Untersuchungen (FAW-Kohorte) mussten abgebrochen werden, in beiden Fällen war das Kind zu unruhig. Die Erfolgsrate (Beantwortung der klinischen Fragestellung) lag in der SON-Kohorte bei frühgeborenen Kindern bei 100% (n=43), in der FAW-Kohorte der Frühgeborenen bei 97% (n=32). Somit zeigt sich zum einen kein signifikanter Unterschied in der Erfolgsrate innerhalb zwischen SON- und FAW-Kohorte (SON: 100% versus FAW: 97%, $p=0,427$), als auch kein signifikanter Unterschied zwischen früh- und reifgeborenen Kindern (Frühgeborene 97% versus Reifgeborene 96,2%, $p=1,0$). Auch die Einzelsequenzbewertung variierte nicht signifikant zwischen Früh- und Reifgeborenen (Mittelwert $\pm$ SD: $3,8 \pm 0,48$ versus $3,7 \pm 0,42$, $p = 0,108$).

Ähnliche Ergebnisse beschrieben Templeton et al. (104), welche eine nahezu gleiche Rate zur erfolgreichen Durchführung der Untersuchung in FAWM bei früh- oder reifgeborenen (Frühgeborene 92,5 % versus Reifgeborene 91,1 %) Kindern unter 90 Tagen Lebensalter feststellten.

Den genannten Beobachtungen gegenüber stehen die Daten von Antonov et al. (15), welche beschrieben, dass ehemalige Frühgeborene sich weniger gut durch die FAWM beruhigen ließen und dementsprechend häufiger als bei ehemals reifgeborenen Kindern qualitativ schlechtere Sequenzen aufgenommen wurden.

Gale et al. (26) beschrieben indessen sogar bessere Untersuchungsergebnisse bei Frühgeborenen als bei Reifgeborenen (99% vs. 95%).

Betrachtet man das Alter des Kindes als abhängige Variable, ist die Datenlage ebenfalls uneinheitlich: Antonov et al. (15) beschrieben, dass das Alter (sowohl chronologisches als auch korrigiertes Alter) des untersuchten Kindes keinen Einfluss auf den Erfolg des Untersuchungsganges hatte. Zu beachten ist jedoch, dass diese Studie nur einen geringen Anteil (11%) an Patientinnen und Patienten einschloss, welche älter als zwei Monate waren. Templeton et al. dokumentierten (104) eine höhere Erfolgsquote (95 %) bei älteren reifgeborenen Säuglingen (90-181 Tage alt), als bei jüngeren (unter 90 Tagen Lebensalter) und Gale et al. (26) gaben geringere Erfolgsraten für einen erfolgreichen Scan mit zunehmendem Alter an. Letzteres deckt sich auch mit unseren klinischen Erfahrungen und Daten, da die Sequenzqualität mit zunehmendem Alter des Kindes in der FAW-Gruppe unserer Studie abnahm ($\rho = -0,18$; $p = 0,013$).

Die vorliegenden Ergebnisse und die gesichtete Literatur legen nahe, dass die FAWM insbesondere für Frühgeborene von Vorteil ist, da auf das Narkoserisiko verzichtet werden kann ohne relevante Einbußen bei der Bild- oder Gesamtuntersuchungsqualität in Kauf nehmen zu müssen.

Obwohl die Gesamtbewertung der in FAWM durchgeführten Untersuchungen im Vergleich zu denen in Sedierung oder Narkose niedriger ausfiel (Mittelwert $\pm$ SD: SON $3,96 \pm 0,11$ vs. FAW $3,7 \pm 0,43$, $p < 0,001$), kann die Bildqualität dennoch als „gut“ bis „sehr gut“ eingestuft werden. Darüber hinaus zeigte sich ein signifikanter Vorteil in der Untersuchungsdauer: Die durchschnittliche Untersuchungszeit war in FAWM signifikant kürzer als unter Sedierung oder Narkose (Durchschnitt 32 min versus 39 min, $p < 0,001$).

Unterschieden werden kann die reine Untersuchungszeit („scan time“) von der Gesamtzeit, die für die Untersuchung aufgewendet werden muss. Letzte wird von verschiedenen Autorinnen und Autoren jeweils individuell definiert: Windram et al. (35) differenzieren zwischen „scan time“ und „time in room“, wobei beide Zeiten in der FAW-Kohorte als signifikant kürzer dokumentiert wurden.

Tsiflikas et al. (103) (FAW Mittelwert $\pm$ SD: 28 ± 8 min versus SON 71 ± 11 min) und Templeton et al. (104) (FAW Mittelwert $\pm$ SD: 35 ± 19 min versus SON 45 ± 20 min) beschreiben ebenfalls deutlich kürzere Zeiten für die sedierungsfreie Untersuchung als

für Untersuchungen in Sedierung oder Allgemeinanästhesie. Templeton et al. (104) merken jedoch an, dass für jüngere Kinder (<90 Tage) mehr Zeit als für ältere Kinder (>90 Tage) aufgewendet werden musste.

Auch unsere Datenlage zeigt im Durchschnitt signifikant kürzere Untersuchungszeiten bei Verwendung der FAWM, wobei keine Dokumentation von Vor- und Nachbereitungszeit erfolgte. Zusätzlich muss angemerkt werden, dass sowohl in unserer Studie als auch bei anderen Autorinnen und Autoren (104) die MRT-Protokolle für die FAW-Methode angepasst und teilweise gekürzt wurden. Dies könnte insbesondere die reine Untersuchungszeit („scan time“) positiv verkürzt haben.

Zudem muss die Variable „Zeit“ auch in Bezug zur untersuchten Körperregion gesetzt werden: Eine Untersuchung des Schädels benötigt im Schnitt auf Grund des geringeren Volumens weniger Zeit als ein Ganzkörperscan. Somit sind Zeit-abhängige Daten aus Studien, die sich ausschließlich mit cranialer Bildgebung beschäftigen, anders zu werten als Ergebnisse von Studien, welche Ganzkörperscans oder andere Körperregionen betrachten.

Auch sollte miteinbezogen werden, dass eine MR-Sequenz, die mehr Zeit zur Vervollständigung in Anspruch nimmt, anfälliger für Bewegungsartefakte ist als eine kürzere Sequenz. Untersuchungen mit zahlenmäßig weniger Sequenzen dauern zudem kürzer als solche mit mehr oder längeren Sequenzen.

Die kürzeren Untersuchungszeiten sind zum einen für die Patientinnen und Patienten sowie deren Angehörige von Vorteil, da das Risiko für Komplikationen mit zunehmender Narkose- bzw. Untersuchungsdauer zunimmt (137) und die Kinder weniger lang von den Eltern getrennt sind. Die fehlende Notwendigkeit einer Überwachung nach der Untersuchung bei Anwendung der FAWM führt zudem dazu, dass die Patientinnen und Patienten das Krankenhaus schneller verlassen können. Auch im Hinblick auf Personal- und Geräteeinsatzzeit sind reduzierte Scan-Zeiten vorteilhaft, da mehr Untersuchungen im gleichen Zeitfenster durchgeführt werden können, was eine optimale Ressourcennutzung erlaubt.

Neben dem zusätzlichen Zeitaufwand, der für Untersuchungen in Sedierung oder Narkose erforderlich ist, müssen auch der erhöhte Personalbedarf sowie die zusätzlichen Material- und Medikamentenkosten berücksichtigt werden.

Betrachtet man den Personalaufwand, der für eine MR-Untersuchung von Nöten ist, kann statuiert werden, dass die sedierungsfreie Untersuchung sowohl ärztliches als

auch pflegerisches Personal spart, da zumeist nur radiologisches Assistenzpersonal sowie ein Radiologe bzw. eine Radiologin gemeinsam mit den Eltern vor Ort sind. Für eine Untersuchung in Sedierung oder Allgemeinanästhesie werden mindestens noch ein anästhesiologischer Arzt oder Ärztin sowie weiteres Pflegefachpersonal benötigt (33, 104). Dies bringt höhere Personalkosten mit sich (138).

Auch die Bereitstellung von Material und Anästhesiemedikamenten sind ein relevanter Kostenpunkt und sollten nicht vernachlässigt werden (17, 139). MRT-fähige Monitore, Beatmungsgeräte und Perfusoren müssen vorgehalten und gewartet werden.

Zuletzt sollte auch die psychische Belastung, die ggf. mit einer Allgemeinanästhesie einhergeht, bei der Frage, ob eine sedierungsfreie Untersuchung eine sinnvolle Alternative für den individuellen Patienten oder Patientin ist, eine Rolle spielen. Bevan et al. (140) konnte belegen, dass sowohl Eltern als auch Kinder, eine Allgemeinanästhesie als „beunruhigendes Ereignis“ wahrnehmen können. Insbesondere die Anlage eines venösen Zugangs, der für eine Allgemeinanästhesie benötigt wird, sei für die Eltern oft „belastend“ (141). Surey et al. beschreiben, dass viele Eltern sich dementsprechend für eine weniger invasive Methode entscheiden, wenn ihnen die Wahl gelassen wird (142).

Die Vergleichbarkeit der vorliegenden Literatur ist, wie zu Beginn des Abschnitts erläutert, nur eingeschränkt gegeben. Dementsprechend werden die untersuchungsprotokoll- oder patientenabhängigen Faktoren, die besonders relevant für die erfolgreiche Durchführung einer sedierungsfreien MRT-Untersuchung sind, von den Autorinnen und Autoren unterschiedlich eingeschätzt.

Zu den Limitationen der FAWM zählen zusammenfassend eine leicht reduzierte Gesamtbildqualität der MRT-Untersuchungen, sowie eine etwas niedrigere Einzelsequenzqualität im Vergleich zu Untersuchungen in Sedierung oder Narkose. Zudem dokumentierten wir eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Sequenzwiederholungen, insbesondere mit steigendem (chronologischem) Alter sowie eine steigende Wahrscheinlichkeit für Sequenzen mit diagnostischen Limitationen. Des Weiteren zeigte das angewandte multivariate Regressionsmodell, dass Untersuchungen des Kopfes, im Vergleich zur MRT anderer Körperregionen (Abdomen, Ganzkörper-MRT), einen größeren Anteil an Sequenzen mit

diagnostischen Einschränkungen aufweisen. Dies ist zum einen durch die Anwendung so genannter „Single-Shot-Sequenzen“ zu erklären, die beispielsweise bei der Abdomenbildgebung Anwendung finden und deutlich weniger anfällig für Bewegungsartefakte sind als Sequenzen, die für die Darstellung des Gehirns verwendet werden. Außerdem kann vermutet werden, dass bei der Bildgebung des Körpers bestimmte Bewegungsartefakte, wie beispielsweise Atembewegungen oder die Kontraktionen des Herzens, durch die beurteilende Radiologin bzw. den beurteilenden Radiologen erwartet und toleriert werden. So ist es möglich, dass auf Grund dieser technisch unvermeidbaren Artefakte der Gesamteindruck stärker beeinflusst wird als durch ggf. vorliegende Bewegungsartefakte und dies zu einer höheren Qualitätsbewertung geführt haben könnte.

6.1 Limitationen der Studie

Zu den Limitationen des Studiendesigns zählen einerseits die lange Zeitspanne der Datenerhebung zwischen 2009 und 2022, in welcher sich sowohl strukturelle als auch methodische Veränderungen ergeben haben, sowie das retrospektive Studiendesign und die subjektive Bewertung der Einzelsequenzqualität.

Die Veränderungen in der Methodik der MR-Bildgebung resultierten zum einen aus technischen Veränderungen, wie dem Austausch des 3T-Scanners im Jahr 2019. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit neuer MR-Sequenzprotokolle zu berücksichtigen, die möglicherweise mit verkürzten Untersuchungszeiten einhergegangen sind (3).

Zudem ist die Aussagekraft der Studie aufgrund ihres Designs als Einzelzentren-Studie in Bezug auf die Generalisierbarkeit eingeschränkt, da die Durchführung der FAWM, wie bereits beschrieben, keinem interinstitutionell standardisierten Verfahren folgt.

Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass es zum Thema „sedierungsfreie Bildgebung für Früh- und Neugeborene“ zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine großen, europäischen Studien oder offizielle Leitlinien gibt. Die verfügbaren Studien beziehen sich meist auf Daten und Erfahrungswerte aus dem angloamerikanischen Raum und legen nahe, dass auch in Staaten wie Kanada oder den USA derzeit keine einheitliche Praxis etabliert ist (112, 143), was die Vergleichbarkeit der Studien erschwert.

Betrachtet wurde zudem nur die Alterskohorte bis zur Vollendung des vierten Lebensmonats, dementsprechend können keine Aussagen zur Durchführbarkeit der FAWM über diesen Zeitraum hinaus getroffen werden.

7. Zusammenfassung

Die MRT ist dank ihres exzellenten Gewebekontrastes besonders geeignet, um klinische Fragestellungen, die eine hohe Bildqualität und eine präzise anatomische Darstellung erfordern zu beantworten. Sie ist zudem bei Säuglingen aufgrund der fehlenden Strahlenbelastung in Fällen, in denen konventionelle und sonographische Bildgebung nicht ausreichen, Methode der Wahl.

Die eingeschränkte Kooperationsfähigkeit von Säuglingen und Kleinkindern macht den Untersuchungsgang in der Vorbereitung aufwendig und führt häufig zur Notwendigkeit einer Sedierung oder Narkose.

Die vorliegende Arbeit untersuchte, ob die sedierungsfreie MRT-Untersuchung von Früh- und Neugeborenen bis zur Vollendung des vierten Lebensmonates hinsichtlich der Bildqualität von Untersuchungen unter Sedierung oder Narkose abweicht.

Zudem wurden potenzielle Vorteile der FAWM für Patientinnen und Patienten, Eltern und medizinisches Personal, sowie mögliche methodische Limitationen und Herausforderungen in der klinischen Durchführung analysiert.

Darüber hinaus wurde geprüft, ob die standardisierte Anwendung eines FAW-Protokolls, im Vergleich zu in Sedierung oder Narkose durchgeführten Untersuchungen, mit einer erhöhten Rate unerwünschter Ereignisse oder zusätzlichem zeitlichen Aufwand verbunden ist. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Gruppe (ehemaliger) Frühgeborener.

Zu diesem Zweck wurden in einem ersten Schritt alle durchgeführten MRT-Untersuchungssequenzen, die den Einschlusskriterien der Studie entsprachen, mit Hilfe einer semiquantitativen 4-Punkte Skala bewertet. Die Bewertungen erfolgten durch eine Medizinstudentin im letzten klinischen Studienjahr und einen Facharzt für Radiologie mit Schwerpunktbezeichnung Kinderradiologie mit mehrjähriger klinischer Erfahrung, in enger Absprache und ohne Kenntnis weiterer untersuchungsbezogener Daten. Nach Beurteilung der Einzelsequenzen wurden weitere Patienten- und technikbezogene Daten aus dem klinikinternen Dokumentationssystem und den Befunden ermittelt, um die Bewertungen der Bildqualität mit den vorliegenden Falldaten zusammenzuführen. Zu den erhobenen Falldaten gehörten neben den Patientencharakteristika (Alter, Größe, Gewicht, Geschlecht) auch alle MRT-relevanten Daten wie die angewandte Methodik (Sedierung oder Narkose vs. FAWM),

Untersuchungszeit, Sequenzanzahl und Komplikationen (Sequenzwiederholung, Abbruch der Untersuchung).

Die retrospektive Analyse umfasste 432 MRT-Untersuchungen, die zwischen Juli 2009 und August 2022 durchgeführt wurden. Insgesamt wurden 3691 Sequenzen akquiriert. Obwohl die durchschnittliche Einzelsequenzbewertung der FAW-Kohorte geringfügig unter der der SON-Kohorte lag, konnte die klinische Fragestellung bei Untersuchungen in FAWM in 98% der Fälle beantwortet werden. Dies belegt, dass die Methode im klinischen Alltag routinemäßig und erfolgreich anwendbar ist.

Als vorteilhaft an der FAWM erwies sich, dass die Untersuchungszeit im Durchschnitt signifikant kürzer als in Sedierung oder Allgemeinanästhesie war. Zudem stellte die FAWM insbesondere bei Frühgeborenen die einzige Möglichkeit zur MRT-Bildgebung dar, welche ansonsten aufgrund des niedrigen Körpergewichtes, der Unreife oder sonstigen Kontraindikationen nicht möglich gewesen wäre.

Während in der SON-Kohorte drei Untersuchungen wegen medizinischer Gründe abgebrochen werden mussten, wurden in der FAW-Kohorte keine Sequenzwiederholungen oder Untersuchungsabbrüche aus medizinischer Indikation dokumentiert. Dies bestätigt die sichere Durchführbarkeit der Methode.

Es bestand ein leicht erhöhtes Risiko, dass Sequenzen aufgrund diagnostischer Einschränkungen wiederholt werden müssen, wenn die Untersuchung in FAWM durchgeführt wurde. Dieses Risiko stieg mit zunehmendem chronologischen Alter. Darüber hinaus traten diagnostische Einschränkungen bei Schädeluntersuchungen häufiger auf als bei Ganzkörper- oder Abdomenaufnahmen. Diese Limitationen sollten bei der Untersuchungsplanung berücksichtigt werden.

Weiterhin konnten die Daten belegen, dass die Einzelsequenzqualität sich nicht signifikant zwischen der Untersuchung von Frühgeborenen und Reifgeborenen unterschied, jedoch die Qualität der Einzelsequenzen mit steigendem (korrigiertem) Lebensalter sank. Dies legt nahe, dass sich die FAWM insbesondere für Früh- und Neugeborene eignet.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Studie, dass die sedierungsfreie MRT-Untersuchung von Kindern bis zur Vollendung des vierten Lebensmonates eine sichere, qualitativ hochwertige und effektive Alternative zu Untersuchungen unter Sedierung oder Narkose darstellt, insbesondere bei Frühgeborenen, vorerkrankten Kindern und bei niedrigem Geburtsgewicht. Die FAWM ermöglicht eine signifikant

kürzere Untersuchungszeit und stellt eine wertvolle – oft die einzige – Option für Kinder dar, bei denen Sedierung oder Anästhesie kontraindiziert sind.

8. Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Lollert A, Frey KS, Hoffmann C, Herbst M, König J, Schmeihl I, et al. "Feed-and-wrap" technique versus deep sedation for neonatal magnetic resonance imaging: a retrospective comparative study. *Eur Radiol*. 2024.
2. Forsting M, Jansen O. MRT des Zentralnervensystems Stuttgart: Thieme 2014.
3. Reiser M, Kuhn F-P, Debus J. Duale Reihe - Radiologie. Stuttgart: Thieme 2017.
4. Link HE, Gooding CA. Pädiatrische Radiologie. Bern: Hogrefe (Vorm. Verlag Hans Huber); 2014.
5. Speer CP, Gahr M, Dötsch J. Pädiatrie. Berlin-Heidelberg: Springer 2019.
6. Kahl-Scholz M, Vockelmann C. Basiswissen Radiologie: Nuklearmedizin und Strahlentherapie. Berlin - Heidelberg: Springer; 2024
7. Bundesärztekammer. Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik. Deutsches Ärzteblatt. 2022.
8. Bundesärztekammer. Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Computertomographie. Deutsches Ärzteblatt. 2022.
9. Grunert JH. Strahlenschutz für Röntgendiagnostik und Computertomografie: Grundkurs und Spezialkurse. Berlin-Heidelberg: Springer 2019.
10. Strahlenschutzkommission. Bildgebende Diagnostik bei Kindern: Empfehlung der Strahlenschutzkommission 2022.
11. Stöver B. Eindeutige CT-Indikationen beim Kind. *RöFo*. 2007;179.
12. Staatz G. Referenz Radiologie - Kinderradiologie Stuttgart: Thieme; 2021.
13. Uhlenbrock D. MRT und MRA des Kopfes : Indikationsstellung - Wahl der Untersuchungsparameter - Befundinterpretation. Stuttgart: Thieme 2011.
14. Scheffel H, Alkadhi H, Boss A, Merkle E. Praxisbuch MRT Abdomen und Becken. Berlin - Heidelberg: Springer 2012.
15. Antonov NK, Ruzal-Shapiro CB, Morel KD, Millar WS, Kashyap S, Lauren CT, et al. Feed and Wrap MRI Technique in Infants. *Clin Pediatr (Phila)*. 2017;56(12):1095-103.
16. Jöhr M. Komplikationen in der Kinderanästhesie. *Anästhesiologie Intensivmedizin*. 2017.
17. Kitsa P, Andronikou S, Cardoso J. Sedation of children undergoing MRI - A risky business! *South African medical journal*. 2004;94.
18. Aksenov DP, Miller MJ, Dixon CJ, Drobyshvsky A. Impact of anesthesia exposure in early development on learning and sensory functions. *Dev Psychobiol*. 2020;62(5):559-72.
19. Dai CL, Li H, Hu X, Zhang J, Liu F, Iqbal K, et al. Neonatal Exposure to Anesthesia Leads to Cognitive Deficits in Old Age: Prevention with Intranasal Administration of Insulin in Mice. *Neurotox Res*. 2020;38(2):299-311.
20. Disma et al. Morbidity and mortality after anaesthesia in early life: results of the European prospective multicentre observational study, neonate and children audit of anaesthesia practice in Europe (NECTARINE). *Br J Anaesth*. 2021;126.
21. Ing C, Warner DO, Sun LS, Flick RP, Davidson AJ, Vutskits L, et al. Anesthesia and Developing Brains: Unanswered Questions and Proposed Paths Forward. *Anesthesiology*. 2022;136(3).
22. McCann ME, de Graaff JC, Dorris L, Disma N, Withington D, Bell G, et al. Neurodevelopmental outcome at 5 years of age after general anaesthesia or awake-regional anaesthesia in infancy (GAS): an international, multicentre, randomised, controlled equivalence trial. *Lancet*. 2019;393(10172):664-77.

23. Striebel HW. Anästhesie Intensivmedizin Notfallmedizin. Stuttgart: Thieme 2020.
24. Caro-Domínguez P, Sánchez-Garduño JJ, Martínez-Moya M, Fajardo-Cascos M, Galván-Banqueri F, Hernández-Herrera C, et al. Brain MRI without anesthesia in children less than 3 months old. *Radiologia (Engl Ed)*. 2020.
25. Dong SZ, Zhu M, Bulas D. Techniques for minimizing sedation in pediatric MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2019;50(4):1047-54.
26. Gale C, Jeffries S, Logan KM, Chappell KE, Uthaya SN, Modi N. Avoiding sedation in research MRI and spectroscopy in infants: our approach, success rate and prevalence of incidental findings. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2013;98(3).
27. Golan A, Marco R, Raz H, Shany E. Imaging in the newborn: infant immobilizer obviates the need for anesthesia. *Isr Med Assoc J*. 2011;13(11):663-5.
28. Ibrahim T, Few K, Greenwood R, Smith C, Malcolm P, Johnson G, et al. 'Feed and wrap' or sedate and immobilise for neonatal brain MRI? *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2015;100(5): F465-6.
29. Jaimes C, Gee MS. Strategies to minimize sedation in pediatric body magnetic resonance imaging. *Pediatr Radiol*. 2016;46(6):916-27.
30. Franco P, Seret N, Van Hees J, Scaillet S, Groswasser J, Kahn A. Influence of swaddling on sleep and arousal characteristics of healthy infants. *Pediatrics*. 2005 115.
31. Stevens B, Yamada J, Ohlsson A. Sucrose for analgesia in newborn infants undergoing painful procedures. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2010.
32. Neubauer V, Griesmaier E, Baumgartner K, Mallouhi A, Keller M, Kiechl-Kohlendorfer U. Feasibility of cerebral MRI in non-sedated preterm-born infants at term-equivalent age: report of a single centre. *Acta Paediatr*. 2011;100(12):1544-7.
33. Hansen SS. Feed-and-sleep: a non-invasive and safe alternative to general anaesthesia when imaging very young children. *Medical Radiographer*. 2009.
34. Saunders DE, Thompson C, Gunny R, Jones R, Cox T, Chong WK. Magnetic resonance imaging protocols for paediatric neuroradiology. *Pediatr Radiol*. 2007;37(8):789-97.
35. Windram J, Grosse-Wortmann L, Shariat M, Greer ML, Crawford MW, Yoo SJ. Cardiovascular MRI without sedation or general anesthesia using a feed-and-sleep technique in neonates and infants. *Pediatr Radiol*. 2012;42(2):183-7.
36. Koletzko B. *Kinder- und Jugendmedizin*. Berlin-Heidelberg: Springer 2013.
37. Das Radiologienetz. *Deutsche Radiologie in Zahlen o.J.* [Available from: <https://www.radiologie.de/deutsche-radiologie-zahlen/>].
38. Bundesärztekammer. *Ärztstatistik 2021* 2021 [Available from: www.bundesarztekkammer.de].
39. Röntgengesellschaft D. *Kinderradiologie in Deutschland: Zahlen, Daten, Fakten: Gesellschaft für medizinische Radiologie e.V.; 2015* [Available from: www.drg.de].
40. Schmacke N, Klauber J, Günster C, Gerste B, Robra B-P. *Versorgungs-Report 2015/2016 Schwerpunkt „Kinder und Jugendliche“*. Stuttgart: Schattauer 2016.
41. Schäfer JF, Berthold D, Hahn G, von Kalle T, Moritz J, Schröder C, et al. *Ganzkörpermagnetresonanztomografie im Kindes- und Jugendalter: AWMF; 2021*.

42. Benz-Bohm G, Richter E. Chroniken der Kinderradiologie. Berlin-Heidelberg: Springer 2012.
43. Blesken M, Franke I, Freiberg J, Kraft M, Kurylowicz L, Rohde M, et al. Kindesmisshandlung, -missbrauch, -vernachlässigung unter Einbindung der Jugendhilfe und Pädagogik (Kinderschutzleitlinie): Kinderschutzleitlinienbüro AWMF; 2019.
44. Rinck PA. Magnetic Resonance in Medicine: European Magnetic Resonance Forum; 2024 [Available from: <https://magnetic-resonance.org>].
45. Bloch F. Nuclear Induction. *Physical Review*. 1946;70(7-8):460-74.
46. Purcell EM, Torrey HC, Pound RV. Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid. *Physical Review*. 1946;69(1-2).
47. Foundation TN. All Nobel Prizes Stockholm: The Nobel Foundation; [Available from: <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes/>].
48. Odeblad E, U. B. Proton magnetic resonance of human cervical mucus during the menstrual cycle. *Acta Radiol*. 1957;47.
49. Odeblad E, Lindstrom G. Some preliminary observations on the proton magnetic resonance in biologic samples. *Acta radiol*. 1955;43(6):469-76.
50. Jackson JA, Langham WH. Whole-body NMR spectrometer. *Rev Sci Instrum*. 1968;39(4).
51. Lauterbur PC. Image Formation by Induced Local Interactions: Examples of Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature*. 1973;242.
52. Kumar A, Welte D, Ernst RR. NMR Fourier zeugmatography. *Journal of Magnetic Resonance* (1969). 1975;18(1).
53. Damadian R, Goldsmith M, Minkoff L. NMR in cancer: XVI. FONAR image of the live human body. *Physiol Chem Phys*. 1977;9(1):97-100, 8.
54. Rangel-Guerra RA, Perez-Payan H, Minkoff L, Todd LE. Nuclear magnetic resonance in bipolar affective disorders. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1983;4(3):229-31.
55. First clinical trials of diagnostic NMR. *Radiology/Nuclear Medicine Magazin*. 1981.
56. Zenger I. Die Geschichte der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers. [Internet]. 2023.
57. Hennig J, Nauerth A, Friedburg H. RARE imaging: A fast imaging method for clinical MR. *Magnetic Resonance in Medicine*. 1986;3(6):823-33.
58. Haase A, Frahm J, Matthaei D, Hänicke W, Merboldt KD. FLASH imaging: rapid NMR imaging using low flip-angle pulses. 1986. *J Magn Reson*. 2011;213(2):533-41.
59. Dumoulin CL, Hart HR, Jr. Magnetic resonance angiography. *Radiology*. 1986;161(3):717-20.
60. Le Bihan D, Breton E, inventorsMethod to Measure the Molecular Diffusion and/or Perfusion Parameters of Live Tissue1987.
61. Ogawa S. Finding the BOLD effect in brain images. *NeuroImage*. 2012;62(2):608-9.
62. Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1990;87(24):9868-72.
63. Rummeny EJ, Vogl TJ, Reith W. Diagnostische und Interventionelle Radiologie. Berlin - Heidelberg: Springer 2011.

64. Hirsch FW, Frahm J, Sorge I, Roth C, Voit D, Gräfe D. Real-time magnetic resonance imaging in pediatric radiology — new approach to movement and moving children. *Pediatric Radiology*. 2021;51(5):840-6.
65. Zhang S, Uecker M, Voit D, Merboldt K-D, Frahm J. Real-time cardiovascular magnetic resonance at high temporal resolution: radial FLASH with nonlinear inverse reconstruction. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2010;12(1):39.
66. Lauterbur PC, Dias MHM, Rudin AM, editors. Augmentation of tissue proton spin-lattice relaxation rates by in vivo addition of paramagnetic ions 1978.
67. Hankins GD, Speer M. Defining the pathogenesis and pathophysiology of neonatal encephalopathy and cerebral palsy. *Obstet Gynecol*. 2003;102(3):628-36.
68. B. Ertl-Wagner MWW. Magnetresonanztomographie des Gehirns bei Säuglingen und Kleinkindern. *Der Radiologe* 2019.
69. Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e.V. (DGAI), Deutsche Interdisziplinäre Vereinigung für Intensiv- und Notfallmedizin e.V. (DIVI). S3-Leitlinie: Analgesie, Sedierung und Delirmanagement in der Intensivmedizin. 2021.
70. Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin, Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kinderanästhesie. S1-Leitlinie Perioperative Nüchternzeiten bei Kindern und Jugendlichen. 2022.
71. Frykholm P, Schindler E, Sümpelmann R, Walker R, Weiss M. Pre-operative fasting in children. A review of the existing guidelines and recent developments. *Br J Anaesth*. 2018.
72. Cuper N, de Graaff J, van Dijk A, Verdaasdonk R, van der Werff D, Kalkman C. Predictive factors for difficult intravenous cannulation in pediatric patients at a tertiary pediatric hospital. *Paediatr Anaesth*. 2012.
73. ratiopharm GmbH. Fachinformation: Propofol-ratiopharm MCT 10 mg/ml Emulsion zur Injektion und Infusion 2016.
74. Seiffert J. Fachinformation Propofol: Gelbe Liste - Pharmaindex; 2021 [Available from: https://www.gelbe-liste.de/wirkstoffe/Propofol_1641].
75. Welzing L, Kribs A, Eifinger F, Huenseler C, Oberthuer A, Roth B. Propofol as an induction agent for endotracheal intubation can cause significant arterial hypotension in preterm neonates. *Paediatr Anaesth*. 2010.
76. Nauta M, Onland W, De Jaegere A. Propofol as an induction agent for endotracheal intubation can cause significant arterial hypotension in preterm infants. *Paediatr Anaesth*. 2011.
77. Larsen R. Anästhesie und Intensivmedizin für die Fachpflege. Berlin-Heidelberg: Springer 2016.
78. Duden. Wörterbuch medizinischer Fachbegriffe: Das Standardwerk für Laien und Fachleute. Berlin: Dudenverlag; 2021.
79. Coleman K, Robertson ND, Dissen GA, Neuringer MD, Martin LD, Cuzon Carlson VC, et al. Isoflurane Anesthesia Has Long-term Consequences on Motor and Behavioral Development in Infant Rhesus Macaques. *Anesthesiology*. 2017;126(1):74-84.
80. Maloney SE, Yuede CM, Creeley CE, Williams SL, Huffman JN, Taylor GT, et al. Repeated neonatal isoflurane exposures in the mouse induce apoptotic degenerative changes in the brain and relatively mild long-term behavioral deficits. *Sci Rep*. 2019;9(1).

81. Sinner B, Becke K, Engelhard K. General anaesthetics and the developing brain: an overview. *Anaesthesia*. 2014;69(9):1009-22.
82. Disma N, Hansen TG. Pediatric anesthesia and neurotoxicity: can findings be translated from animals to humans? *Minerva Anesthesiol*. 2016;82(7):791-6.
83. Qiu L, Zhu C, Bodogan T, Gómez-Galán M, Zhang Y, Zhou K, et al. Acute and Long-Term Effects of Brief Sevoflurane Anesthesia During the Early Postnatal Period in Rats. *Toxicol Sci*. 2016;149(1).
84. Shen X, Dong Y, Xu Z, Wang H, Miao C, Soriano SG, et al. Selective anesthesia-induced neuroinflammation in developing mouse brain and cognitive impairment. *Anesthesiology*. 2013;118(3):502-15.
85. Wan Y, Xu J, Ma D, Zeng Y, Cibelli M, Maze M. Postoperative impairment of cognitive function in rats: a possible role for cytokine-mediated inflammation in the hippocampus. *Anesthesiology*. 2007;106(3):436-43.
86. Sinner B. Anästhetika-induzierte Neurotoxizität bei Kindern: Aktueller Stand der Wissenschaft *Anästh Intensivmed* 2020;61. Ausgabe.
87. Graham MR, Brownell M, Chateau DG, Dragan RD, Burchill C, Fransoo RR. Neurodevelopmental Assessment in Kindergarten in Children Exposed to General Anesthesia before the Age of 4 Years: A Retrospective Matched Cohort Study. *Anesthesiology*. 2016;125(4):667-77.
88. Davidson AJ, Disma N, de Graaff JC, Withington DE, Dorris L, Bell G, et al. Neurodevelopmental outcome at 2 years of age after general anaesthesia and awake-regional anaesthesia in infancy (GAS): an international multicentre, randomised controlled trial. *Lancet*. 2016;387(10015):239-50.
89. Warner DO, Zaccariello MJ, Katusic SK, Schroeder DR, Hanson AC, Schulte PJ, et al. Neuropsychological and Behavioral Outcomes after Exposure of Young Children to Procedures Requiring General Anesthesia: The Mayo Anesthesia Safety in Kids (MASK) Study. *Anesthesiology*. 2018;129(1):89-105.
90. Sun LS, Li G, Miller TL, Salorio C, Byrne MW, Bellinger DC, et al. Association Between a Single General Anesthesia Exposure Before Age 36 Months and Neurocognitive Outcomes in Later Childhood. *Jama*. 2016;315(21).
91. Zaccariello MJ, Frank RD, Lee M, Kirsch AC, Schroeder DR, Hanson AC, et al. Patterns of neuropsychological changes after general anaesthesia in young children: secondary analysis of the Mayo Anesthesia Safety in Kids study. *Br J Anaesth*. 2019;122(5):671-81.
92. Murat I, Constant I, Maud'huy H. Perioperative anaesthetic morbidity in children: A database of 24,165 anaesthetics over a 30 month period. *Paediatr Anaesth*. 2004.
93. Braz L, Braz J, Modolo N, do Nascimento P, Brushi B, de Carvalho L. Perioperative cardiac arrest and its mortality in children. A 9year survey in a Brazilian tertiary teaching hospital. *Paediatr Anaesth*. 2006.
94. Morray J. Cardiac arrest in anesthetized children: recent advances and challenges for the future. *Pediatr Anesth*. 2011.
95. Ramamoorthy C, Haberkern C, Bhananker S, Domino K, Posner K, Campos J. Anesthesia related cardiac arrest in children with heart disease: Data from the Pediatric Perioperative Cardiac Arrest (POCA) registry. *Anesth Analg*. 2010.
96. De Beritto T. Newborn Sleep: Patterns, Interventions, and Outcomes. *Pediatr Annals*. 2020
97. Huang X-N, Wang H-S, Chang J-J, Wang L-H, Liu X-C, Jiang J-X, et al. Feeding methods, sleep arrangement, and infant sleep patterns: a Chinese population-based study. *World Journal of Pediatrics*. 2015.

98. Haney B, Reavey D, Atchison L, Poull J, Dryer L, Anderson B, et al. Magnetic resonance imaging studies without sedation in the neonatal intensive care unit: safe and efficient. *J Perinat Neonatal Nurs*. 2010;24(3):256-66.
99. Janos S, Schooler GR, Ngo JS, Davis JT. Free-breathing unsedated MRI in children: Justification and techniques. *J Magn Reson Imaging*. 2019;50(2):365-76.
100. Kurugol S, Seager CM, Thaker H, Coll-Font J, Afacan O, Nichols RC, et al. Feed and wrap magnetic resonance urography provides anatomic and functional imaging in infants without anesthesia. *J Pediatr Urol*. 2020;16(1):116-20.
101. Mathur AM, Neil JJ, McKinstry RC, Inder TE. Transport, monitoring, and successful brain MR imaging in unsedated neonates. *Pediatr Radiol*. 2008;38(3).
102. Weng W, Reid A, Thompson A, Kuthubutheen J. Evaluating the success of a newly introduced Feed and Wrap protocol in magnetic resonance imaging scanning of the temporal bone for the evaluation of congenital sensorineural hearing loss. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2020;132:109910.
103. Tsiflikas I, Obermayr F, Werner S, Teufel M, Fuchs J, Schäfer JF. Functional magnetic resonance urography in infants: feasibility of a feed-and-sleep technique. *Pediatr Radiol*. 2019;49(3):351-7.
104. Templeton LB, Norton MJ, Goenaga-Díaz EJ, McLaughlin DH, Zapadka ME, Templeton TW. Experience with a "Feed and Swaddle" program in infants up to six months of age. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2020;64(1):63-8.
105. Shariat M, Mertens L, Seed M, Grosse-Wortmann L, Golding F, Mercer-Rosa L, et al. Utility of feed-and-sleep cardiovascular magnetic resonance in young infants with complex cardiovascular disease. *Pediatr Cardiol*. 2015;36(4):809-12.
106. Hüppi PS, Warfield S, Kikinis R, Barnes PD, Zientara GP, Jolesz FA, et al. Quantitative magnetic resonance imaging of brain development in premature and mature newborns. *Ann Neurol*. 1998;43(2):224-35.
107. Sury MR, Harker H, Begent J, Chong WK. The management of infants and children for painless imaging. *Clin Radiol*. 2005;60(7):731-41.
108. Fogel MA, Pawlowski TW, Harris MA, Whitehead KK, Keller MS, Wilson J, et al. Comparison and usefulness of cardiac magnetic resonance versus computed tomography in infants six months of age or younger with aortic arch anomalies without deep sedation or anesthesia. *Am J Cardiol*. 2011;108(1):120-5.
109. Dean DC, 3rd, Dirks H, O'Muircheartaigh J, Walker L, Jerskey BA, Lehman K, et al. Pediatric neuroimaging using magnetic resonance imaging during non-sedated sleep. *Pediatr Radiol*. 2014;44(1):64-72.
110. Harrington SG, Jaimes C, Weagle KM, Greer MC, Gee MS. Strategies to perform magnetic resonance imaging in infants and young children without sedation. *Pediatr Radiol*. 2022;52(2):374-81.
111. Harned RK, 2nd, Strain JD. MRI-compatible audio/visual system: impact on pediatric sedation. *Pediatr Radiol*. 2001;31(4):247-50.
112. Torres ER, Tumey TA, Dean DC, 3rd, Kassahun-Yimer W, Lopez-Lambert ED, Hitchcock ME. Non-pharmacological strategies to obtain usable magnetic resonance images in non-sedated infants: Systematic review and meta-analysis. *Int J Nurs Stud*. 2020;106:103551.
113. Watson AT, Visram A. Children's preoperative anxiety and postoperative behaviour. *Paediatr Anaesth*. 2003;13(3):188-204.

114. Hearst D. The Runaway Child: managing anticipatory fear, resistance and distress in children undergoing surgery. *Paediatr Anaesth*. 2009;19(10):1014-6.
115. Statistisches Bundesamt (Destatis). Krankheitskosten, Krankheitskosten je Einwohner: Deutschland, Jahre, Geschlecht, Altersgruppen. 2022
116. Hirsch FW, Frahm J, Sorge I, Klee D, Prenzel F, Krause M, et al. Real-time MRI: a new tool of radiologic imaging in small children. *European Journal of Pediatrics*. 2023;182(8):3405-17.
117. Gräfe D, Sorge I, Hirsch F. Echtzeit-MRT: Eine Revolution in der Kinderradiologie? *Kinder- und Jugendmedizin*. 2024;24:266-72.
118. Schlegel W, Karger CP, Jäkel O. Medizinische Physik: Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik. Berlin-Heidelberg: Springer 2018.
119. Nitz WR. MRT-Guide für MTRA/RT. Stuttgart: Thieme 2012.
120. Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B. Wie funktioniert MRI?: Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung. Berlin-Heidelberg: Springer 2014.
121. Brant-Zawadzki M, Gillan G, Nitz W. MP RAGE: a three-dimensional, T1-weighted, gradient-echo sequence-initial experience in the brain *Radiology*. 1992;182.
122. Peters S. Suszeptibilitätsgewichtete Bildgebung in der Neuroradiologie. *Radiologie up2date* 2014;14(1).
123. Capizzano AA, Moritani T. Diffusion-Weighted MR Imaging of the Brain, Head and Neck, and Spine. Berlin - Heidelberg: Springer 2021.
124. Bonnet CS, Tóth É. Metal-based environment-sensitive MRI contrast agents. *Current Opinion in Chemical Biology*. 2021;61:154-69.
125. Lohrke J, Frenzel T, Endrikat J, Alves F, Grist T, Law M, et al. 25 Years of Contrast-Enhanced MRI: Developments, Current Challenges and Future Perspectives. *Advances in Therapy*. 2016;33(1).
126. Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte. Gadoliniumhaltige Kontrastmittel: Gadoliniumablagerungen im Gehirn und anderen Geweben 2024 [Available from: https://www.bfarm.de/SharedDocs/Risikoinformationen/Pharmakovigilanz/DE/RV_STP/g-l/gadolinium-kernspin-neu.html.
127. Stojanov D, Aracki-Trenkic A, Benedeto-Stojanov D. Gadolinium deposition within the dentate nucleus and globus pallidus after repeated administrations of gadolinium-based contrast agents-current status. *Neuroradiology*. 2016;58(5):433-41.
128. Hu HH, Pokorney A, Towbin RB, Miller JH. Increased signal intensities in the dentate nucleus and globus pallidus on unenhanced T1-weighted images: evidence in children undergoing multiple gadolinium MRI exams. *Pediatr Radiol*. 2016;46(11):1590-8.
129. Schöckel L, Balzer T, Pietsch H. Erhöhte Signalintensitäten und Gadolinium-Werte im Gehirn nach Gabe Gadolinium-haltiger MR-Kontrastmittel. *Der Radiologe*. 2019;59(4):359-68.
130. Neeley C, Moritz M, Brown JJ, Zhou Y. Acute side effects of three commonly used gadolinium contrast agents in the paediatric population. *Br J Radiol*. 2016;89(1063).
131. Guerbet. Fachinformation Dotarem 0,5 mmol/ml Injektionslösung in Fertigspritzen 2019 30.6.2023.

132. Gerard C, Harris K, Thach B. Spontaneous arousals in supine infants while swaddled and unswaddled during rapid eye movement and quiet sleep. *Pediatrics*. 2002;110(6).
133. Fahrmeir L, Heumann C, Künstler R, Pigeot I, Tutz G. Statistik: Der Weg zur Datenanalyse. Berlin-Heidelberg: Springer 2016.
134. Tiradentes TAA, Einav S, Braz JRC, Nunes-Nogueira VS, Betini M, Corrente JE, et al. Global anaesthesia-related cardiac arrest rates in children: a systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth*. 2023;131(5):901-13.
135. Stockwell DC, Landrigan CP, Toomey SL, Loren SS, Jang J, Quinn JA, et al. Adverse Events in Hospitalized Pediatric Patients. *Pediatrics*. 2018;142(2).
136. Disma N, Asai T, Cools E, Cronin A, Engelhardt T, Fiadjoe J, et al. Airway management in neonates and infants: European Society of Anaesthesiology and Intensive Care and British: Journal of Anaesthesia: joint guidelines. *European Journal of Anaesthesiology | EJA*. 2024;41(1).
137. Rossaint R, Werner C, Zwissler B. Die Anästhesiologie Berlin-Heidelberg: Springer; 2019.
138. Sury MR, Hatch DJ, Deeley T, Dicks-Mireaux C, Chong WK. Development of a nurse-led sedation service for paediatric magnetic resonance imaging. *Lancet*. 1999;353(9165):1667-71.
139. Sury MR, Hatch DJ, Millen W, Chong K. The debate between sedation and anaesthesia for children undergoing MRI. *Arch Dis Child*. 2000;83(3):276.
140. Bevan JC, Johnston C, Haig MJ, Tousignant G, Lucy S, Kirnon V, et al. Preoperative parental anxiety predicts behavioural and emotional responses to induction of anaesthesia in children. *Can J Anaesth*. 1990;37(2):177-82.
141. Hatava P, Olsson GL, Lagerkranser M. Preoperative psychological preparation for children undergoing ENT operations: a comparison of two methods. *Paediatr Anaesth*. 2000;10(5):477-86.
142. Allen JG, Sury MR. Sedation of children undergoing magnetic resonance imaging. *Br J Anaesth*. 2006;97(6):898-9; author reply 9.
143. Hwang M, Barton K, Kim JS, Machnitz AJ, Holm T, Maianski I, et al. Utilization of neonatal sedation and anesthesia: an SPR survey. *Pediatric Radiology*. 2022.

9. Danksagung

Mein ausdrücklicher Dank gilt meiner Doktormutter für die Bereitstellung des Dissertationsthemas sowie für die hervorragende Betreuung.

Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer für die außerordentliche Betreuung, die kontinuierliche Unterstützung und die jederzeit hilfreiche und konstruktive Beratung bei der Ausarbeitung dieser Dissertation.

Außerdem danke ich dem gesamten Team der Kinderradiologie für die kollegiale und freundliche Unterstützung.

Ein besonderer Dank gilt meinen Freunden, die mich durch ihre Unterstützung, Motivation und Hilfsbereitschaft in allen Phasen dieser Arbeit begleitet haben. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Katja, die mir seit dem Studium mit Geduld, Verständnis und unermüdlichem Rückhalt zur Seite steht und mich sowohl während der Promotion als auch im Berufsleben stets unterstützt und ermutigt hat.

10. Lebenslauf