



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der  
Strahlenschutzkommission  
Postfach 12 06 29  
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

---

## **Bildgebende Diagnostik bei Kindern**

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

---

Verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22./23. September 2022

## Vorwort

In den letzten zehn Jahren haben sich die bildgebenden Verfahren technisch beträchtlich weiterentwickelt. Moderne digitale Röntgenverfahren, Hybridtechniken wie PET-CT, PET-MRT und SPECT-CT und insbesondere auch die Multidetektor-Computertomografie mit neuen Detektor- und Bildrekonstruktionstechnologien werden immer häufiger in der Diagnostik angewendet. Für diagnostische Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren an Kindern und Jugendlichen haben sich hierdurch relevante Änderungen hinsichtlich der rechtfertigenden Indikation und der technischen Durchführung von Röntgenverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Strahlenschutzes ergeben.

Aufgrund der zahlreichen Neu- und Weiterentwicklungen hinsichtlich Methodik und Gerätetechnologie seit Erscheinen der Empfehlung „Bildgebende Diagnostik beim Kind – Strahlenschutz, Rechtfertigung und Effektivität“ der Strahlenschutzkommission (SSK) im Jahr 2006 wird eine Anpassung der damals gegebenen Empfehlungen entsprechend dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand erforderlich. Zusätzlich sollte die Empfehlung auf das Anwendungsgebiet Nuklearmedizin erweitert werden.

An der notwendigen Aktualisierung der Empfehlung aus dem Jahr 2006 durch eine Arbeitsgruppe des Ausschusses „Strahlenschutz in der Medizin“ der SSK mit Expertise aus der Kinderradiologie, der Nuklearmedizin und der Medizinphysik haben mitgewirkt:

- Prof. Dr. Gundula Staatz, Sektion Kinderradiologie, Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
- Prof. Dr. Franz Wolfgang Hirsch, Institut für Kinderradiologie, Universitätsklinikum Leipzig
- Dipl.-Ing. Horst Lenzen, Klinik für Radiologie, Universitätsklinikum Münster
- Prof. Dr. Hans-Joachim Mentzel, Sektion Kinderradiologie, Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Jena
- Prof. Dr. Jürgen Schäfer, Bereich Kinderradiologie, Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universitätsklinikum Tübingen
- PD Dr. Thekla von Kalle, Radiologisches Institut – Olgahospital, Klinikum Stuttgart
- Prof. Dr. Dr. Lars Stegger, Klinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Münster

*Prof. Dr. Gundula Staatz*  
Vorsitzende der  
Arbeitsgruppe  
„Überarbeitung der SSK-  
Empfehlung zur  
bildgebenden Diagnostik  
bei Kindern“

*Prof. Dr. Günter Layer*  
Vorsitzender des  
Ausschusses  
„Strahlenschutz in der  
Medizin“

*Prof. Dr. Werner Rühm*  
Vorsitzender der  
Strahlenschutzkommission

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Empfehlungen</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Besonderheiten der diagnostischen Strahlenexposition im Kindesalter</b> .....	<b>6</b>
3.1	Biologische Besonderheiten .....	6
3.1.1	Höhere Strahlensensibilität .....	6
3.1.2	Körpergröße und Anatomie .....	7
3.1.3	Genetisches Risiko.....	7
3.2	Risiko für Strahlenschäden.....	7
3.3	Besonderheiten bei der Untersuchung von Kindern .....	8
<b>4</b>	<b>Verfahren ohne ionisierende Strahlung</b> .....	<b>9</b>
4.1	Sonografie .....	9
4.2	MRT.....	10
<b>5</b>	<b>Optimierung des Strahlenschutzes bei Anwendung ionisierender Strahlung</b> <b>11</b>	
5.1	Projektionsradiografie .....	11
5.1.1	Aspekte der Gerätetechnologie .....	11
5.1.2	Aufnahmetechnik (Filterung, Röhrenspannung, Raster) .....	12
5.1.3	Bildempfang mit digitalen Speicherfoliensystemen und Flachdetektoren ..	13
5.1.4	Patienten-Strahlenschutzmittel .....	13
5.2	Durchleuchtung .....	14
5.2.1	Aspekte der Gerätetechnologie .....	14
5.2.2	Diagnostik (MCU, MDP, Kolon-KE).....	15
5.3	Computertomografie .....	17
5.3.1	Gerätetechnologie und Wahl von Parametern .....	17
5.3.2	Rechtfertigende Indikation .....	18
5.3.3	Kindgerechte Durchführung einer CT .....	19
5.3.4	Diagnostische Referenzwerte für pädiatrische CT-Untersuchungen .....	21
5.4	Nuklearmedizinische Verfahren (planare Szintigrafie, SPECT, PET) .....	22
5.4.1	Technische und organisatorische Optimierung .....	22
5.4.2	Rekonstruktionsverfahren.....	23
5.4.3	Spezielle Aspekte der Hybridverfahren (PET-CT, PET-MRT, SPECT-CT) .....	23
<b>6</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>25</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>34</b>
	<b>A-1 Tabellen</b> .....	<b>34</b>
	<b>A-2 Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>37</b>

## 1 Einleitung

Nach Artikel 61 Absatz 1 Buchstabe a der Richtlinie 2013/59/Euratom zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition durch ionisierende Strahlung vom 05. Dezember 2013 (Euratom 2013) wird gefordert, dass die Mitgliedsstaaten „geeignete medizinisch-radiologische Ausrüstungen, Verfahren und Zusatzausrüstung [...] für medizinische Expositionen von Kindern“ verwenden.

Diese Vorgabe wurde in § 86 des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG 2017) mit einer „Verordnungsermächtigung zum Schutz von Personen bei der Anwendung ionisierender Strahlung oder radioaktiver Stoffe am Menschen“ umgesetzt und in der „Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts“ (StrlSchV 2018) folgendermaßen ausgeführt:

„Der Strahlenschutzverantwortliche hat dafür zu sorgen, dass bei der Anwendung ionisierender Strahlung oder radioaktiver Stoffe an Personen unter 18 Jahren geeignete Verfahren sowie Ausrüstungen, Geräte und Vorrichtungen verfügbar sind und eingesetzt werden, um der besonderen Strahlenempfindlichkeit dieser Personen Rechnung zu tragen“ (§ 120 Absatz 3 StrlSchV).

Im Strahlenschutzrecht stehen bei der Anwendung von ionisierender Strahlung am Menschen die Rechtfertigung, die Einhaltung von Grenz- und Referenzwerten und die Optimierung der Strahlenexposition im Vordergrund. So dürfen gemäß § 83 Abs. 3 StrlSchG Röntgenstrahlung und radioaktive Stoffe in Ausübung der Heilkunde nur angewendet werden, wenn eine individuelle rechtfertigende Indikation von einer Ärztin oder einem Arzt mit der erforderlichen Fachkunde im Strahlenschutz gestellt wurde. Diagnostische Verfahren ohne Exposition durch ionisierende Strahlung – wie z. B. Sonografie und Magnetresonanztomografie – sind als Alternative angemessen zu berücksichtigen und bei Kindern und Jugendlichen bei gleichwertiger diagnostischer Aussage bevorzugt auszuwählen.

Gemäß § 83 Abs. 5 StrlSchG ist die durch eine Anwendung bedingte Strahlenexposition so weit einzuschränken, wie dies mit den Möglichkeiten der Medizintechnik realisierbar ist. Die suffiziente Beantwortung der medizinischen Fragestellung sollte die Bildqualität und damit die Dosis bestimmen, das heißt, jeder Ansatz zur Dosisminimierung muss immer auch die erforderliche Bildqualität berücksichtigen.

Bei der Anwendung von ionisierender Strahlung und radioaktiven Stoffen an Kindern sind diese Grundsätze aufgrund deren höherer Strahlensensibilität besonders eng zu fassen. Anders als bei der im Jahr 2019 aktualisierten Empfehlung der SSK „Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren“, welche für diverse klinische Fragestellungen das am besten geeignete bildgebende Verfahren unter besonderer Berücksichtigung des Strahlenschutzes empfiehlt, lag der Schwerpunkt der Empfehlung „Bildgebenden Diagnostik beim Kind – Strahlenschutz, Rechtfertigung und Effektivität“ der SSK aus dem Jahr 2006 auf der Optimierung des Strahlenschutzes durch Anwendung und Nutzung der geeigneten Gerätetechnologie und Aufnahmetechnik.

In einem Beratungsauftrag vom 19. Juli 2017 schrieb das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):

*„In den letzten 10 Jahren wurden die bildgebenden Verfahren technisch enorm weiterentwickelt. Moderne digitale Röntgenverfahren, Hybridtechniken, wie das PET-CT / PET-MRT und insbesondere auch die Multidetektor-Computertomografie mit automatischer Dosismodulation werden immer häufiger in der Diagnostik angewendet. Für diagnostische Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren an Kindern und Jugendlichen haben sich hierdurch ebenfalls relevante Änderungen hinsichtlich der rechtfertigenden Indikation und der technischen Durchführung von Röntgenverfahren unter besonderer Einhaltung des Strahlenschutzes ergeben.“*

Aus diesen Gründen wurde die SSK gebeten, die Empfehlung aus dem Jahr 2006 anhand des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zu aktualisieren.

## 2 Empfehlungen

Die SSK betont die Bedeutung der rechtfertigenden Indikation als wesentliche Grundlage für den Strahlenschutz bei der Anwendung von ionisierender Strahlung bei Kindern und Jugendlichen. Die Anwendung ionisierender Strahlen gehört über die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz hinaus in die Hand kinderradiologisch bzw. in nuklearmedizinischer Bildgebung geschulter Ärzt\*innen und erfordert zudem eine für die Untersuchung von Kindern geeignete Untersuchungstechnik und Umgebung sowie im Umgang mit Kindern geschultes radiologisch-technisches Personal. Es ist im Rahmen der bildgebenden Diagnostik – insbesondere bei Kindern – entsprechend der StrlSchV generell den Verfahren ohne Anwendung ionisierender Strahlung (Sonografie und Magnetresonanztomografie (MRT)) der Vorzug zu geben.

Alle Möglichkeiten zur Herabsetzung der Strahlenexposition sind zu nutzen. Daher empfiehlt die SSK:

- Die Basisuntersuchung in der bildgebenden Diagnostik im Kindesalter soll die Sonografie sein<sup>1</sup>. Analog zu ionisierenden Verfahren sollte das ALARA-Prinzip zur Anwendung kommen (Kollmann et al. 2020), insbesondere bei Neugeborenen und Säuglingen bzw. bei speziellen Anwendungen (z. B. Kontrastmittelsonografie, Elastografie).
- Die MRT sollte, außer beim akuten schweren Schädel-Hirn-Trauma bzw. dem Polytrauma, bei besserer oder gleicher diagnostischer Aussagekraft gegenüber der Computertomografie (CT) bevorzugt als weiterführendes diagnostisches Verfahren eingesetzt werden. Bei Kleinkindern, die häufig eine Sedierung benötigen, soll das größere Sedierungsrisiko während der MRT in der Indikationsstellung zur MRT berücksichtigt werden.
- Bei der Durchführung radiografischer Untersuchungen am Kind soll eine geeignete apparative Voraussetzung vorhanden sein (Schaltzeit, Spannung, Filterung). Dosisreduktionen sollen indikations- und fragestellungsbezogen vorgenommen werden. In der Pädiatrie sollen Detektoren mit hoher DQE eingesetzt werden. Eine optimierte Einblendung ist obligat und zählt zu den wichtigsten Elementen des Strahlenschutzes. Beim Einsatz von Strahlenschutzmitteln sollen dosissteigernde Effekte vermieden werden. Insbesondere bei strahlenintensiven Untersuchungen (z. B. Röntgen Abdomen, Becken, Wirbelsäule) sollen alternative Verfahren bei vergleichbarer Aussagekraft bevorzugt eingesetzt werden.
- Durchleuchtungsuntersuchungen beim Kind sollen an Geräten mit gepulster Durchleuchtung, herausnehmbarem Raster und Zusatzfilterung durchgeführt werden. Bei Anlagen, die nicht über eine digitale, dosisneutrale Zoomfunktion verfügen, sollen Untersuchungen mit möglichst geringem Zoomfaktor durchgeführt werden. Die Einblendung soll bezogen auf die Fragestellung streng vorgenommen werden. Die Dokumentation sollte bevorzugt über das meist diagnostisch ausreichende digitale Speicherbild (Last Image Hold) erfolgen. Das Dosis-Flächen-Produkt und die Durchleuchtungszeit sollen dokumentiert werden. Bei der Indikationsprüfung einer Durchleuchtungsuntersuchung sollen Alternativverfahren bei gleicher Aussagekraft bevorzugt eingesetzt werden (z. B. Miktionsurosonografie anstelle Miktionszysturethrografie).

---

<sup>1</sup> Für die Anwendung von Ultraschall am Menschen siehe auch SSK 2012.

- Bei der Computertomografie soll die Dosisreduktion entsprechend der Fragestellung erfolgen, u. a. über die Reduktion des effektiven Röhrenstrom-Zeit-Produktes (mAs) und der Spannung (kV). Für die CT-Untersuchung von Kindern sollen geeignete Untersuchungsprotokolle vorliegen und angewandt werden. Spezielle Fort- und Weiterbildungen für Ärzt\*innen und das radiologisch-technische Personal im Hinblick auf die rasche Weiterentwicklung der Dosisreduktion im CT sollen erfolgen, um Verfahren zur Dosisoptimierung (u. a. iterative Rekonstruktion, möglicherweise auch künstliche Intelligenz), gezielt und mit dem nötigen Wissen anwenden zu können. Die aktuellen diagnostischen Referenzwerte sind einzuhalten.
- Für nuklearmedizinische Untersuchungen soll eine gewichtsadaptierte Verringerung der injizierten Aktivitätsmenge des Radiopharmakons im Vergleich zu Erwachsenen im Vordergrund stehen.
- Beim Einsatz der PET-CT soll individuell geprüft werden, ob eine diagnostische CT-Komponente erforderlich ist.
- Die PET-MRT sollte bei entsprechender Verfügbarkeit bevorzugt zur PET-CT eingesetzt werden.

### **3 Besonderheiten der diagnostischen Strahlenexposition im Kindesalter**

#### **3.1 Biologische Besonderheiten**

##### **3.1.1 Höhere Strahlensensibilität**

Kinder sind, u. a. aufgrund höherer Zellteilungsraten des wachsenden Körpers, besonders strahlensensibel. Der Einfluss moderater Dosen ionisierender Strahlung auf Entwicklung und Reifung der Organsysteme (z. B. kognitive Funktion) sind Gegenstand der Forschung und werden diskutiert (Pasqual et al. 2020). Dosisabhängig sind Schädigungen bei Kindern bekannt (z. B. Augenlinse, Herz, Hirn; (Chu et al. 2020)). Im Vergleich zum Erwachsenen haben Kinder zudem eine längere verbleibende Lebenserwartung und daher ein höheres Lebenszeitrisiko für eine strahlenbedingte Krebserkrankung. Nach einer Strahlenexposition im Kindesalter bleibt das Risiko für viele maligne Erkrankungen lebenslang erhöht (Linet et al. 2012). Nachbeobachtungen von Kindern, die in der Vergangenheit zur Behandlung benigner Erkrankungen wie Hämangiomen und Tinea capitis bestrahlt wurden, sowie die Life Span Study der Atombombenüberlebenden haben gezeigt, dass für Kinder die Schilddrüse, die Brustdrüse, das Knochenmark, das Gehirn und die Haut zu den radiosensitivsten Organen gehören (Kleinerman 2006, UNSCEAR 2013). Diese Erkenntnisse führten international zu Empfehlungen und Maßnahmen zur Reduktion der medizinischen Strahlenexposition (Goodman et al. 2019).

Auch die medizinische Betreuung sehr kleiner Frühgeborener kann eine Diagnostik mit ionisierender Strahlung erfordern. Dadurch werden in solchen Fällen eigentlich noch fetale Zellen exponiert. Wenngleich das Risiko für Fehlbildungen und Fehlentwicklungen in der Fetalzeit als geringer eingeschätzt wird als in der Embryonalzeit (Organbildungs-Periode), wird die Bedeutung des stochastischen Effektes für die sehr unreifen Kinder erst in einigen Jahrzehnten zu beurteilen sein (Tomà et al. 2019). In den 1950er Jahren ermittelte die Oxford Study of Childhood Cancers (OSCC) für Kinder, die in der Schwangerschaft Röntgenaufnahmen des mütterlichen Beckens ausgesetzt waren, ein auf das Doppelte erhöhtes Risiko für eine Krebserkrankung im Kindesalter (Giles et al. 1956). Die Metaanalyse neuerer Daten konnte kein statistisch signifikant erhöhtes Risiko nachweisen (Abalo et al. 2021).

### 3.1.2 Körpergröße und Anatomie

Aufgrund der großen Spannweite an Körpergrößen zwischen Frühgeborenen und Adoleszenten können technische Parameter für Röntgenuntersuchungen und allgemeine diagnostische Referenzwerte (DRW) für Kinder nicht angegeben werden, sondern müssen das jeweilige Körpergewicht berücksichtigen. Die Anatomie des kindlichen Körpers unterscheidet sich umso stärker vom Erwachsenen, je jünger das Kind bzw. je geringer seine Körpergröße ist. So liegen strahlensensible Organe bei geringer Körpergröße sehr viel näher an einem exponierten Feld als beim Erwachsenen (z. B. Schilddrüse und Ovarien bei Thoraxaufnahmen) und werden bei unzureichender Einblendung mit exponiert. Eine geringe zusätzliche Öffnung der Blende um 1 cm bewirkt bei einem Frühgeborenen bereits eine signifikante Erhöhung der Feldgröße und damit der gesamten Strahlenexposition (Schneider und Seidenbusch 2019). Zu bedenken ist auch, dass kleine Kinder relativ mehr (strahlensensibles) rotes Knochenmark in Extremitäten und Kalotte haben, welches bei unzureichender Einblendung oder fehlender Beschränkung der Scanlänge in der CT unnötig exponiert wird.

### 3.1.3 Genetisches Risiko

Kinder sind potenzielle zukünftige Eltern, so dass die genetischen Effekte der Einwirkung ionisierender Strahlung auf die Gonaden beim Kind mit ihren Auswirkungen auf das Erwachsenenalter zu berücksichtigen sind. Nach bisherigen Erkenntnissen konnte beim Menschen bislang kein Zusammenhang zwischen einer Strahlenexposition und dem Auftreten von genetischen Schäden epidemiologisch nachgewiesen werden (Boice et al. 2003, Nielsen et al. 2018).

## 3.2 Risiko für Strahlenschäden

Eine wichtige Einflussgröße auf das Strahlenrisiko ist das Alter, in dem eine Exposition stattfindet. Entsprechend den ICRP-Publikationen 103, 121 und 147 (ICRP 2007, ICRP 2013, 2021) haben Kinder, die einer diagnostischen Strahlenexposition ausgesetzt waren, ein höheres zusätzliches Lebenszeitrisko für Krebserkrankungen als Personen, die im Erwachsenenalter exponiert wurden. Nach UNSCEAR unterscheiden sich die Lebenszeitriskiken um den Faktor zwei bis drei (UNSCEAR 2013). Der Effekt ist umso gravierender, je jünger das Kind ist. Entsprechend ist die Indikation zum Einsatz ionisierender Strahlung v. a. bei Neugeborenen, Säuglingen, Kleinkindern noch strenger zu prüfen.

Stochastische Strahlenschäden sind dadurch charakterisiert, dass ihre Eintrittswahrscheinlichkeit mit steigender Dosis zunimmt. Entsprechend dem im Strahlenschutz angewandten Linear-No-Threshold-Modell (LNT-Modell) wird angenommen, dass ohne Schwellenwert das Risiko auch für niedrige Dosen proportional erhöht ist. Die Schwere der resultierenden Erkrankung ist im LNT-Modell von der Dosis unabhängig. Vermutlich sind radiobiologische Effekte niedriger Dosen aber komplexer als mit diesem einfachen LNT-Modell anzunehmen. Auch wenn die absoluten Zahlen niedrig sind, liefern retrospektive Studien Hinweise auf eine Erhöhung des Lebenszeitriskikos für Krebserkrankungen nach diagnostischen CTs im Kindesalter (z. B. Mathews et al. 2013, Pearce et al. 2012, Meulepas et al. 2019). Für die zitierten Studien werden mögliche Schwächen hinsichtlich Verzerrungen (Bias) und zu wenig differenzierter Daten diskutiert (Walsh et al. 2014). Möglicherweise werden die Ergebnisse der umfangreichen multizentrischen europäischen EPI-CT-Studie<sup>2</sup> hinsichtlich des Krebsrisikos im Zusammenhang mit CT-Untersuchungen nach einer längeren Nachbeobachtungszeit ein klareres Bild liefern (Bernier et al. 2019). Die Literaturlage zum Strahlenrisiko durch konventionelle Projektionsradiografien ist uneinheitlich (Abalo et al. 2021, Goodman et al. 2019).

---

<sup>2</sup> <https://epi-ct.iarc.fr/>

Nach heutigem Kenntnisstand treten sowohl strahlenbedingte Leukämien als auch solide Tumoren (zum Beispiel in Schilddrüse, Hirn, Brustdrüse und Darm) mit einer Latenzzeit auf. In der Regel beträgt diese bei Leukämien mindestens zwei bis fünf Jahre, bei den soliden Tumoren dagegen mindestens 10 bis 15 Jahre (Linnet et al. 2012, Kleinerman 2006, Goodman et al. 2019). Auch Jahrzehnte nach Strahlenexposition können noch strahlenbedingte Leukämien und solide Tumoren auftreten. Bei malignen Erkrankungen, die typischerweise erst im Erwachsenenalter auftreten, wie z. B. Brustkrebs, macht sich nach einer Exposition in jungen Jahren eine strahlenbedingte Erhöhung der Krebsraten erst in entsprechend höheren Lebensaltern bemerkbar. Daher können nur sehr große epidemiologische Studien mit langer Nachbeobachtungszeit ausreichend valide Aussagen zum Strahlenrisiko nach relativ geringer Exposition in jungen Jahren ermöglichen.

### 3.3 Besonderheiten bei der Untersuchung von Kindern

Bei allen Bemühungen um Dosisreduktion darf die Bildqualität nicht außer Acht gelassen werden, denn jede diagnostisch nicht verwendbare Röntgenaufnahme oder CT ist eine vermeidbare Strahlenexposition. Diagnostisch adäquat sein muss sowohl die applizierte Dosis, die verwendete Hardware und die Nachverarbeitung durch die implementierte Software als auch für die Patientenlagerung und die daraus resultierende Projektion. Der adäquate Umgang mit Kindern erfordert geschultes und engagiertes Röntgenassistentenpersonal. Einerseits sind einfühlsames Vorgehen und Flexibilität im Umgang mit kranken Kindern sehr wichtig, andererseits dürfen nicht aus übertriebener Vorsicht heraus Fehlprojektionen entstehen, da auch sie eine unnötige Strahlenexposition bedeuten. So sollten z. B. auch bei kleinen, nicht kooperationsfähigen Kindern Thoraxaufnahmen in Inspiration angestrebt und verletzte Extremitäten in orthograde Projektion geröntgt werden.

Pädiatrische Besonderheiten bei den radiografischen Einstelltechniken und CT-Parametern wurden publiziert (Becht et al. 2019, Sorantin 2013) und sind unbedingte Voraussetzung für eine adäquate Diagnostik. Kleine Kinder müssen für die jeweilige Untersuchung sicher immobilisiert werden, um Fehlprojektionen und Bewegungsartefakte zu vermeiden. Entsprechende Hilfsmittel (Schaumstoffkeile, Sandsäcke, Strahlenschutzhandschuhe) müssen ebenso wie Patienten-Strahlenschutzmittel (z. B. Gonadenschutz) (SSK 2022) in ausreichender Auswahl zur Verfügung stehen (BMU 2009) und sind entsprechend der Empfehlung „Verwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln bei röntgendiagnostischen Anwendungen“ (SSK 2022) zu verwenden. Das Personal soll entsprechend gut angeleitet sowie umfassend und regelmäßig geschult werden (Lenzen et al. 2021).

Bei länger dauernden Untersuchungen wie Durchleuchtungen können kindgerechte Raumausstattung sowie Audio- oder Videogeräte nicht nur für eine freundliche Atmosphäre sorgen, sondern ganz entscheidend zum Gelingen einer Untersuchung mit möglichst kurzer Durchleuchtungszeit beitragen.

Grundsätzlich sollte bei allen Untersuchungen die Strahlenexposition durch Einblendung, geeignete Wahl der Parameter und Lagerung soweit wie möglich reduziert werden. Dies gilt für alle Untersuchungen mit ionisierender Strahlung wie Röntgenaufnahmen, Durchleuchtungen, Digitale Volumetomografie und CT sowie nuklearmedizinische Untersuchungen.

Bei Kleinkindern sind aufgrund der mangelnden Kooperationsfähigkeit häufig Sedierungen oder Narkosen erforderlich, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Insbesondere bei Kindern, die zur Immobilisierung eine Sedierung benötigen, soll das größere Sedierungsrisiko in der Indikationsstellung berücksichtigt werden.

## 4 Verfahren ohne ionisierende Strahlung

Aufgrund möglicher negativer Auswirkungen ist vor jedem Einsatz von ionisierender Strahlung im Kindes- und Jugendalter beim Stellen der rechtfertigenden Indikation nach alternativen Untersuchungsmethoden zu suchen und diesen, bei für die Fragestellung ausreichender Aussagekraft, der Vorzug zu geben. Bei der Entscheidungsfindung ist neben umfangreichen Kenntnissen zu physikalisch-technischen Möglichkeiten und Grenzen der Methoden ein breiter Erfahrungsschatz zur Physiologie, Entwicklung und Pathologie im Kindes- und Jugendalter erforderlich – vom extrem Frühgeborenen mit 300 g Gewicht bis zum/zur Adoleszenten mit einem Körpergewicht von 150 kg. Der indikationsgerechte Einsatz von Sonografie und Magnetresonanztomografie anstelle einer Stufendiagnostik ist abgesehen von der Reduktion der Strahlenexposition infolge der Zeitersparnis auch ökonomisch vorteilhaft.

### 4.1 Sonografie

Die Sonografie ist im Kindes- und Jugendalter die bilddiagnostische Basisuntersuchung und aufgrund innovativer technischer Entwicklungen bei Schallköpfen, Hardware, Rechner- und Applikationssoftware oft das einzige bildgebende Verfahren, das zur Diagnostik erforderlich ist (Hwang et al. 2019). Mittlerweile kann die Bildgebung an allen Organsystemen mittels Sonografie erfolgen. Vorteil dieser Methode ist nicht nur, dass sie ohne Strahlenexposition auskommt; wesentlich sind auch die breite Verfügbarkeit und hohe Mobilität der Untersuchung mit der Möglichkeit zur Untersuchung im Inkubator oder am Patientenbett. Innovationen im Ultraschall wie Elastografie und Kontrastmittelsonografie haben dazu geführt, dass einige Untersuchungsverfahren mit ionisierender Strahlung ersetzt werden können. Die kontrastverstärkte Miktionsurosonografie (MUS) ist bei der Refluxdiagnostik eine echte Alternative zur Röntgen-Miktionscystourethrografie (MCU) (Waginger und Mentzel 2020). Die Ultraschall-Elastografie (UE) der Leber ist einer invasiven Biopsie bei diffusen Leberveränderungen (Fibrose) im Kindesalter vorangestellt. Die sonografisch gestützte Desinvagination mit Flüssigkeitseinlauf ist dem Röntgen-Kontrasteinlauf bei der akuten ileokolischen Invagination vorzuziehen.

Beim Einsatz des Ultraschalls sind mechanische (Kompression und Zerrung von Gewebe (Kavitation), Druckanstieg in Zellen), thermische (Energieabsorption, Erwärmung) und chemische (Dissoziation von Wassermolekülen bei Leistungen von  $3 \text{ W cm}^{-2}$ ) Wirkungen zu beachten. Während therapeutischer Ultraschall durch hohen Energieeintrag mit möglicher Gewebeszerrung potenziell gefährlich ist, wird dies beim diagnostischen Ultraschall nicht erwartet und konnte bisher auch nicht belegt werden. Dennoch ist zu beachten, dass insbesondere bei Früh- und Neugeborenen sowie bei schwer kranken Kindern die Schalleistung und -dauer zu minimieren ist. Dopplerverfahren sind daher mit möglichst geringer Leistung und Einsatzzeit anzuwenden. Das ALARA-Prinzip sollte auch bei der Schädelsonografie der Neugeborenen (Lalzar et al. 2017) wie bei der fetalen Sonografie (SSK 2012) angewendet werden (Cibull et al. 2013, Kollmann et al. 2020). Bei Einsatz von Ultraschallkontrastmitteln besteht in der Kombination mit Dopplerverfahren aufgrund von Schwingungen und Platzen der Mikrobläschen ein höheres Risiko für Kavitation. Für die Standardsonografie im Brightness-mode-Verfahren bestehen keine Einschränkungen unter Beachtung von Qualitätsstandards und Sicherheitshinweisen (z. B. Sonografie des Bulbus oculi und der Orbita nur unter Verwendung spezieller Schallköpfe und Voreinstellungen mit reduziertem mechanischem Index). Entsprechende Normen sehen eine Begrenzung der Energie auf eine Schallintensität von  $50 \text{ mW cm}^{-2}$  am Auge bzw.  $720 \text{ mW cm}^{-2}$  für die anderen Anwendungen vor (DIN EN 60601-2-37).

Die SSK empfiehlt:

Die Basisuntersuchung in der bildgebenden Diagnostik im Kindesalter soll die Sonografie sein<sup>1</sup>. Analog zu ionisierenden Verfahren sollte das ALARA Prinzip zur Anwendung kommen (Kollmann et al. 2020), insbesondere bei Neugeborenen und Säuglingen bzw. bei speziellen Anwendungen (z. B. Kontrastmittelsonografie, Elastografie).

## 4.2 MRT

Die MRT hat sich im Kindesalter mit Ausnahme der Notfalldiagnostik beim Polytrauma, speziellen Fragestellungen am Bewegungsapparat und in der Lunge als bevorzugte Methode bei der erweiterten bildgebenden Diagnostik gegenüber der CT entwickelt, ergänzt um die Hybridverfahren in der pädiatrischen Onkologie. Diffusions- und susceptibilitätsempfindliche Sequenzen, Spektroskopie, dynamische Kontrastmittelstudien, Gefäß- und Perfusions-Untersuchungen ohne Kontrastmittel sowie die Möglichkeit zur Ganzkörperdarstellung und die Reduktion von Artefakten durch Atmung und Bewegung mit Hilfe moderner Akquisitions- und Trigger-Verfahren sind Innovationen in der Untersuchungstechnik, die zur hohen Akzeptanz der MRT im Kindes- und Jugendalter geführt haben. So gelten die Ganzkörper-MRT als Alternative zur Skelettszintigrafie und die funktionelle MR-Urografie bei geeigneter Indikation als Alternative zur MAG3-Szintigrafie (Kirsch und Mentzel 2018, Zadig et al. 2021).

Die hohe Untersuchungsfrequenz und die weite Verbreitung von Geräten mit statischen Magnetfeldern von 1,5 T oder 3,0 T sowie verkürzte Untersuchungszeiten führen zur Kostenreduktion und höherer Wirtschaftlichkeit in der pädiatrischen Radiologie. Bei Kindern sind bei mangelnder Kooperationsfähigkeit häufig Sedierungen oder Narkosen erforderlich, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Sedierungen sind bei MRT-Untersuchungen möglich, die eine überschaubare Untersuchungszeit benötigen. Die MRT in Narkose bei unzureichender Compliance ist nötig, wenn lange Protokolle (z. B. Ganzkörper-Staging-Untersuchungen bei Kindern mit onkologischen Erkrankungen) bzw. Untersuchungen mit Atemanhaltetechniken (z. B. Abdomen-MRT) indiziert sind. Dies ist im Vorfeld der Untersuchung bei der Indikationsstellung und Terminierung zu beachten und zu klären.

Belastend ist für die Kinder neben der Enge der Untersuchungsröhre und der relativ langen Untersuchungszeit insbesondere der hohe Geräuschpegel während der MRT. Die Vermeidung einer möglichen Gefährdung von Kindern durch die nicht-ionisierende Strahlung in der MRT bzw. durch die Untersuchungsbegleitung durch entsprechende Medikationen und durch MRT-Kontrastmittel steht im Vordergrund der Bemühung um höchste Patientensicherheit (Holland et al. 2014). Das gilt ebenso für das ungeborene Leben im Rahmen der fetalen MRT (Zvi et al. 2020).

Beim Einsatz der MRT sind neben dem technischen Gefährdungspotential durch metallische Gegenstände, elektronische Implantate sowie Streufelder v. a. mögliche Bioeffekte von statischen Magnetfeldern des Hauptmagneten ( $B_0$ ) zu bedenken, wobei bei Feldstärken in der diagnostischen Bildgebung von 0,2 T bis 3,0 T keine reproduzierbaren negativen Auswirkungen bekannt sind (ACR 2020).

Durch zeitlich veränderliche magnetische Gradientenfelder kann es über Spannungsinduktion zu Stromfluss im biologischen Organismus kommen, dessen Intensität von der Leitfähigkeit des Gewebes, vom Radius der Leiterschleife und der Änderungsgeschwindigkeit der Gradientenfelder abhängt. So besteht ein erhöhtes Risiko für Hautverbrennungen bei direkten Haut-Haut-Kontakten und Schleifenbildungen, was bei der Patientenlagerung unbedingt beachtet werden muss. Weitere Faktoren sind die räumliche Orientierung der Gradienten zum Gewebe, der Durchmesser des untersuchten Körpers sowie die Frequenz und Dauer der Induktion. Der resultierende Temperaturanstieg ist bei der diagnostischen MRT unter Berücksichtigung von

Grenzwerten (Stromdichte  $30 \mu\text{A cm}^{-2}$  bei  $30 \text{T s}^{-1}$ ) vernachlässigbar. Die Beachtung von Schwellenwerten verhindert mögliche neuromuskuläre Stimulation, zerebrale Anfälle, Arrhythmien und Phosphenerscheinungen.

Gepulste Hochfrequenzfelder (klassische Protonen-Resonanz liegt bei 42 MHz pro Tesla) dienen der Abfrage von Gewebe-Dichten und führen gleichzeitig zur Temperaturerhöhung des Körpergewebes. Schwellenwerte für die absorbierte Hochfrequenzleistung im Körper (Spezifische Absorptionsrate, SAR, Bezug zum Körpergewicht) sind für die MRT verschiedener Regionen vorgegeben, so dass es nicht zu klinisch relevanten Temperaturerhöhungen kommt. Eine Weiterentwicklung von Abfragesequenzen kann aber zu höherer Energiezufuhr und somit höherer SAR führen; dies ist insbesondere bei der Untersuchung von Früh- und Reifgeborenen sowie Säuglingen und Intensivpatient\*innen und bei der fetalen MRT von der (Kinder-) Radiologin oder dem (Kinder-) Radiologen zu beachten (ACR-SPR 2020, Salerno et al. 2018).

Die SSK empfiehlt:

Die MRT sollte, außer beim akuten schweren Schädel-Hirn-Trauma bzw. dem Polytrauma, bei besserer oder gleicher diagnostischer Aussagekraft gegenüber der Computertomografie (CT) bevorzugt als weiterführendes bildgebendes Verfahren eingesetzt werden.

Bei Kleinkindern, die häufig eine Sedierung benötigen, soll das größere Sedierungsrisiko während der MRT in der Indikationsstellung zur MRT berücksichtigt werden.

## **5 Optimierung des Strahlenschutzes bei Anwendung ionisierender Strahlung**

### **5.1 Projektionsradiografie**

#### **5.1.1 Aspekte der Gerätetechnologie**

Bei den Qualitätsanforderungen zum Einsatz der Projektionsradiografie sei auf die aktuellen Leitlinien der Bundesärztekammer verwiesen. Bezüglich der Indikation zur Radiografie hat sich bei verschiedenen Indikationen ein Wechsel zu Untersuchungen ohne ionisierende Strahlung ergeben. So ist insbesondere bei dosisrelevanten Untersuchungen (z. B. Abdomen, Becken, Wirbelsäule) nach Alternativen (z. B. Sonografie) zu fahnden. Für die Röntgenaufnahme des Schädels gibt es kaum noch Indikationen (z. B. Verdacht auf nicht-akzidentelles Trauma). Stete Verbesserungen in der Technologie haben dazu geführt, dass in der Kinder-radiologie und insbesondere auch bei Röntgenuntersuchungen von extrem Frühgeborenen (< 1000 g) die digitale Detektortechnik verbunden mit all ihren Vorteilen gegenüber analogen Verfahren Einzug gehalten hat. Die hohen Herzfrequenzen und unkontrollierte Mobilität setzen gerade bei jüngeren Kindern in der Röntgendiagnostik sehr kurze Expositionszeiten zur Vermeidung von Bewegungsartefakten voraus. Daher sollen immer Geräte verwendet werden, die Schaltzeiten von unter 5 ms ermöglichen. Jede Erhöhung der Absorption durch Materialien hinter der Patientin oder dem Patienten führt zu einer Erhöhung der Strahlenexposition. Dies bedeutet, dass Raster leicht entfernbar und Tischplatte sowie Tischauflage besonders optimiert sein sollen. Gerade bei kleinen Objekten sollte die Tischauflage wegen der unnötigen Absorption entfernt werden und ein geringer Objekt-Detektor-Abstand gewählt werden. Daher ist bei Aufnahmen im Liegen das umgeklappte Rasterwandgerät oder besser noch die direkte Lagerung des Kindes auf dem Detektor vorzuziehen. Falls Streustrahlenraster nötig sind, sollte möglichst auf ein virtuelles Raster zurückgegriffen werden. Diese verringern den kontrastmindernden Einfluss der Streustrahlung, ohne dass es zu einer Erhöhung der Strahlenexposition

kommt. Stehen diese nicht zur Verfügung, so soll das Raster einen ausreichenden Bildverbesserungsfaktor  $Q$  und eine hohe Primärstrahlentransparenz  $T_P$  nach DIN EN 60627 aufweisen.

### 5.1.2 Aufnahmetechnik (Filterung, Röhrenspannung, Raster)

Die Aufnahmetechnik bei Kindern ist – wie bereits erwähnt – nicht einheitlich, sondern hängt in starkem Maße von der Konstitution des Kindes und der klinischen Fragestellung ab.

Daher sollten sich *Röhrenspannung und Vorfilterung* an der Dicke des durchstrahlten Körperbereiches und am notwendigen Kontrast-Rausch-Verhältnis orientieren. Eine nennenswerte Reduktion der Hautdosis durch hohe Röhrenspannungen und Vorfilterungen ergibt sich erst oberhalb einer Objektdicke von 10 cm. Mit abnehmendem Körperdurchmesser wird deren Einfluss auf die Strahlenexposition geringer. Die Röhrenspannung soll im Körperstamm-bereich nicht unter 60 kV und bei Frühgeborenen nicht unter 55 kV betragen. Insbesondere bei der Aufnahme von distalen Extremitätenabschnitten können hingegen niedrigere Röhrenspannungen und Filterkombinationen, die das Röntgenspektrum weniger aufhärten, das Kontrast-Rausch-Verhältnis verbessern (Hess und Neitzel 2012, Knight 2014).

Filter, die bei Untersuchungen an Kindern zusätzlich in den Strahlengang eingesetzt werden, sind in aller Regel 1 mm Al und 0,1 mm bis 0,2 mm Cu. Sie dienen bei dieser Aufnahmespannung zur Reduktion der Hautdosis um 30 % bis 40 %. Filter wirken primär auf niedrigere Strahlenenergien und verändern nicht die Grenzenergie. Die Röhrenspannung wirkt sich hingegen auf das gesamte Strahlenspektrum aus. Im Sinne des Strahlenschutzes soll auf einen hohen Filterwert geachtet werden, zur Optimierung der Bildqualität sollte die Röhrenspannung leicht abgesenkt werden. Hinweise zu den Aufnahmeparametern finden sich u. a. in den Leitlinien der Bundesärztekammer (BÄK) zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik (BÄK 2007, Novellierung in Arbeit, Publikation im Jahr 2022 erwartet).

Ein *Raster* wird erst beim größeren Kind um das zehnte Lebensjahr, bzw. bei Objektdurchmessern größer als 15 cm erforderlich. Das Alter des Kindes korreliert nur unzureichend mit dem Streustrahlenanteil. Die Untersuchung ohne Raster entspricht einer Senkung der Dosis um den Faktor zwei bis drei (bei höheren Streustrahlenanteilen auch um den Faktor drei bis vier).

Entscheidend für den Strahlenschutz ist auch die optimale Einblendung. Für die angrenzenden Organbereiche führt dies zu einer Elimination der starken Primärstrahlung. Zusätzlich sollte die Einblendung auch die von Primärstrahlung getroffene Detektor- oder Rasterfläche reduzieren, da hier hohe Streustrahlenanteile erzeugt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Dosis-Flächen-Produkt mit der Feldgröße steigt. Die Eintrittsdosis ändert sich dabei jedoch nur gering.

Wegen der geringen Körpergröße von Kindern ist der Einsatz einer Belichtungsautomatik häufig nicht möglich. Manuelle Einstellungen sind von der Erfahrung des Personals abhängig. Daraus resultierende Überexpositionen in einem digitalen Bild können im Gegensatz zu Unterexpositionen nicht gut durch eine veränderte Bildqualität erkannt werden. Einziger Marker hierfür ist der Dosisindikator. Er korreliert mit der Bildempfängerdosis und zeigt an, ob die angestrebte Dosis am Detektor bei der Exposition erreicht oder überschritten wurde. Die Aufzeichnung des Dosisindikators und die Bewertung bei jeder Exposition durch den Untersucher sind verpflichtend (§ 85 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchG). Der Dosisindikator sollte nicht nur am Anwendungsgerät, sondern immer auch am Befundarbeitsplatz angezeigt werden, um ein Vieraugenprinzip zwischen medizinisch-technischem und ärztlichem Personal zu realisieren.

Die Funktion des Dosisindikators sollte zudem als Pflichtbestandteil in Strahlenschutzkurse integriert sein und in die Leitlinien zur Bildqualität gehören. Einer breiten Nutzung stehen derzeit noch viele proprietäre Indikatoren einzelner Hersteller an älteren Geräten entgegen.

Eine Strahlenexposition der Brustdrüse sollte insbesondere bei Mädchen vermieden oder soweit als möglich minimiert werden. Bei Thoraxuntersuchungen sind daher posterior-anteriore (p. a.) Aufnahmen zu bevorzugen. Bei Röntgenaufnahmen von Früh- und Neugeborenen im Inkubator sollte wegen der erhöhten Absorption in Lagerungsmatte und Bodenplatte, wenn möglich, auf eine Nutzung der Einschubvorrichtung im Inkubator verzichtet werden und der Detektor direkt unter das Kind gelegt werden. Röntgenthoraxaufnahmen bei Säuglingen können in Abhängigkeit vom klinischen Zustand des Kindes auch im Hängen in der Babixhülle am Thoraxstativ durchgeführt werden (Schneider und Seidenbusch 2019).

### 5.1.3 Bildempfang mit digitalen Speicherfoliensystemen und Flachdetektoren

Digitale Detektoren zeichnen sich durch eine sehr hohe Dynamik aus. Dies bedeutet, dass sie in einem weiten Dosisbereich einsetzbar sind. Bei niedriger Bildempfängerdosis verringert sich allerdings das Signal-Rausch-Verhältnis. Bei hohen Objektkontrasten – z. B. Luft-Weichteile oder Knochen-Weichteile – kann dies durchaus in gewissem Maße akzeptiert werden. Es ist Aufgabe eines internen Optimierungsprozesses, hier zu einer angepassten Bildqualität zu kommen.

Flachdetektoren besitzen in der Regel eine deutlich höhere Quantenausbeute (detective quantum efficiency, DQE). Damit kann man auch mit geringen Bildempfängerdosen eine ausreichende Bildqualität erzielen. Für die digitale Speicherfolienradiografie trifft dies nicht immer zu. Der Dosisbedarf kann sogar höher sein als bei einer Film-Folienkombination. Vorteil von Speicherfoliensystemen ist dennoch eine geringere Fehlpositionsrate und die Verarbeitungs- und Archivierungsvorteile digitaler Bilder. Wegen der geringen DQE und der deutlich höheren Gefahr von Fehlpositionen sollen Film-Folien-Systeme in der Kinder-radiologie nicht mehr zum Einsatz kommen.

Bei den Flachdetektoren sollten in der Pädiatrie Technologien mit höchster DQE (z. B. mit Cäsium-Iodid- statt Gadolinium-Oxisulfid-Szintillatoren) eingesetzt werden.

Die maximale Empfindlichkeit aller Detektoren (auch Speicherfolien und Verstärkerfolien) ist stark energieabhängig. Dies bedeutet, dass nur innerhalb eines definierten Energiebandes die maximale Empfindlichkeit des Detektors gewährleistet ist. Bei der Umstellung einer Röntgenanlage auf einen anderen Detektor müssen daher Belichtungsautomatik, Belichtungstabellen und die verwendeten Strahlenqualitäten an die Kenngrößen der Detektoren angepasst werden und die Untersuchungsprotokolle müssen entsprechend revidiert werden. Nur so lassen sich die Potentiale dieser Detektoren auch wirklich nutzen.

Am peripheren Skelett sollte die Bildempfängerdosis unterhalb von 5  $\mu\text{Gy}$  liegen und am Körperstamm unterhalb von 2,5  $\mu\text{Gy}$  (BÄK 2007). Es sollten Detektoren mit der höchst möglichen Empfindlichkeit verwendet werden. Für die Fragestellungen nach Fremdkörper, Ileus oder Shuntverlauf in Abdomen-Übersichtsaufnahmen kann die Dosis weiter abgesenkt werden. Gleiches gilt für die Anfertigung von Wirbelsäulenganzaufnahmen oder Ganzbeinaufnahmen (Full Leg und Full Spine). Hier sollten Bildempfängerdosen unterhalb von 1,25  $\mu\text{Gy}$  angestrebt werden.

### 5.1.4 Patienten-Strahlenschutzmittel

Nach neueren Untersuchungen ist der Nutzen von Patienten-Strahlenschutzmitteln nicht für alle Organbereiche eindeutig nachgewiesen, sodass unter bestimmten Bedingungen darauf verzichtet werden kann (AAPM 2019, Frantzen et al. 2012, Hiles et al. 2021, Jeukens et al. 2020, Kaplan et al. 2018, Marsh und Silosky 2019, SSK 2022, Yu et al. 2019). Auf jeden Fall

soll der dosissteigernde Effekt von Patienten-Strahlenschutzmitteln, die zwischen Strahlenquelle und Messkammer liegen, bei der automatischen Belichtung vermieden werden (Kaplan et al. 2018, Culp et al. 2014, Frantzen et al. 2012).

Die SSK empfiehlt:

Bei der Durchführung radiografischer Untersuchungen am Kind soll eine geeignete apparative Voraussetzung vorhanden sein (Schaltzeit, Spannung, Filterung).

Dosisreduktionen sollen indikations- und fragestellungsbezogen vorgenommen werden.

In der Pädiatrie sollen Detektoren mit hoher DQE eingesetzt werden.

Eine optimierte Einblendung ist obligat und zählt zu den wichtigsten Elementen des Strahlenschutzes.

Beim Einsatz von Strahlenschutzmitteln sollen dosissteigernde Effekte vermieden werden.

Insbesondere bei strahlenintensiven Untersuchungen (z. B. Röntgen Abdomen, Becken, Wirbelsäule) sollen alternative Verfahren bei vergleichbarer Aussagekraft bevorzugt eingesetzt werden.

## 5.2 Durchleuchtung

### 5.2.1 Aspekte der Gerätetechnologie

Für Durchleuchtungsuntersuchungen werden Geräte mit unterschiedlicher Projektionsrichtung des Strahlers angeboten. Dabei sind die Obertisch- (a. p.-Projektion) oder Untertischgeräte (p. a.-Projektion) starr in ihrer Orientierung, während C-Bogen-Geräte eine frei wählbare Projektionsrichtung aufweisen.

Für die Strahlenexposition des Untersuchers ist in erster Linie die Streuung aus dem Körper der Patientin oder des Patienten verantwortlich. Diese zeigt, bedingt durch die Rückstreuung, ein Maximum auf der Eintrittsseite der Strahlung. Dies gilt es, besonders bei Obertischgeräten zu beachten. Bei kleinen Feldern und geringem Körperdurchmesser nimmt die Rückstreuung aber ab. Da die Strahlenexposition für die Patient\*innen ihr Maximum ebenfalls an der Eintrittsseite aufweist, sollte dies bei der Patientenlagerung (z. B. durch Bauchlagerung), wenn möglich, berücksichtigt werden. Auch hier wird dieser Effekt mit abnehmendem Körperdurchmesser geringer.

Nachteile bei Obertischsystemen kommen also erst bei zunehmendem Alter der Kinder zum Tragen. Bei kleinen Kindern bis zum Alter von etwa zwölf Jahren bieten Obertischgeräte eine bessere Zugänglichkeit und haben zudem den Vorteil der strahlensparenden Einblendung mittels Lichtvisier. Bei Jugendlichen oder Kindern im adoleszenten Gewichtsbereich sind Untertischgeräte zu bevorzugen.

In der Kinderradiologie soll bei Durchleuchtungsuntersuchungen, wie z. B. beim MCU, mit gepulster Durchleuchtung mit möglichst geringer Frequenz gearbeitet werden, wodurch eine Doseinsparung bis zu 90 % ermöglicht wird (Ward et al. 2008). An Durchleuchtungsarbeitsplätzen zur Untersuchung von Kindern muss stets die Möglichkeit gegeben sein, das Streustrahlenraster zu entfernen, da es bei Untersuchungen im Säuglings- und Kleinkindalter zu einer deutlich höheren Dosis führt. Da die geringen Volumina innerhalb des Strahlungsfeldes nur einen geringen Streustrahlenanteil aufweisen, verbessern Raster den Bildkontrast nicht relevant.

Eine wichtige Technik zur Dosisreduktion bei Durchleuchtungen, ist die Verwendung des „Last Image Hold“ und des „Last Image Run“, bei denen das letzte Durchleuchtungsbild bzw.

die letzte Durchleuchtungssequenz immer auf dem Monitor angezeigt wird. Aus dem gespeicherten Durchleuchtungsbild oder der -sequenz können häufig Bilder ausreichender Qualität zur Dokumentation gespeichert werden. Neuere Systeme bieten bei der permanenten Sequenzaufzeichnung zusätzlich eine Mittelung mehrerer Bilder an (Snap Shot). Hierdurch lassen sich aus der Durchleuchtungsserie deutlich rauschärmere Einzelbilder erstellen, ohne dass eine Einzelaufnahme mit zusätzlich höherer Dosis erstellt werden muss.

Zur optimalen Ausrüstung eines pädiatrischen Durchleuchtungsarbeitsplatzes gehören, zusätzlich zur Einblendung im Last Image Hold (LIH) und Last Image Run (LIR), eine automatische Positionierung aus dem Last Image Hold und alters- oder gewichtsabhängige Untersuchungsprotokolle mit speziellen dosisreduzierenden Kennlinien für die automatische Dosisleistungsregelung (ADR) der Durchleuchtung.

Tischauflagen sollen im a. p.-Strahlengang entfernt oder nur eine möglichst geringe Absorption aufweisen. Der Patienten-Detektor-Abstand (ODA) soll minimal und der Röhren-Patienten-Abstand (FOA) maximal sein.

Das Detektorformat (Zoom) beeinflusst Ortsauflösung, Dosisleistung und Aufnahmedosis. Die Zoom-Funktion sollte nur zur Verbesserung der Ortsauflösung eingesetzt werden, nicht aber zur vergrößerten Darstellung des Bildes. Dies gilt in gleicher Weise für analoge Bildverstärker wie für digitale Flachdetektoren.

Zusätzliche Filter im Strahlengang sollen den niederenergetischen Teil der Röntgenstrahlung absorbieren und damit die Einfalldosis reduzieren. Der Effekt sinkt mit abnehmendem Körperdurchmesser. Im Gegenzug nimmt der Bildkontrast mit zunehmender Filterdicke ebenfalls ab. Effekte in ähnlicher Form treten für höhere Beschleunigungsspannungen auf. Hier gilt es das Optimum zwischen Strahlenexposition und Bildqualität für jede Alters- bzw. Gewichtsklasse zu finden und im Untersuchungsprotokoll festzuhalten.

Bei Untersuchungen mit iodhaltigem Kontrastmittel soll die Strahlenergie zur Kontrastmaximierung an die k-Absorptionskante (33 keV) angepasst werden.

Bei Untersuchungen des Körperstamms muss das Dosis-Flächen-Produkt dokumentiert werden. Zusätzlich soll die Durchleuchtungszeit und, wenn vorhanden, die Luftkerma aufgezeichnet werden. Der gesamte Untersuchungsablauf mit allen Dosiswerten und den Einstellwerten des Gerätes bis hin zu Einstrahlwinkeln und Feldgrößen jedes einzelnen Strahlungsereignisses sollten über ein DICOM Dose Report-Protokoll an das Picture Archiving Communication System (PACS) und das Dosismanagement-System (DMS) übertragen werden und stehen dort zur weiteren Auswertung bereit.

Nach § 114 StrlSchV müssen viele Geräte über eine Funktion verfügen, die die Expositionsparameter elektronisch aufzeichnen und für die Qualitätssicherung elektronisch nutzbar macht. Hierbei gelten Übergangszeiten bis 2023.

### 5.2.2 Diagnostik (MCU, MDP, Kolon-KE)

Funktionelle Durchleuchtungsuntersuchungen sind trotz einer Reihe von Alternativverfahren weiterhin Standarduntersuchungen in der diagnostischen Kette bei Kindern. Ein wesentlicher Aspekt hierfür ist, dass die Methoden schnell, sicher und in der Regel ohne Sedierung durchgeführt werden können. Gerade bei kleinen Kindern bis sieben Jahren ist dies im Lichte neuerer Erkenntnisse bzgl. Sedierungsrisiko relevant (Backeljauw et al. 2015). Eine Reihe innovativer Methoden ohne ionisierende Strahlung zur funktionellen Untersuchung des Magen-Darm-Traktes oder des Urogenitaltraktes (z. B. Kontrastmittelsonografie) wurden in den letzten

Jahren entwickelt und erprobt. Sie sind bei der Indikationsstellung als Alternative zu berücksichtigen, setzen in der Regel aber entsprechend anspruchsvolle Technik und Erfahrung des Untersuchers voraus.

Bei Nutzung ionisierender Strahlung sollen folgende Grundsätze unter Berücksichtigung des ALARA Prinzips eingehalten werden:

- Die Befunde aus allen relevanten, auch alternativen Voruntersuchungen (Endoskopie, Ultraschall, MRT usw.) sollten vorliegen und bekannt sein, sowohl bei Stellung der rechtfertigenden Indikation als auch zur Planung für eine auf die Fragestellung fokussierte Untersuchung. Hierdurch lassen sich Fehlindikationen vermeiden, aber auch erheblich Durchleuchtungszeit einsparen (5.2.1).
- Kritische Abwägung des Einsatzes von Strahlenschutzmitteln (5.1.4).
- Nutzung moderner Gerätetechnik (5.2.1).
- Nutzung strahlensparender Einblendung, z. B. mittels Lichtvisier (5.2.1).
- Einsatz von Zusatzfilterung (5.2.1).
- Niedrigdosisuntersuchungen mit reduzierter und den Fragestellungen angepasster Dosis einschließlich niedrigster möglicher Pulsfrequenz (bis 0,5 Pulse/s) (5.2.1).
- Durchführung von automatischer Speicherung aus Durchleuchtung (DL), als „Last Image Hold“ oder besser automatische Speicherung aller DL Sequenzen (5.2.1). Auf Hochdosisbilddokumentation sollte verzichtet werden, wenn diese diagnostisch nicht explizit erforderlich ist.

#### Miktionszystourethrografie (MCU)

Die Indikationsstellung zur MCU erfolgt wie bei allen Durchleuchtungsuntersuchungen standardisiert entsprechend der aktuellen AWMF-Leitlinien (AWMF: Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V.). Grundsätzlich sollte die Miktionsurosonografie (MUS) als Alternativverfahren erwogen werden. Die Indikation zur MCU sollte ebenso wie ihre Durchführung Standards folgen, die als SOP hinterlegt sind und u. a. Einblendung, Wahl der Projektionen und die Anzahl der Untersuchungs-Zyklen berücksichtigen.

#### Ösophagus-Breischluck und Magendarmpassage (MDP)

Bei diesen Untersuchungen ist aus Strahlenschutzaspekten besonders auf die richtige Wahl der Pulsfrequenzen zu achten. Bildserien in hoher Frequenz sind in der Regel nur bei Untersuchungen des Schluckaktes indiziert. Ggf. kann eine moderat erhöhte Frequenz bei postoperativer Bildgebung (z. B. nach Ösophagusatresie oder bei Verdacht auf ösophagotracheale Fistel) notwendig sein.

#### Kolonkontrasteinlauf (KE)

Es gibt typische Indikationen für den KE im Kindesalter, wie z. B. der Verdacht auf Morbus Hirschsprung. Entsprechend kann aus klinischer Sicht ggf. auf eine vollständige Füllung des gesamten Kolons verzichtet werden. Zielaufnahmen zusätzlich zur gespeicherten Durchleuchtung sind in der Regel nicht notwendig. Zu dichtes Kontrastmittel hat unmittelbaren Einfluss auf die Strahlenexposition, da es über die Belichtungsautomatik zu einer unnötigen Erhöhung der Belichtungsparameter kommt. Die geeignete Verdünnung des Kontrastmittels muss individuell der jeweiligen Fragestellung angepasst werden.

Die SSK empfiehlt:

Durchleuchtungsuntersuchungen beim Kind sollen an Geräten mit gepulster Durchleuchtung, herausnehmbarem Raster und Zusatzfilterung durchgeführt werden. Bei Anlagen, die nicht über eine digitale, dosisneutrale Zoomfunktion verfügen, sollen Untersuchungen mit möglichst geringem Zoomfaktor durchgeführt werden. Die Einblendung soll bezogen auf die Fragestellung streng vorgenommen werden. Die Dokumentation sollte bevorzugt über das meist diagnostisch ausreichende digitale Speicherbild (Last Image Hold) erfolgen. Das Dosis-Flächen-Produkt und die Durchleuchtungszeit sollen dokumentiert werden. Bei der Indikationsprüfung einer Durchleuchtungsuntersuchung sollen Alternativverfahren bei gleicher Aussagekraft bevorzugt eingesetzt werden (z. B. Miktionsurosonografie anstelle Miktionszysturethrografie).

### 5.3 Computertomografie

#### 5.3.1 Gerätetechnologie und Wahl von Parametern

Computertomografen zeichneten sich in den letzten Jahren durch einen raschen Technologiefortschritt aus. Hierdurch ist eine heterogene Gerätelandschaft mit sehr unterschiedlichen Potentialen zur Dosisreduktion entstanden.

Die neuen Entwicklungen haben größtenteils zu einer Reduktion der Strahlenexposition beigetragen. Wirksam werden sie allerdings nur bei konsequenter Anwendung, wozu ein optimal geschultes Team aus Ärzteschaft, Radiotechnologie und Medizinphysik notwendig ist. Hilfreich kann zudem ein gut eingeführtes Dosis-Management-System sein, welches Ausreißer der Strahlenexposition sofort anzeigt. Nicht optimierte Protokolle, Protokollverwechslung, falsche Nutzung der Dosismodulation, falsche Lagerung und nicht-adäquater Einsatz von Strahlenschutzmitteln sind die häufigsten Fehler, die zu erhöhten Expositionen führen können.

Untersuchungsprotokolle für Kinder unterscheiden sich erheblich von Erwachsenenprotokollen. Die (physikalische) Halbwertschichtdicke bei CT-Untersuchungen liegt bei drei bis fünf cm Körpergewebe. Ein um eine Halbwertschicht dünnerer Körper benötigt also nur die Hälfte der Dosis für eine vergleichbare Bildqualität. Der Vergleich der Körperdurchmesser von Erwachsenen und Kindern weist auf die erheblichen Unterschiede im Dosisbedarf hin. Daher sollen für jede Alters- bzw. Körpergewichtsgruppe spezifische Protokolle vorliegen.

Der wichtigste Dosisindikator in der Computertomografie ist der  $CTDI_{vol}$ . Abgeleitet davon berücksichtigt das Dosis-Längen-Produkt (DLP) zusätzlich die Scanlänge. Für beide Größen existieren für häufige oder dosisintensive Untersuchungen die DRW des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). Die Angaben sind altersabhängig. Es ist Aufgabe eines strukturierten Untersuchungsprozesses, diese Dosisparameter bei jeder Untersuchung hinsichtlich einer notwendigen Anpassung der Geräteparameter zu beurteilen. Hierzu soll der  $CTDI_{vol}$  als DICOM-Tag oder in einem proprietären Dosisprotokoll am Anwendungsgerät und am Befundarbeitsplatz angezeigt werden.

Die Dosiswerte charakterisieren nicht die individuelle Strahlenexposition einer Patientin oder eines Patienten, sondern beziehen sich auf ein standardisiertes Plexiglasphantom mit einem Durchmesser von 16 cm für den Kopfbereich und 32 cm für den Körperstamm. Dies täuscht für Körperstammuntersuchungen bei Kindern eine zu niedrige Strahlenexposition vor und muss bei Abschätzung von Strahlenexpositionen bei Kindern in jedem Fall bedacht werden.

Ein sogenanntes Overtopping entsteht durch jeweils ca. eine Rotation vor und nach dem angewählten Scanbereich, um die Bildrekonstruktion im Spiralmodus zu ermöglichen. Der für die Bildgebung genutzte Scanbereich ist hierdurch kleiner als der bestrahlte Bereich. Alternativ zum Spiralmodus kann ein Einzelschicht-Scanmodus gewählt werden, z. B. beim Schädel-CT.

Bei breiten Detektor-Panels steigt insbesondere bei kurzen Scan-Längen, wie sie bei Kindern häufig vorkommen, der Einfluss des Overranging, so dass dann typischerweise nur mit den zentralen Detektorelementen (z. B. den zentralen 16 bis 64 Detektorelementen in z-Achse) oder speziellen adaptiven Einblendungstechniken gearbeitet werden sollte.

Das Kontrast-Rausch-Verhältnis ist neben der Ortsauflösung in x-, y- und z-Richtung die bedeutendste Größe der Bildqualität. Gerade bei kleinen Kindern gilt es, den relativ schwachen Objektkontrast zu verstärken und auch bei höherem Rauschen sichtbar zu machen. Hierfür ist die Senkung der Röhrenspannung die wirksamste Maßnahme.

Im Unterschied zu dem Zusammenhang von Dosis und Röhrenstrom [mAs] ist der Zusammenhang von Dosis und Röhrenspannung [kV] nicht linear. So bewirkt eine Erhöhung der Röhrenspannung von 100 kV auf 120 kV bei konstanten Röhrenstrom-Zeit-Produkten eine Steigerung der Dosis um ca. 40 %. Niedrigere Röhrenspannungen (z. B. 70 kV bis 80 kV) können bei Untersuchungen mit intravenösem Kontrastmittel aufgrund der Nähe zur Iodabsorptionskante (33 keV) sinnvoll sein. Durch den sprunghaften Anstieg der Absorption von Photonen mit Energien um 33 keV am Iod ergibt sich hierdurch ein höheres Kontrast-Rausch-Verhältnis. Zudem erhöhen sich mit abnehmender Röhrenspannung die Kontraste zwischen den Gewebsstrukturen und verbessern damit ebenfalls das Kontrast-Rausch-Verhältnis.

Die Dosismodulation dient der kontinuierlichen Dosisanpassung an die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften im Scanbereich. Wichtigste Grundlage für eine ordnungsgemäße Steuerung ist der Übersichtsscan (Topogramm, Scannogramm, Surview etc.). Der abgebildete Patientendurchmesser entscheidet über den Startwert. Da es sich um eine Projektionsaufnahme handelt, beeinflusst der Fokus-Objekt-Abstand diese Größe (Vergrößerung). Daher ist die exakte Lage der Patientin oder des Patienten im Isozentrum zwingend erforderlich. Sonst würde die eingestellte Dosis vom tatsächlichen Dosisbedarf stark abweichen. Der Effekt kann bis zu 34 % Dosiserhöhung bei Kindern in Abhängigkeit von der Untersuchungsregion ausmachen (Euler et al. 2019, Kaasalainen et al. 2014). Die Lagerung sollte durch Lasermarker und ggf. durch 3D-Kameras kontrolliert werden.

Der Augenlinse ist bei Kindern eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Wichtige Maßnahmen zur Verringerung des Kataraktrisikos sind Gantryneigung und ventrale Schädelneigung unter Beachtung des Overranging. Eine Gantryneigung ist baulich bedingt nicht an allen Geräten möglich. Auch die Möglichkeit einer exakten Lagerung kann eingeschränkt sein. In diesen Fällen sollte eine sektorielle Dosismodulation zur Absenkung im Linsenbereich oder Linsenprotektoren eingesetzt werden. Sektorielle Dosismodulationen können auch zum Schutz anderer Organe eingesetzt werden. Hierzu zählen besonders Schilddrüse und Mamma. Eine Strahlenexposition der Mamma ist wegen der hohen strahlenbiologischen Empfindlichkeit in jungen Jahren unbedingt zu minimieren. Den weiteren Einsatz und die Wirkung von Patienten-Strahlenschutzmitteln beschreibt die Empfehlung der SSK vom Dezember 2018 (SSK 2018).

### 5.3.2 Rechtfertigende Indikation

Durch CT-Untersuchungen können in kürzester Zeit und mit hoher Sicherheit Erkrankungen diagnostiziert werden. Allerdings führt bei Kindern die CT besonders im Bereich des Schädels und des Körperstamms zu einer erheblichen Strahlenexposition mit entsprechenden Risiken, wie unter 4.1 dargestellt.

Generell gehört die CT damit neben bestimmten interventionell eingesetzten radiologischen Methoden zu den diagnostischen Verfahren mit der größten Strahlenexposition der untersuchten Patient\*innen überhaupt. In einer Datenanalyse aus Deutschland aus den Jahren 1997 bis 2013 fand sich die die höchste mittlere Organ-Äquivalentdosis in der Altersgruppe von 7,6

bis 12,5 Jahren, nämlich für das Gehirn mit  $37,12 \text{ mGy} \pm 19,68 \text{ mGy}$  und für die Augenlinse mit  $41,24 \text{ mGy} \pm 20,08 \text{ mGy}$  (Pokora et al. 2016). Allerdings wurde über den Beobachtungszeitraum für alle Altersgruppen ein rückläufiger Trend der Organdosen gefunden.

In der gleichen Erhebung wird ein Rückgang der CT-Untersuchungsfrequenz von 29 % über die Jahre 2006 bis 2012 gezeigt. Grundsätzlich sind bei Kindern immer alternative Verfahren (vergl. Kapitel 6) mit vergleichbarer diagnostischer Aussagekraft vorzuziehen, wenn die klinische Situation dies zulässt. Diese Überprüfung erfolgt im Rahmen der Stellung der rechtfertigenden Indikation (RI) gemäß § 83 Abs. 3 StrlSchG.

Um die rechtfertigende Indikation mit großer Sorgfalt stellen zu können, müssen daher bei jeder CT die klinischen Befunde einschließlich der u. U. vorhandenen diagnostischen Voraufnahmen geprüft werden. Mit Blick auf die Fragestellung sowie dem zu erwartenden diagnostischen Ergebnis muss zwischen Risiken und möglichem Nutzen der CT-Untersuchung streng abgewogen werden. In Tabelle 1 (s. Anhang) sind die in der Orientierungshilfe der SSK aufgeführten, primären (P) CT-Indikationen (Tabelle 1a, s. Anhang) aufgelistet, und zudem diejenigen Indikationen dargestellt, bei denen die CT weiterführend (W) eingesetzt werden kann (Tabelle 1b, s. Anhang) (SSK 2019). Zur Stellung der rechtfertigenden Indikation sollten darüber hinaus immer auch aktuelle AWMF-Leitlinien für bestimmte Erkrankungen berücksichtigt werden.

### 5.3.3 Kindgerechte Durchführung einer CT

Eine unzulänglich durchgeführte CT geht immer mit einer unnötigen oder unnötig hohen Strahlenexposition einher. Daher sind die kindgerechte Vorbereitung, insbesondere zur Vermeidung von Bewegungsartefakten, die richtige Einschätzung von physiologischen Besonderheiten von Kindern und die Wahl des adäquaten CT-Protokolls essenziell.

Bei der Planung und Vorbereitung einer CT muss berücksichtigt werden, ob das Kind aufgrund von Alter und Entwicklungsstand kooperationsfähig ist. Daher sollten bereits im Vorfeld die Eltern im Rahmen der Aufklärung mit in die Entscheidung einbezogen werden, ob eine Sedierung zur CT-Durchführung notwendig ist. Im Lichte neuerer Erkenntnisse muss das Sedierungsrisiko mit in die Entscheidung einbezogen werden (Backeljauw et al. 2015).

Beim Einsatz schneller Multidetektor-CT-Scanner kann eine Sedierung in den meisten Fällen vermieden werden, wenn entweder eine Lagerungs-/Fixierungshilfe bei Säuglingen zur Anwendung kommt oder bei älteren Kindern durch Erreichen einer angstfreien Umgebung – eventuell mit Videoclips im Vorfeld – eine Kooperation erreicht wird (Esser et al. 2017, Westra 2019). Die Untersuchung sollte durch im Umgang mit Kindern erfahrenes bzw. geschultes Personal durchgeführt werden.

Darüber hinaus sind nach § 121 Abs. 1 StrlSchV schriftliche Arbeitsanweisungen (Standard Operating Procedures, SOP) für jede angebotene Untersuchungsart verpflichtend. Auch hat es sich bewährt, dass unter Beachtung geeigneter Strahlenschutzmaßnahmen (Schutzkleidung) und unter Tragen eines Dosimeters ein Elternteil im Untersuchungsraum anwesend ist. Auch wenn eine Kurznarkose oder Sedierung häufig weniger aufwändig erscheint, kann die hierbei zu beobachtende Minderbelüftung, insbesondere im Bereich der dorsobasalen Lunge, zu einer Einbuße der diagnostischen Genauigkeit führen (Kino et al. 2019).

Bei der Lagerung ist darauf zu achten, dass extrakorporale metallische Fremdkörper vollständig aus dem Untersuchungsfeld entfernt werden. Bei Anwendung von Fixierungshilfen bei Säuglingen sollten diese so genutzt werden, dass sich die Säuglinge nicht während der Untersuchung aus dem Scanbereich heraus bewegen können.

Die Verwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln kann nicht uneingeschränkt empfohlen werden. In früheren Studien wurde zwar ein Effekt auf die Organexposition nachgewiesen, aber das Ausmaß der Einsparung ist geringer als grundsätzliche Maßnahmen zur Dosisreduktion (Nievalstein et al. 2010). Darüber hinaus ist das Anbringen solcher Patienten-Strahlenschutzmittel anspruchsvoll und kann die Automatic Exposure Control (AEC) ungünstig beeinflussen (siehe auch Abschnitt 5.3.1.).

Die Durchführung des Topogramms sollte entsprechend der Vorgaben des Herstellers in der richtigen Tischhöhe erfolgen. Siehe auch Abschnitt 5.3.1.

Untersuchungsprotokolle sollten standardisiert sein und beginnend beim Neugeborenen stufenweise für alle Altersgruppen/Gewichtsklassen zur Verfügung stehen. Bei der Erstellung und der Auswahl der Protokolle gilt das ALARA Prinzip. Hierbei muss der/die zuständige Radiolog\*in entscheiden, welches Rauschlevel (z. B. nach iterativer Rekonstruktion oder zukünftig Bildverbesserungstechniken mit künstlicher Intelligenz) generell akzeptabel und für die Fragestellung adäquat ist. So sollte in den SOP beschrieben werden, bei welchen Fragestellungen eine Folgeuntersuchung zur Beobachtung eines bekannten Befundes mit einer reduzierten Dosis erfolgen kann. Die DRW sollten hierbei eingehalten werden. Bezogen auf die zur Verfügung stehende Scanner-Technologie sollten die in Tabelle 2 (s. Anhang) aufgelisteten Einflussgrößen Beachtung finden, die in vielfältiger Wechselwirkung zu einander stehen: Das Eingrenzen der zu untersuchenden Körperregionen trägt erwartungsgemäß erheblich zur Dosisreduktion bei und schützt sensible Organe (z. B. Augenlinsen, Gonaden, Schilddrüse), die nicht unbedingt im Scanbereich liegen müssen, vor unnötiger Exposition. Hier ist bei breiter Kollimation und hohem Pitch besonders auch der Overbeaming und Overranging Effekt zu beachten (Nievalstein et al. 2010, Sorantin et al. 2013).

Bei Anwendung von intravenösem Kontrastmittel sollten primär einphasige Untersuchungsprotokolle genutzt werden. Um eine optimale Kontrastierung von Gefäßen und Organparenchym zu erreichen, können Doppelbolus-Methoden empfohlen werden, wenn der intravenöse Zugang ausreichende Flussraten ermöglicht (Thomas et al. 2015). Bei Verwendung von Dual-Energy Methoden sind virtuell native Bildrekonstruktionen oder Kontrastverbesserung möglich, ohne dass dabei die Dosis erhöht wird (Gottumukkala et al. 2019). Allerdings führt dies häufig geräteabhängig zu einer Verdopplung der Scanzeit mit möglichen Folgen durch Bewegungsunschärfe.

Bei Verwendung von Bolus-Tracking anstelle von festen Verzögerungszeiten ist der Nutzen in Form der Kontrastoptimierung gegenüber der z. T. erheblichen Erhöhung der Dosis abzuwägen (Nievalstein et al. 2010). Eine ausreichende Verzögerung bei Scan-Beginn und min. 1 s-Intervalle bei den Scans sind obligat (Sorantin et al. 2013).

Es sollte ein optimaler und die technischen Möglichkeiten des Scanners nutzender Kompromiss aus angepasstem FoV, niedriger Kollimation, kurzer Rotationszeit und hohem Pitch gefunden werden. In Abhängigkeit der Scannertechnologie führen hohe Pitchfaktoren zu einer Erhöhung des Overranging.

Ist aufgrund der primären Fragestellung an die CT eine Untersuchung von Strukturen mit hohem intrinsischen Kontrasten geplant, kann ein erhöhtes Bildrauschen durchaus akzeptabel sein. Dies ermöglicht grundsätzlich eine erhebliche Dosisreduktion, insbesondere durch Verringerung des Röhrenstroms im Bereich von 50 % und mehr, ohne dass hierbei die Bildqualität wesentlich reduziert wird (Esser et al. 2018).

Gerade bei geringem Körpergewicht (Säuglinge/Kleinkinder) oder z. B. bei der CT-Angiografie sind niedrige Beschleunigungsspannungen empfehlenswert. Sie führen zu einer bes-

seren Darstellung von Gefäßstrukturen. Zudem unterscheiden sich parenchymatöse Organläsionen mit Hyper- und Hypovaskularität im Vergleich zum umgebenden Gewebe besser (Nagayama et al. 2018). Aber auch bei nativem CT mit unverändertem Röhrenstrom kann die diagnostische Bildqualität bei 70 kV mit vertretbarer Zunahme des Rauschens ausreichend sein (Chi et al. 2021, Shi et al. 2016).

Die Anwendung von AEC-Techniken ist grundsätzlich empfehlenswert, besonders auch für niedrige Spannungen, um eine angepasste Kompensation des Rauschens durch Erhöhung des Röhrenstroms zu erreichen (Nagayama et al. 2018, Nievelstein et al. 2010). Die hersteller-spezifischen Unterschiede sind zu beachten, so erfolgt die Einstellung der Zielparameter entweder über eine Referenzdosis, Referenzbilder oder Rauschlevel.

Für Hochkontrast-CT-Untersuchungen kann eine zusätzliche Zinnfilterung empfohlen werden. Bei gleichzeitiger Verringerung des Rauschens sind ähnlich niedrige effektive Dosiswerte wie mit niedrig-kV-Protokollen erzielbar (Bodelle et al. 2017, Vivier et al. 2020).

Die iterative Bildrekonstruktion (IR) kann das verstärkte Bildrauschen reduzieren, welches bei CT-Untersuchungen mit niedrig-kV-Protokollen entsteht. Bei gleichbleibender oder sogar verbesserter Bildqualität ist im Vergleich zu Standard-Röhrenspannung und Filtered Back Projection (FBP) eine signifikante Dosisreduktion möglich. In Abhängigkeit von der Scanner-Generation stehen verschiedene und fortgeschrittene IR-Techniken, wie modellbasierte Methoden zur Verfügung (Wetzel et al. 2020). Zukünftig wird mit Methoden der künstlichen Intelligenz und Deep-Learning-Rekonstruktionsalgorithmen eine noch verbesserte Rauschkontrolle ohne Einbußen der Ortsauflösung zu erreichen sein (Brady et al. 2021).

#### 5.3.4 Diagnostische Referenzwerte für pädiatrische CT-Untersuchungen

Die DRW, die nach § 185 Abs. 2 Nr. 2 StrlSchG und § 125 Abs. 1 StrlSchV bei allen häufigen Untersuchungen zur Reduzierung medizinischer Strahlenexpositionen festgelegt wurden, sind zu berücksichtigen. Die jeweils aktuellen DRW des BfS und die European Guidelines on Diagnostic Reference Levels for Paediatric Imaging (PiDRL) Commission und Energy 2018 sind über folgende Links abrufbar:

[https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/referenzwerte/referenzwerte\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/referenzwerte/referenzwerte_node.html) und  
[http://www.eurosafeimaging.org/wp/wp-content/uploads/2018/09/rp\\_185.pdf](http://www.eurosafeimaging.org/wp/wp-content/uploads/2018/09/rp_185.pdf) .

Die SSK empfiehlt:

Bei der Computertomografie soll die Dosis-Reduktion entsprechend der Fragestellung erfolgen, u. a. über die Reduktion des effektiven Röhrenstrom-Zeit-Produktes (mAs) und der Spannung (kV).

Für die CT-Untersuchung von Kindern sollen geeignete Untersuchungsprotokolle vorliegen und angewandt werden.

Spezielle Fort- und Weiterbildungen für Ärzt\*innen und das radiologisch-technische Personal im Hinblick auf die rasche Weiterentwicklung der Dosis-Reduktion im CT sollen erfolgen, um Verfahren zur Dosisoptimierung (u. a. iterative Rekonstruktion, möglicherweise auch künstliche Intelligenz) gezielt und mit dem nötigen Wissen anwenden zu können.

Die aktuellen diagnostischen Referenzwerte sind einzuhalten.

## 5.4 Nuklearmedizinische Verfahren (planare Szintigrafie, SPECT, PET)

### 5.4.1 Technische und organisatorische Optimierung

Im Vordergrund der Optimierung pädiatrischer nuklearmedizinischer Bildgebung steht neben der Wahl eines geeigneten Untersuchungsverfahrens und -ablaufs mit möglichst geringer Strahlenexposition eine gewichtsadaptierte Verringerung der injizierten Aktivität des Radiopharmakons im Vordergrund. Bei renal eliminierten Radiopharmaka sind additiv insbesondere eine gute Hydrierung und häufige Blasenentleerungen nach der Untersuchung zur Begrenzung der Blasendosis wichtig. Insgesamt sollte eine kindgerechte, entspannte Untersuchungssituation helfen, Bewegungsartefakte zu minimieren und die Untersuchungsdauer möglichst akzeptabel zu machen. Als nuklearmedizinische Verfahren stehen die planare Szintigrafie und Tomografie (Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) sowie Positronen-Emissions-Tomografie (PET)) zur Verfügung, heute häufig ergänzt durch CT oder MRT zur Schwächungskorrektur sowie für die anatomische und funktionelle Korrelation. Besonders bei Kindern und Jugendlichen sollten Geräte, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, eingesetzt werden, um die Vorteile einer verbesserten Systemempfindlichkeit und Ortsauflösung sowie die iterativen Rekonstruktionsverfahren zur Verringerung der applizierten Aktivität nutzen zu können.

Zur Abschätzung der Strahlenexposition der Kinder wird von der Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI) ein entsprechendes Online-Tool zur Verfügung gestellt (Nuclear Medicine Radiation Dose Tool, [www.snmmi.org](http://www.snmmi.org)). Die dem Kind angepasste Aktivität richtet sich in der Regel nach dem Körpergewicht. Tabellarische Richtwerte sind der Publikation der DRW (aktueller Stand: 15. Juni 2021) durch das BfS zu entnehmen (BfS 2021). Beim Einsatz moderner Technik und optimierter Protokolle können die empfohlenen Aktivitäten durchaus noch einmal unterschritten werden, ohne die Aussagekraft der Untersuchung zu gefährden, z. B. PET mit sehr großem Gesichtsfeld im Vergleich zu üblichen Geräten nach Stand der Technik. Der Beitrag der CT-Komponente bei Hybridgeräten zur Strahlenexposition hängt davon ab, ob das CT in diagnostischer Intention oder lediglich zur Schwächungskorrektur und anatomischen Korrelation angefertigt wird. Im letzteren Fall kann der Dosisbeitrag gering sein; es sollte mit denjenigen Aufnahmeparametern (kV, mAs) gearbeitet werden, die bei Erfüllung dieser Aufgaben zur geringsten Strahlenexposition führen (ansonsten s. o. CT).

Bei den Gammakamerasystemen für die planare und SPECT-Bildgebung sollten Mehrkopfsysteme statt Einkopfsysteme eingesetzt werden, da durch die vollständigere Abdeckung des Raumwinkels eine höhere Sensitivität und damit eine potenzielle Einsparung von injizierter Aktivität resultiert (Ausnahmen sind rein planare Untersuchungen wie Schilddrüsen- oder Nierendiagnostik). Die Kameraköpfe sollten technisch für pädiatrische Untersuchungen eine möglichst hohe Sensitivität aufweisen. Beim Postprocessing von tomografischen Aufnahmen sollen iterative Bildrekonstruktionsverfahren aufgrund des besseren Signal-zu-Rauschverhältnisses verwendet werden. Bei planaren Szintigrafien können adaptive Filterverfahren die Bildqualität verbessern (Hsiao et al. 2011). Speziell bei Kindern und Jugendlichen wären optimierte konvergierende Kollimatoren wünschenswert zur Erhöhung der Sensitivität, sind derzeit aber noch nicht verfügbar.

Neben Kamerasystemen mit kristallbasierten Detektoren sind zunehmend auch Geräte mit Halbleiterdetektoren (z. B. aus Cadmium-Zink-Tellurid, CZT) erhältlich, die für Radionuklide mit Photoemissionen im Energiebereich bis 200 keV (z. B. Technetium-99m, Iod-123) geeignet sind. Wegen ihrer besseren intrinsischen Orts- und Energieauflösung kann auch bei Reduktion der injizierten Aktivität eine gute Bildqualität erreicht werden. Durch die bessere Energieauflösung ist eine schärfere Trennung von Photopeak und Streustrahlung als auch die Durchführung von Multinukliduntersuchungen möglich.

Bei der PET-Bildgebung kann eine Reihe von technischen Innovationen (Tabelle 3, s. Anhang) zu signifikant besserer Bildqualität im Verhältnis zur injizierten Aktivität beitragen (z. B. Dickson et al. 2022, Schmall et al. 2021). Für Untersuchungen von Kindern und Jugendlichen sollte eine 3D-Datenakquisition verwendet werden.

Zunehmend größere axiale Gesichtsfelder (15 cm bis 106 cm sind derzeit klinisch verfügbar) steigern die Sensitivität der PET um ein Vielfaches (Cherry et al. 2018, Alberts et al. 2021). Die erforderliche injizierte Aktivität und die Akquisitionszeit können so reduziert werden, was insbesondere bei Verlaufsuntersuchungen wichtig ist.

Die DRW sind zu berücksichtigen. Entsprechende SOP mit optimierten Protokollen auf der Basis der erzielten Ergebnisse vor Ort sollten unter Einbeziehung der verschiedenen Berufsgruppen (MPE; ärztliches und medizin-technisches Personal) erarbeitet werden.

Zur Qualitätssicherung ist die regelmäßige Konstanzprüfung der Geräte gemäß aktueller DIN-Normen erforderlich (DIN 6855-1, DIN 6855-2, DIN 6855-4, DIN 6855-11, DIN 6858-1, DIN 6858-2).

#### 5.4.2 Rekonstruktionsverfahren

Der Einsatz moderner Rekonstruktionsverfahren kann helfen, die injizierte Aktivitätsmenge zu reduzieren. Eine weitere Verbesserung der Bildqualität kann durch die Einbeziehung von Korrekturparametern erfolgen (s. Anhang, Tabelle 3). Das klassische Verfahren der gefilterten Rückprojektion wird ersetzt durch iterative Rekonstruktionsverfahren (z. B. Stansfield et al. 2010).

Neue Rekonstruktionsverfahren können aber nicht nur die akquirierten Bilddaten verwenden, sondern auch weitere a-priori Informationen berücksichtigen. Bei dem heute üblichen Einsatz von Hybridgeräten (SPECT-CT, PET-CT, PET-MRT) erlangen zukünftig auch die komplexeren anatomischen und funktionellen Informationen aus CT und MRT zunehmende Bedeutung für die Rekonstruktion. Dieses wird bei der Schwächungskorrektur von SPECT und PET schon lange so durchgeführt, lässt sich aber verbessern (Brady und Shulkin 2015, Rui et al. 2015) und auch für andere Zwecke zur Rekonstruktion besserer Bilder bei geringerer applizierter Aktivität nutzen (Bland et al. 2019).

Ein modernes Entwicklungsfeld für die klinische Anwendung ist die Verwendung von Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) innerhalb der Bildrekonstruktion. Insbesondere für die Bildrekonstruktion von Datensätzen mit sehr geringer Statistik (niedrige applizierte Aktivität und/oder kurze Messdauern) bietet die Anwendung KI-Potential (Wang et al. 2021). Allerdings ist Vorsicht geboten, da auch Verfahren künstlicher Intelligenz nicht die physikalischen Limits überschreiten können. Problematisch ist zu erkennen, welche dann „rekonstruierten“ Informationen echt sind oder nur vom Algorithmus erzeugt wurden.

#### 5.4.3 Spezielle Aspekte der Hybridverfahren (PET-CT, PET-MRT, SPECT-CT)

Neben einer für den Strahlenschutz bei Kindern und Jugendlichen optimierten Akquisition der SPECT-, PET- und CT-Komponenten spielt bei der Hybridbildgebung auch das Zusammenspiel der beiden Teilsysteme eine entscheidende Rolle. Insbesondere gilt es zu entscheiden, ob bei einer SPECT-CT oder PET-CT die CT mit diagnostischer Qualität erforderlich ist oder ob eine CT mit geringerer Strahlendosis und ohne Kontrastmittelapplikation zur Schwächungskorrektur und anatomischen Orientierung („auxiliäres CT“) ausreicht. Letztere ist für viele Fragestellungen, wie z. B. Interimstaging von Tumorerkrankungen zur Evaluation des Therapieansprechens auf eine Chemotherapie häufig ausreichend. Für andere Fragestellungen kann die diagnostische CT auf einen kleineren Körperbereich beschränkt werden.

An wenigen Standorten verfügbar ist darüber hinaus die PET-MRT, welche eine geringere Strahlenexposition ermöglicht und insbesondere bei pädiatrischen Untersuchungen in vielen Fällen an Stelle der PET-CT treten kann. Bei Lungenuntersuchungen ist jedoch die CT derzeit der Goldstandard, die MRT holt aber auf (Serai et al. 2021).

Beim Einsatz einer diagnostischen CT, ggf. mit Kontrastmittelapplikation, in Kombination mit der PET gelten die in Abschnitt 4.3 angeführten Erfordernisse für die CT.

Falls technisch möglich sollten bei Hybridgeräten für die Schwächungskorrektur CT-Teilkörperaufnahmen in diagnostischer Intention mit Niedrigdosis-CT des Restkörpers kombiniert werden, ohne dass ein Körperareal doppelt aufgenommen wird.

Bei Untersuchungen des Gehirns kann auf die auxiliäre CT verzichtet werden, wenn die Schwächungskorrektur auf der Basis der mathematischen Korrekturverfahren erfolgen kann. Es ist darauf hinzuweisen, dass anatomische und funktionelle Bilder auch auf getrennten Geräten aufgenommen, aber trotzdem zusammen interpretiert werden können.

Die SSK empfiehlt deshalb:

Für nuklearmedizinische Untersuchungen soll eine gewichtsadaptierte Verringerung der injizierten Aktivitätsmenge des Radiopharmakons im Vergleich zu Erwachsenen im Vordergrund stehen.

Beim Einsatz der PET-CT soll individuell geprüft werden, ob eine diagnostische CT-Komponente erforderlich ist.

Die PET-MRT sollte bei entsprechender Verfügbarkeit bevorzugt zur PET-CT eingesetzt werden.

## 6 Literatur

- AAPM 2019 American Association of Physicists in Medicine (AAPM). Position statement on the use of patient gonadal and fetal shielding. AAPM Policy number PP 32-A. 2019
- Abalo et al. 2021 Abalo KD, Rage E, Leuraud K, Richardson DB, Le Pointe HD, Laurier D, Bernier MO. Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol*. 2021 Jan;51(1):45-56, doi: 10.1007/s00247-020-04803-0, Epub 2020/09/11
- ACR-SPR 2020 American College of Radiology, Society for Pediatric Radiology (ACR-SPR). ACR-SPR practice parameter for the safe and optimal performance of fetal magnetic resonance imaging MRI. Published 2015. Revised 2020. <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Practice-Parameters/mr-fetal.pdf>, zuletzt aufgerufen am 12.04.2021
- ACR 2020 American College of Radiology (ACR). ACR Manual on MR safety. <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Radiology-Safety/MR-Safety/Manual-on-MR-Safety.pdf>, zuletzt aufgerufen am 07.05.2021
- Alberts et al. 2021 Alberts I, Hunermund JN, Prenosil G, Mingels C, Bohn KP, Viscione M, Sari H, Vollnberg B, Shi K, Afshar-Oromieh A, Rominger A. Clinical performance of long axial field of view PET/CT: a head-to-head intra-individual comparison of the Biograph Vision Quadra with the Biograph Vision PET/CT. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2021 Apr 2, doi: 10.1007/s00259-021-05282-7, Epub 2021/04/03
- Backeljauw et al. 2015 Backeljauw B, Holland SK, Altaye M, Loepke AW. Cognition and Brain Structure Following Early Childhood Surgery With Anesthesia. *Pediatrics*. 2015 Jul;136(1):e1-12, doi: 10.1542/peds.2014-3526, Epub 2015/06/10
- BÄK 2007 2007 (BÄK). Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik – Qualitätskriterien röntgendiagnostischer Untersuchungen. Gemäß Beschluss des Vorstandes der Bundesärztekammer vom 23. November 2007. [http://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/LeitRoentgen2008Korr2.pdf](http://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user_upload/downloads/LeitRoentgen2008Korr2.pdf), zuletzt aufgerufen am 17.04.2019
- Becht et al. 2019 Becht S, Bitner RC, Ohmstede A, Pfeiffer A, Roßdeutscher R. Lehrbuch der radiologischen Einstelltechnik. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2019, p. 749, ISBN 978-3-662-56255-0, °2019
- Bernier et al. 2019 Bernier MO, Baysson H, Pearce MS, Moissonnier M, Cardis E, Hauptmann M, Struelens L, Dabin J, Johansen C, Journy N, Laurier D, Blettner M, Le Cornet L, Pokora R, Gradowska P, Meulepas JM, Kjaerheim K, Istad T, Olerud H, Sovik A, Bosch de Basea M, Thierry-Chef I, Kaijser M, Nordenskjold A, Berrington de Gonzalez A, Harbron RW, Kesminiene A. Cohort Profile: the EPI-CT study: a European pooled epidemiological study to quantify the risk of radiation-induced cancer from paediatric CT. *Int J Epidemiol*. 2019 Apr 1;48(2):379-81g, doi: 10.1093/ije/dyy231, Epub 2018/11/06
- BfS 2021 Bundesamt für Strahlenschutz. Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen. BAnz AT 06.07.2021 B4

- Bland et al. 2019 Bland J, Mehranian A, Belzunce MA, Ellis S, da Costa-Luis C, McGinnity CJ, Hammers A, Reader AJ. Intercomparison of MR-informed PET image reconstruction methods. *Med Phys.* 2019 Nov;46(11):5055-74, doi: 10.1002/mp.13812, Epub 2019/09/09
- BMU 2009 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Richtlinie für die technische Prüfung von Röntgeneinrichtungen und genehmigungsbedürftigen Störstrahlern – Richtlinie für Sachverständigenprüfungen nach der Röntgenverordnung (SV-RL) – vom 09. Januar 2009, zuletzt geändert durch Rundschreiben vom 01.08.2011
- Bodelle et al. 2017 Bodelle B, Fischbach C, Booz C, Yel I, Frellesen C, Kaup M, Beeres M, Vogl TJ, Scholtz JE. Single-energy pediatric chest computed tomography with spectral filtration at 100 kVp: effects on radiation parameters and image quality. *Pediatr Radiol.* 2017 Jun;47(7):831-7, doi: 10.1007/s00247-017-3813-1, Epub 2017/03/30
- Boice et al. 2003 Boice JD, Jr., Tawn EJ, Winther JF, Donaldson SS, Green DM, Mertens AC, Mulvihill JJ, Olsen JH, Robison LL, Stovall M. Genetic effects of radiotherapy for childhood cancer. *Health Phys.* 2003 Jul;85(1):65-80, doi: 10.1097/00004032-200307000-00013, Epub 2003/07/11
- Brady und Shulkin 2015 Brady SL, Shulkin BL. Ultralow dose computed tomography attenuation correction for pediatric PET CT using adaptive statistical iterative reconstruction. *Med Phys.* 2015 Feb;42(2):558-66, doi: 10.1118/1.4905045, Epub 2015/02/06
- Brady et al. 2021 Brady SL, Trout AT, Somasundaram E, Anton CG, Li Y, Dillman JR. Improving Image Quality and Reducing Radiation Dose for Pediatric CT by Using Deep Learning Reconstruction. *Radiology.* 2021 Jan;298(1):180-8, doi: 10.1148/radiol.2020202317, Epub 2020/11/18
- Cherry et al. 2018 Cherry SR, Jones T, Karp JS, Qi J, Moses WW, Badawi RD. Total-Body PET: Maximizing Sensitivity to Create New Opportunities for Clinical Research and Patient Care. *J Nucl Med.* 2018 Jan;59(1):3-12, doi: 10.2967/jnumed.116.184028, Epub 2017/09/25
- Chi et al. 2021 Chi J, Ji YD, Shen L, Yin SN, Ding N, Chen XF, Xu DF. Low-dose CT of paediatric paranasal sinus using an ultra-low tube voltage (70 kVp) combined with the flash technique. *Clin Radiol.* 2021 Jan;76(1):77.e17-77.e21, doi: 10.1016/j.crad.2020.08.023, Epub 2020/09/21
- Chu et al. 2020 Chu C, Gao Y, Lan X, Lin J, Thomas AM, Li S. Stem-Cell Therapy as a Potential Strategy for Radiation-Induced Brain Injury. *Stem Cell Rev Rep.* 2020 Aug;16(4):639-49, doi: 10.1007/s12015-020-09984-7, Epub 2020/05/18
- Cibull et al. 2013 Cibull SL, Harris GR, Nell DM. Trends in diagnostic ultrasound acoustic output from data reported to the US Food and Drug Administration for device indications that include fetal applications. *J Ultrasound Med.* 2013 Nov;32(11):1921-32, doi: 10.7863/ultra.32.11.1921, Epub 2013/10/25
- Commission und Energy 2018 Commission E, Energy D-Gf. European guidelines on diagnostic reference levels for paediatric imaging. Publications Office
- Culp et al. 2014 Culp MP, Barba JR, Jackowski MB. Shield placement: effect on exposure. *Radiol Technol.* 2014 Mar-Apr;85(4):369-76, Epub 2014/03/13

- Dickson et al. 2022 Dickson J, Eberlein U, Lassmann M. The effect of modern PET technology and techniques on the EANM paediatric dosage card. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. May;49(6):1964-9, doi: 10.1007/s00259-021-05635-2, Epub 2021/12/16
- DIN 6855-1 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6855-1. Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 1: In-vivo- und In-vitro-Messsysteme.
- DIN 6855-2 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6855-2. Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 2: Einkristall-Gamma-Kameras zur planaren Szintigraphie und zur Einzel-Photonen-Emissions-Tomographie mit Hilfe rotierender Messköpfe.
- DIN 6855-4 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6855-4. Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 4: Positronen-Emissions-Tomographen (PET).
- DIN 6855-11 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6855-11. Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 11: Aktivimeter (IEC/TR 61948-4:2006, modifiziert).
- DIN 6858-1 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6858-1. Qualitätsprüfung multimodaler Bildgebung - Teil 1: Konstanzprüfung PET/CT.
- DIN 6858-2 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6858-2. Qualitätsprüfung multimodaler Bildgebung - Teil 2: Konstanzprüfung SPECT/CT.
- DIN EN 60601-2-37 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 60601-2-37. Medizinische elektrische Geräte - Teil 2-37: Besondere Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale von Ultraschallgeräten für die medizinische Diagnose und Überwachung (IEC 60601-2-37:2007); Deutsche Fassung EN 60601-2-37:2008 + A11:2011; VDE 0750-2-37:2012-05.
- DIN EN 60627 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 60627. Bildgebende Geräte für die Röntgendiagnostik - Kenngrößen von Streustrahlenrastern für die allgemeine Anwendung und für die Mammographie (IEC 60627:2013); Deutsche Fassung EN 60627:2015.
- Esser et al. 2017 Esser M, Gatidis S, Teufel M, Ketelsen I, Nikolaou K, Schäfer JF, Tsiflikas I. Contrast-Enhanced High-Pitch Computed Tomography in Pediatric Patients Without Electrocardiography Triggering and Sedation: Comparison of Cardiac Image Quality With Conventional Multidetector Computed Tomography. *J Comput Assist Tomogr*. 2017 Jan;41(1):165-71, doi: 10.1097/RCT.0000000000000482, Epub 2016/09/30
- Esser et al. 2018 Esser M, Hess S, Teufel M, Kraus MS, Schneeweiß S, Gatidis S, Schaefer JF, Tsiflikas I. Radiation Dose Optimization in Pediatric Chest CT: Major Indicators of Dose Exposure in 1695 CT Scans over Seven Years. *Rofo*. 2018 Dec;190(12):1131-40, doi: 10.1055/a-0628-7222, Epub 2018/10/12
- Euler et al. 2019 Euler A, Saltybaeva N, Alkadhi H. How patient off-centering impacts organ dose and image noise in pediatric head and thoracoabdominal CT. *Eur Radiol*. 2019 Dec;29(12):6790-3, doi: 10.1007/s00330-019-06330-5, Epub 2019/07/07

- Euratom 2013 Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/51/EURATOM des Rates vom 22. Oktober 2013 zur Festlegung von Anforderungen an den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung hinsichtlich radioaktiver Stoffe in Wasser für den menschlichen Gebrauch. Amtsblatt der Europäischen Union, L 296/12, 07.11.2013
- Frantzen et al. 2012 Frantzen MJ, Robben S, Postma AA, Zoetelief J, Wildberger JE, Kemerink GJ. Gonad shielding in paediatric pelvic radiography: disadvantages prevail over benefit. *Insights Imaging*. 2012 Feb;3(1):23-32, doi: 10.1007/s13244-011-0130-3, Epub 2012/06/15
- Giles et al. 1956 Giles D, Hewitt D, Stewart A, Webb J. Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. *Lancet*. 1956 Sep 1;271(6940):447, doi: 10.1016/s0140-6736(56)91923-7, Epub 1956/09/01
- Goodman et al. 2019 Goodman TR, Mustafa A, Rowe E. Pediatric CT radiation exposure: where we were, and where we are now. *Pediatr Radiol*. 2019 Apr;49(4):469-78, doi: 10.1007/s00247-018-4281-y, Epub 2019/03/30
- Gottumukkala et al. 2019 Gottumukkala RV, Kalra MK, Tabari A, Otrakji A, Gee MS. Advanced CT Techniques for Decreasing Radiation Dose, Reducing Sedation Requirements, and Optimizing Image Quality in Children. *Radiographics*. 2019 May-Jun;39(3):709-26, doi: 10.1148/rg.2019180082, Epub 20190329
- Hess und Neitzel 2012 Hess R, Neitzel U. Optimizing image quality and dose for digital radiography of distal pediatric extremities using the contrast-to-noise ratio. *Rofo*. 2012 Jul;184(7):643-9, doi: 10.1055/s-0032-1312727, Epub 2012/05/24
- Hiles et al. 2021 Hiles P, Gilligan P, Damilakis J, Briers E, Candela-Juan C, Faj D, Foley S, Frija G, Granata C, de las Heras Gala H, Pauwels R, Merce MS, Simantirakis G, Vano E. European consensus on patient contact shielding. *Radiography*. 2021 Dec 23;12(1), doi: <https://doi.org/10.1186/s13244-021-01085-4>
- Holland et al. 2014 Holland SK, Altaye M, Robertson S, Byars AW, Plante E, Szaflarski JP. Data on the safety of repeated MRI in healthy children. *Neuroimage Clin*. 2014;4:526-30, doi: 10.1016/j.nicl.2014.01.013, Epub 2014/06/18
- Hsiao et al. 2011 Hsiao EM, Cao X, Zurakowski D, Zukotynski KA, Drubach LA, Grant FD, Yahil A, Vija AH, Davis RT, Fahey FH, Treves ST. Reduction in radiation dose in mercaptoacetyltriglycerine renography with enhanced planar processing. *Radiology*. 2011 Dec;261(3):907-15, doi: 10.1148/radiol.11110602, Epub 2011/09/09
- Hwang et al. 2019 Hwang M, Piskunowicz M, Darge K. Advanced Ultrasound Techniques for Pediatric Imaging. *Pediatrics*. 2019 Mar;143(3), doi: 10.1542/peds.2018-2609, Epub 2019/02/28
- ICRP 2007 International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann ICRP* 37(2-4):1-332, Elsevier, Oxford, 2007, ISBN 9780702030482, doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003
- ICRP 2013 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology. ICRP Publication 121. *Ann ICRP* 42(2):1-63, 2013, ISBN 9780702054396

- ICRP 2021 (ICRP). Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. 50(1), 2021
- Jeukens et al. 2020 Jeukens C, Kutterer G, Kicken PJ, Frantzen MJ, van Engelshoven JMA, Wildberger JE, Kemerink GJ. Gonad shielding in pelvic radiography: modern optimised X-ray systems might allow its discontinuation. *Insights Imaging*. 2020 Feb 7;11(1):15, doi: 10.1186/s13244-019-0828-1, Epub 2020/02/08
- Kaasalainen et al. 2014 Kaasalainen T, Palmu K, Reijonen V, Kortnesniemi M. Effect of patient centering on patient dose and image noise in chest CT. *AJR Am J Roentgenol*. 2014 Jul;203(1):123-30, doi: 10.2214/AJR.13.12028, Epub 2014/06/22
- Kaplan et al. 2018 Kaplan SL, Magill D, Felice MA, Xiao R, Ali S, Zhu X. Female gonadal shielding with automatic exposure control increases radiation risks. *Pediatr Radiol*. 2018 Feb;48(2):227-34, doi: 10.1007/s00247-017-3996-5, Epub 2017/10/18
- Kino et al. 2019 Kino A, Zucker EJ, Honkanen A, Kneebone J, Wang J, Chan F, Newman B. Ultrafast pediatric chest computed tomography: comparison of free-breathing vs. breath-hold imaging with and without anesthesia in young children. *Pediatr Radiol*. 2019 Mar;49(3):301-7, doi: 10.1007/s00247-018-4295-5, Epub 2018/11/11
- Kirsch und Mentzel 2018 Kirsch H, Mentzel HJ. [Renal functional diagnostics using magnetic resonance imaging]. *Radiologe*. 2018 Oct;58(10):914-24, doi: 10.1007/s00117-018-0451-z, Epub 2018/09/19
- Kleinerman 2006 Kleinerman RA. Cancer risks following diagnostic and therapeutic radiation exposure in children. *Pediatr Radiol*. 2006 Sep;36 Suppl 2:121-5, doi: 10.1007/s00247-006-0191-5, Epub 2006/07/25
- Knight 2014 Knight SP. A paediatric X-ray exposure chart. *J Med Radiat Sci*. 2014 Sep;61(3):191-201, doi: 10.1002/jmrs.56, Epub 2015/08/01
- Kollmann et al. 2020 Kollmann C, Jenderka KV, Moran CM, Draghi F, Jimenez Diaz JF, Sande R. EFSUMB Clinical Safety Statement for Diagnostic Ultrasound - (2019 revision). *Ultraschall Med*. 2020 Aug;41(4):387-9, doi: 10.1055/a-1010-6018, Epub 2019/10/09
- Lalзад et al. 2017 Lalзад A, Wong F, Schneider M. Neonatal Cranial Ultrasound: Are Current Safety Guidelines Appropriate? *Ultrasound Med Biol*. 2017 Mar;43(3):553-60, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2016.11.002, Epub 2016/12/17
- Lenzen et al. 2021 Lenzen H, Eßeling R, Strauß P, Stamm G. 2021. Leitfaden zur Einweisung und Schulung medizinischen Personals in die sachgerechte Handhabung von Geräten der Radiologie und Nuklearmedizin. Vorhaben 3617S42444. urn:nbn:de:0221-2021020925433. In: BfS, Hrsg. Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz
- Linnet et al. 2012 Linnet MS, Slovis TL, Miller DL, Kleinerman R, Lee C, Rajaraman P, Berrington de Gonzalez A. Cancer risks associated with external radiation from diagnostic imaging procedures. *CA Cancer J Clin*. 2012 Mar-Apr;62(2):75-100, doi: 10.3322/caac.21132, Epub 2012/02/03
- Marsh und Silosky 2019 Marsh RM, Silosky M. Patient Shielding in Diagnostic Imaging: Discontinuing a Legacy Practice. *AJR Am J Roentgenol*. 2019 Apr;212(4):755-7, doi: 10.2214/AJR.18.20508, Epub 2019/01/24

- Mathews et al. 2013 Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, Giles GG, Wallace AB, Anderson PR, Guiver TA, McGale P, Cain TM, Dowty JG, Bickerstaffe AC, Darby SC. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*. 2013 May 21;346:f2360, doi: 10.1136/bmj.f2360, Epub 2013/05/23
- Meulepas et al. 2019 Meulepas JM, Ronckers CM, Smets A, Nievelstein RAJ, Gradowska P, Lee C, Jannen A, van Straten M, de Wit MY, Zonnenberg B, Klein WM, Merks JH, Visser O, van Leeuwen FE, Hauptmann M. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J Natl Cancer Inst*. 2019 Mar 1;111(3):256-63, doi: 10.1093/jnci/djy104, Epub 2018/07/19
- Nagayama et al. 2018 Nagayama Y, Oda S, Nakaura T, Tsuji A, Urata J, Furusawa M, Utsunomiya D, Funama Y, Kidoh M, Yamashita Y. Radiation Dose Reduction at Pediatric CT: Use of Low Tube Voltage and Iterative Reconstruction. *Radiographics*. 2018 Sep-Oct;38(5):1421-40, doi: 10.1148/rg.2018180041, Epub 2018/09/13
- Nielsen et al. 2018 Nielsen BF, Schmidt AA, Mulvihill JJ, Frederiksen K, Tawn EJ, Stovall M, Johansen C, Boice JD, Jr., Winther JF. Chromosomal Abnormalities in Offspring of Young Cancer Survivors: A Population-Based Cohort Study in Denmark. *J Natl Cancer Inst*. 2018 May 1;110(5):534-8, doi: 10.1093/jnci/djx248, Epub 2017/12/12
- Nievelstein et al. 2010 Nievelstein RA, van Dam IM, van der Molen AJ. Multidetector CT in children: current concepts and dose reduction strategies. *Pediatr Radiol*. 2010 Aug;40(8):1324-44, doi: 10.1007/s00247-010-1714-7, Epub 2010/06/10
- Pasqual et al. 2020 Pasqual E, Bosch de Basea M, Lopez-Vicente M, Thierry-Chef I, Cardis E. Neurodevelopmental effects of low dose ionizing radiation exposure: A systematic review of the epidemiological evidence. *Environ Int*. 2020 Mar;136:105371, doi: 10.1016/j.envint.2019.105371, Epub 2020/02/03
- Pearce et al. 2012 Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, Howe NL, Ronckers CM, Rajaraman P, Sir Craft AW, Parker L, Berrington de Gonzalez A. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2012 Aug 4;380(9840):499-505, doi: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0, Epub 2012/06/12
- Pokora et al. 2016 Pokora R, Krille L, Dreger S, Lee C, Günster C, Zeeb H, Blettner M. Computed Tomography in Germany. *Dtsch Arztebl Int*. 2016 Oct 28;113(43):721-8, doi: 10.3238/arztebl.2016.0721, Epub 2016/11/22
- Rui et al. 2015 Rui X, Cheng L, Long Y, Fu L, Alessio AM, Asma E, Kinahan PE, De Man B. Ultra-low dose CT attenuation correction for PET/CT: analysis of sparse view data acquisition and reconstruction algorithms. *Phys Med Biol*. Oct 7;60(19):7437-60, doi: 10.1088/0031-9155/60/19/7437, Epub 2015/09/10
- Salerno et al. 2018 Salerno S, Granata C, Trapenese M, Cannata V, Curione D, Rossi Espagnet MC, Magistrelli A, Toma P. Is MRI imaging in pediatric age totally safe? A critical reprisal. *Radiol Med*. 2018 Sep;123(9):695-702, doi: 10.1007/s11547-018-0896-1, Epub 2018/05/05

- Schmall et al. 2021 Schmall JP, Surti S, Otero HJ, Servaes S, Karp JS, States LJ. Investigating Low-Dose Image Quality in Whole-Body Pediatric (18)F-FDG Scans Using Time-of-Flight PET/MRI. *J Nucl Med.* Jan;62(1):123-30, doi: 10.2967/jnumed.119.240127, Epub 2020/06/03
- Schneider und Seidenbusch 2019 Schneider K, Seidenbusch M. Technische Anforderungen. In: *Bildgebung des Thorax bei Neugeborenen und Kleinkindern.* Chapter 3 p. 17-30, ISBN 978-3-662-57814-8
- Serai et al. 2021 Serai SD, Rapp JB, States LJ, Andronikou S, Ciet P, Lee EY. Pediatric Lung MRI: Currently Available and Emerging Techniques. *AJR Am J Roentgenol.* Mar;216(3):781-90, doi: 10.2214/AJR.20.23104, Epub 2021/01/22
- Shi et al. 2016 Shi JW, Xu DF, Dai HZ, Shen L, Ji YD. Evaluation of chest CT scan in low-weight children with ultralow tube voltage (70 kVp) combined with Flash scan technique. *Br J Radiol.* 2016;89(1059):20150184, doi: 10.1259/bjr.20150184, Epub 2016/01/20
- Sorantin et al. 2013 Sorantin E, Weissensteiner S, Hasenburger G, Riccabona M. CT in children--dose protection and general considerations when planning a CT in a child. *Eur J Radiol.* 2013 Jul;82(7):1043-9, doi: 10.1016/j.ejrad.2011.11.041, Epub 2012/01/10
- SSK 2012 Strahlenschutzkommission (SSK). Ultraschallanwendung am Menschen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 256. Sitzung der SSK am 19./20.04.2012. urn:nbn:de:101:1-201309163944. Bekanntmachung im BAnz AT 22.04.2013 B4
- SSK 2018 Strahlenschutzkommission (SSK). Verwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln bei der diagnostischen Anwendung von Röntgenstrahlung am Menschen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 297. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 13./14. Dezember 2018. Bekanntmachung im BAnz AT 18.06.2019 B3
- SSK 2019 Strahlenschutzkommission (SSK). Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 300. Sitzung der SSK am 27./28. Juni 2019. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 51, Schnelle-Verlag, Berlin, 2019, ISBN 978-3-943422-51-1
- SSK 2022 Strahlenschutzkommission (SSK). Verwendung von Patienten-Strahlenschutzmitteln bei der diagnostischen Anwendung von Röntgenstrahlung am Menschen, verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22./23. September 2022
- Stansfield et al. 2010 Stansfield EC, Sheehy N, Zurakowski D, Vija AH, Fahey FH, Treves ST. Pediatric 99mTc-MDP bone SPECT with ordered subset expectation maximization iterative reconstruction with isotropic 3D resolution recovery. *Radiology.* 2010 Dec;257(3):793-801, doi: 10.1148/radiol.10100102, Epub 2010/09/23
- StrlSchG 2017 Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2510) geändert worden ist

- StrlSchV 2018 Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018. BGBl. I S. 2034, 2036, die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist
- Thomas et al. 2015 Thomas KE, Mann EH, Padfield N, Greco L, BenDavid G, Alzahrani A. Dual bolus intravenous contrast injection technique for multiregion paediatric body CT. *Eur Radiol.* 2015 Apr;25(4):1014-22, doi: 10.1007/s00330-014-3501-6, Epub 2014/11/25
- Tomà et al. 2019 Tomà P, Bartoloni A, Salerno S, Granata C, Cannatà V, Magistrelli A, Arthurs OJ. Protecting sensitive patient groups from imaging using ionizing radiation: effects during pregnancy, in fetal life and childhood. *Radiol Med.* 2019 Aug;124(8):736-44, doi: 10.1007/s11547-019-01034-8, Epub 2019/04/06
- UNSCEAR 2013 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report, Volume II: Scientific Annex B. Effects of radiation exposure of children. United Nations, New York, 2013, ISBN 978-92-1-142293-1
- Vivier et al. 2020 Vivier S, Deken V, Arous Y, Faivre JB, Duhamel A, Deschildre A, Flohr T, Remy J, Remy-Jardin M. Pediatric chest computed tomography at 100 kVp with tin filtration: comparison of image quality with 70-kVp imaging at comparable radiation dose. *Pediatr Radiol.* 2020 Feb;50(2):188-98, doi: 10.1007/s00247-019-04543-w, Epub 2019/12/20
- Waginger und Mentzel 2020 Waginger M, Mentzel HJ. Refluxdiagnostik – Pro MUS. *Aktuelle Urol.* 2020 Apr;51(2):145-50, doi: 10.1055/a-0965-9444, Epub 2019/10/09
- Walsh et al. 2014 Walsh L, Shore R, Auvinen A, Jung T, Wakeford R. Risks from CT scans--what do recent studies tell us? *J Radiol Prot.* 2014 Mar;34(1):E1-5, doi: 10.1088/0952-4746/34/1/E1, Epub 2014/03/07
- Wang et al. 2021 Wang YJ, Baratto L, Hawk KE, Theruvath AJ, Pribnow A, Thakor AS, Gatidis S, Lu R, Gummidipundi SE, Garcia-Diaz J, Rubin D, Daldrup-Link HE. Artificial intelligence enables whole-body positron emission tomography scans with minimal radiation exposure. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2021 Feb 1, doi: 10.1007/s00259-021-05197-3, Epub 2021/02/03
- Ward et al. 2008 Ward VL, Strauss KJ, Barnewolt CE, Zurakowski D, Venkatakrishnan V, Fahey FH, Lebowitz RL, Taylor GA. Pediatric radiation exposure and effective dose reduction during voiding cystourethrography. *Radiology.* Dec;249(3):1002-9, doi: 10.1148/radiol.2492062066, Epub 2008/10/23
- Westra 2019 Westra SJ. High-pitch CT, decreasing need for sedation and its potential side effects: some practical considerations and future directions. *Pediatr Radiol.* 2019 Mar;49(3):297-300, doi: 10.1007/s00247-018-4314-6, Epub 2018/12/12
- Wetzel et al. 2020 Wetzel M, May MS, Weinmann D, Hammon M, Treutlein C, Zeilinger M, Kiefer A, Trollmann R, Woelfle J, Uder M, Rompel O. Dual-source computed tomography of the lung with spectral shaping and advanced iterative reconstruction: potential for maximum radiation dose reduction. *Pediatr Radiol.* 2020 Aug;50(9):1240-8, doi: 10.1007/s00247-020-04714-0, Epub 2020/06/20

- Yu et al. 2019 Yu L, Bruesewitz MR, Vrieze TJ, McCollough CH. Lead Shielding in Pediatric Chest CT: Effect of Apron Placement Outside the Scan Volume on Radiation Dose Reduction. *AJR Am J Roentgenol.* 2019 Jan;212(1):151-6, doi: 10.2214/AJR.17.19405, Epub 2018/11/14
- Zadig et al. 2021 Zadig P, von Brandis E, Lein RK, Rosendahl K, Avenarius D, Ording Muller LS. Whole-body magnetic resonance imaging in children - how and why? A systematic review. *Pediatr Radiol.* 2021 Jan;51(1):14-24, doi: 10.1007/s00247-020-04735-9, Epub 2020/06/27
- Zvi et al. 2020 Zvi E, Shemer A, Toussia-Cohen S, Zvi D, Bashan Y, Hirschfeld-Dicker L, Oselka N, Amitai MM, Ezra O, Bar-Yosef O, Katorza E. Fetal Exposure to MR Imaging: Long-Term Neurodevelopmental Outcome. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2020 Nov;41(11):1989-92, doi: 10.3174/ajnr.A6771, Epub 2020/09/12

## Anhang

### A-1 Tabellen

*Tab. 1a: In der Empfehlung „Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren“ der SSK, verabschiedet am 27./28. Juli 2019, mit „primär indiziertes Verfahren (P)“ empfohlene CT-Untersuchungen für Kinder (SSK 2019)*

<b>Indikation</b>	<b>Bemerkung</b>
Hydrozephalus/Makrozephalus	CT nur in der Akutsituation (z. B. Ventildysfunktion), falls MRT nicht verfügbar. Als dosisreduzierte CCT durchzuführen und mit eingeschränktem Untersuchungsvolumen
Schädeltrauma akut mit neurologischer Symptomatik	CT Schädel, in Abh. vom pädiatrischen Glasgow Coma Score, für absolute und relative CT-Indikation Leitlinie Schädel-Hirn-Trauma (SHT) im Kindesalter beachten, für relative CT-Indikation nach Leitlinie alternativ MRT prüfen, falls verfügbar. Ggf. Kontroll-CT auch bei primär unauffälligem Befund, falls MRT nicht verfügbar.
Gesichtsschädelverletzung und -malformation	Vor operativer Rekonstruktion, Dünnschichtuntersuchung ggf. mit 3D-Rekonstruktion.

Tab. 1b: In der Empfehlung „Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren“ der SSK, verabschiedet am 27./28. Juli 2019, mit „weiterführendes Verfahren (W)“ empfohlene CT-Untersuchungen für Kinder (SSK 2019)

Indikation	Bemerkung
Kongenitale Erkrankungen, Fehlbildungen, Metabolische Erkrankungen	Keine Routine-Indikation. Low-Dose CT. Zur OP-Planung bei komplexen Innen- und Mittelohr- sowie Mittelgesichtsfehlbildungen
Prämature Nahtsynostose	Keine Routineindikation. Präoperativ mit 3D-Rekonstruktion (Niedrig-Dosis), ggf. MRT mit spezieller 3D-Technik alternativ bei Verfügbarkeit
Hydrozephalus – Shuntfehlfunktion	CT in Akutsituation bei älteren Kindern (Dosisreduktion s.o.), falls MRT nicht verfügbar
Taubheit bei Kindern	Hochauflösende Darstellung der Gehörknöchelchen oder bei speziellen Fragestellungen (z. B. Otosklerose) und zur OP-Planung; alternativ CBCT (Dosisreduktion)
Kopfschmerzen, akute bzw. schwere, vor allem SAB, neurologisches Defizit, Papillenödem, Änderung der Bewusstseinslage	CT nur, wenn dringlicher Verdacht auf Hirndruck besteht und kein MRT verfügbar ist
Sinusitis	Bei V. a. Orbitaphlegmone zur knöchernen Beurteilung, falls MRT nicht verfügbar. Dosisreduzierte Technik zur Operationsplanung und -navigation bei chronischer Sinusitis und Polyposis
Orbitatrauma	CT Orbita, in Abh. vom klinischen Schweregrad zum Frakturachweis bei adäquatem Trauma
Torticollis ohne Trauma	Abklärung von Luxation, atlanto-axialer Rotationssubluxation
Extremitätenverletzung	Weiterführende Untersuchung bei Beckenfrakturen, bei Übergangsfrakturen und komplexen Gelenkfrakturen (z. B. Ellenbogengelenk, oberes Sprunggelenk, Hand) bzw. zur OP-Planung/-Navigation
Schmerzhafte Gelenke	Bei Verdacht auf Osteoidosteom; alternativ dynamische MRT mit KM-Gabe
Wiederholter produktiver Husten	HRCT, in Einzelfällen. Zum Ausschluss von Bronchiektasien
Angeborene Herzfehler und kardiovaskuläre Erkrankungen	MRT/MRA/CTA Je nach klinischem und echokardiografischem Befund
Chronische Lungenerkrankungen	Insbesondere bei interstitiellen Lungenerkrankungen, Dosisanpassung an Größe und Gewicht. Ggf. Scan in In- und Expiration, Atemstillstand, Nativ
Stumpfes Bauchtrauma	CT mit KM, in Abh. von der Klinik bei schwerem Bauchtrauma. Pädiatrisch adaptierte Schockraumprotokolle mit geteiltem KM-Bolus und gewichtsadaptierter Dosisreduktion. Eventuell Spätaufnahmen wegen KM-Extravasat
Palpable RF im Abdomen oder Becken	Wenn MRT nicht möglich
Hämaturie mit Koliken	Zum Konkrementnachweis nativ in dosisreduzierter-Technik nur in ausgewählten Einzelfällen

Tab. 2: Einflussgrößen auf die Dosis im CT (Erläuterungen siehe Text)

<b>Einflussgröße</b>	<b>Bemerkungen</b>
Körperregion	Eingrenzen des Scanbereichs schützt sensible Organe
Native Hochkontrastuntersuchung vs. Weichteiluntersuchung	Verringerung des Röhrenstroms bei Hochkontrast-Untersuchungen
Kontrastmitteluntersuchungen	Einphasig, evtl. Doppelbolus-Technik
FoV, Kollimation, Rotationszeit, Pitch	optimaler an den Scanner adaptierte Kompromiss aus angepasstem FoV, niedriger Kollimation, kurzer Rotationszeit und hohem Pitch
Röhrenspannung/-Strom und AEC	Niedrig kV-Untersuchungen und AEC bei optimiertem Protokoll
Filterung	Optional spektrale Filterung z. B. Zinnfilter empfehlenswert
Bildrekonstruktion	Möglichst Dosisreduktion durch iterative Bildrekonstruktion bei gleichbleibender oder sogar verbesserter Bildqualität im Vergleich zu Standardprotokoll
Lagerung	Die Lagerung der Patientin oder des Patienten sollte durch Laserpointer und 3D-Kameras kontrolliert werden. Für die ordnungsgemäße Steuerung der Dosismodulation ist die exakte Lage der Patientin oder des Patienten im Isozentrum ein absolutes Muss. Extrakorporale metallische Fremdkörper sollten vollständig aus dem Untersuchungsfeld entfernt werden.

Tab. 3: Innovation bei der PET-Technik

<b>Innovation</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
3D-Datenakquisition	Es werden auch Koinzidenzlinien zwischen jeweils zwei Detektoren berücksichtigt, die sich nicht im selben axialen Detektorring oder in zwei unmittelbar benachbarten Ringen befinden, was die Sensitivität erhöht.
time-of-flight	Die Zeitauflösung der verwendeten Detektoren erlaubt nicht nur die Erfassung der Koinzidenzlinie, sondern auch die Ermittlung des ungefähren Entstehungsortes der Photonen auf dieser Linie.
resolution recovery	Die Abbildungseigenschaften des Gerätes an den verschiedenen Orten im Gesichtsfeld können einmalig gemessen und bei der Rekonstruktion zur Verbesserung der Auflösung berücksichtigt werden.
silicon photomultiplier	Die noch auf Röhren basierenden klassischen Photomultiplier hinter den Detektorkristallen werden durch Halbleiterbauelemente mit digitaler Auslese ersetzt.
continuous bed motion	Der Tischvorschub erfolgt während der Aufnahme kontinuierlich, was eine homogenere Abbildung und die Möglichkeit einer variablen, auf den jeweiligen Körperteil optimierte Geschwindigkeit ermöglicht.
motion correction	Verfahren, welche der Verschlechterung der effektiven Auflösung durch Atmung oder Herzschlag entgegenwirken.

## A-2 Abkürzungsverzeichnis

a. p.	anterior-posterior
AEC	Automatic Exposure Control
ADR	Automatische Dosisleistungsregelung
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V.
BÄK	Bundesärztekammer
CT	Computertomografie
CTDI <sub>vol</sub>	Computed Tomography Dose Index im Untersuchungsvolumen
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DLP	Dosislängenprodukt
DQE	Detective quantum efficiency (Quantenausbeute)
DRW	Diagnostische Referenzwerte
FOA	Patienten-Detektor-Abstand
FoV	Field of View
IR	Iterative Bildrekonstruktion
KE	Kolonkontrasteinlauf
LNT	Linear-no-threshold
LIH	Last Image Hold
MCU	Miktionszystourethrografie
MDP	Magendarmpassage
MRT	Magnetresonanztomografie
MTRA	Medizinisch-technische Röntgenassistent*innen
MUS	Miktionsurosonografie
ODA	Patienten-Detektor-Abstand
p. a.	posterior-anterior
PET	Positronen-Emissions-Tomografie
RI	Rechtfertigende Indikation
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SOP	Standard operating procedures (Arbeitsanweisungen)
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts