

Strahlenhygienische Aspekte bei der Röntgenuntersuchung des Thorax

Die Thoraxaufnahme ist bei Kindern die Röntgenuntersuchung des Körperstamms mit dem niedrigsten Dosisbedarf [24, 31], welcher in Abhängigkeit von der Untersuchungstechnik um einen Faktor 1:50 variieren kann. Gleichzeitig ist die Thoraxaufnahme eine der häufigsten Röntgenuntersuchungen und trägt daher wesentlich zur kollektiven medizinischen Strahlenexposition der Bevölkerung bei [24]. Somit ist die konventionelle Röntgenuntersuchung des Thorax bei Kindern von strahlenepidemiologischer Relevanz [14], wenn gleich eine Erhöhung des Risikos für stochastische somatische Spätwirkungen nach konventioneller radiologischer Diagnostik im Kindesalter bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte (z. B. [15]). Aus diesem Grunde gilt im medizinischen Strahlenschutz die in der Patientenrichtlinie des Europäischen Rates [8] niedergelegte Trias des Rechtfertigungs-, Optimierungs- und Limitierungsprinzips.

Prinzipien des medizinischen Strahlenschutzes

Das Rechtfertigungsprinzip: Stellung der rechtfertigenden Indikation

Das wirkungsvollste strahlenhygienische Prinzip ist das Rechtfertigungsprinzip [18], welches mit dem Begriff der rechtfertigenden Indikation Eingang in die Deutsche Röntgenverordnung [37] ge-

funden hat. In Ermangelung diagnostischer Alternativen ist die Thoraxaufnahme in der Pädiatrie bei zahlreichen klinischen Indikationen (z. B. Belüftungsstörungen, Pneumonien, Pneumothorax, chronische Lungenerkrankungen, Lagekontrolle z. B. von Drainagen) bereits a priori indiziert. Dementsprechend erfolgt seit Jahrzehnten nahezu unverändert [10] etwa die Hälfte aller Thoraxuntersuchungen bei Kindern bis zum 1. Lebensjahr (■ **Abb. 1, 2**).

Das Optimierungsprinzip: ALARA-Konzept

Mit dem ALARA-Konzept (*ALARA* „as low as reasonably achievable“) wurde im medizinischen Strahlenschutz im Jahre 1977 von der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP dem Grundsatz der Rechtfertigung [19] das Prinzip der Optimierung einer indizierten Röntgenuntersuchung [12] hinzugefügt. In der pädiatrischen Radiologie wurde dieses Prinzip bereits im Jahre 1976 durch den von Fendel [11] unter dem Titel „Die zehn Gebote des Strahlenschutzes bei der Röntgendiagnostik im Kindesalter“ publizierten Leitfaden auf nationaler Ebene antizipiert.

Den qualitativen Richtlinien des ALARA-Konzepts wurden quantitative Ausführungsbestimmungen zur Optimierung von Röntgenuntersuchungen bzw. zur Begrenzung der Strahlenexposition in Gestalt von Leitlinien bzw. Referenzwerten zur Seite gestellt [21]. Während in den Leitlinien der Bundesärztekammer [5] ein Abschnitt den pädiatrischen Besonderheiten konventio-

ner Röntgenuntersuchungen gewidmet ist, wurden mit den Leitlinien der Europäischen Kommission [9] und einzelner kinderradiologischer Zentren [4, 26] spezielle Leitlinien für die pädiatrische Radiologie geschaffen. Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat eine Orientierungshilfe für Röntgenuntersuchungen zur Verfügung gestellt [36], die in einem eigenen Kapitel für die Pädiatrie die bei bestimmten klinischen Indikationen notwendigen Untersuchungen aufführt.

Das Limitierungsprinzip: Dosisreferenzwerte

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Qualitätssicherung v. a. in der pädiatrischen Radiologie stellen Dosisreferenzwerte dar. Als Dosisreferenzwert einer Röntgenuntersuchung wird in der Regel die 75%-Perzentile der in einem großen Patientenkollektiv ermittelten Häufigkeitsverteilung der Einfalldosen oder Dosisflächenprodukte definiert.

Neben den erstmals im Jahre 2003 bekanntgemachten Referenzwerten des Bundesamts für Strahlenschutz für diagnostische Röntgenuntersuchungen [6] wurden bereits im Jahre 1998 im Dr. von Haunerschen Kinderspital der Universität München spezifische Referenzwerte für die pädiatrische Röntgenuntersuchung des Thorax [28] erarbeitet. Wie ■ **Abb. 3** zeigt, konnten dort durch strenge Befolgung der Leitlinien die Referenzwerte des Bundesamts für Strahlenschutz für die Thoraxradiographie bereits seit Jahrzehnten eingehalten werden.

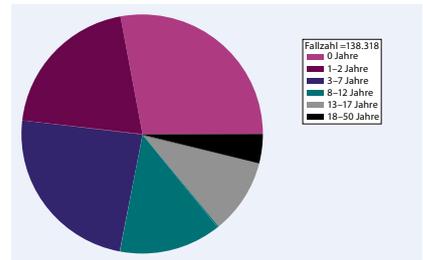
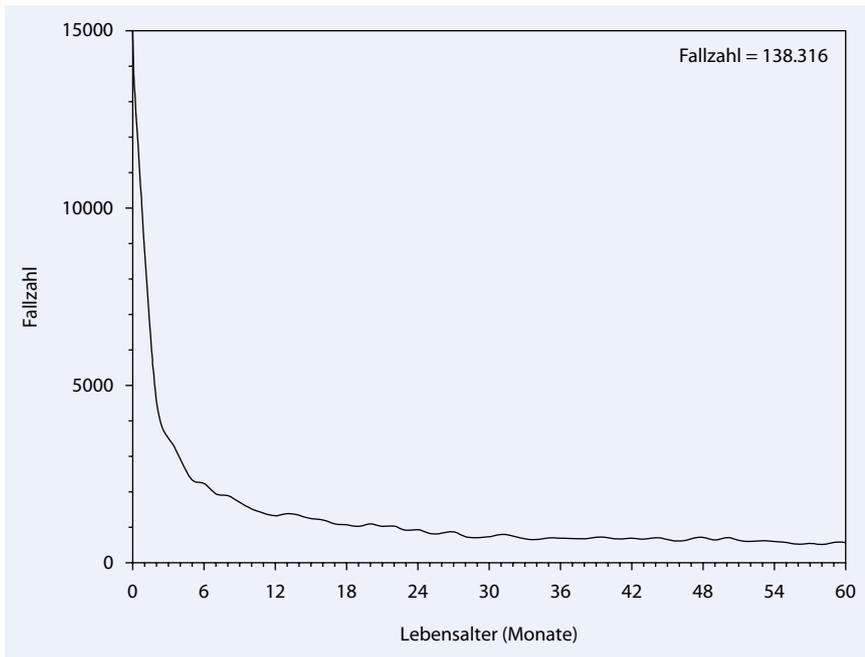


Abb. 2 ▲ Anzahl der Thoraxaufnahmen und Anzahl der Thoraxaufnahmen pro Patient in den einzelnen Altersgruppen. Rund die Hälfte der insgesamt 138.316 Untersuchungen wurde in den ersten beiden Lebensjahren durchgeführt

Abb. 1 ▲ Altersverteilung konventioneller Röntgenuntersuchungen des Thorax am Dr. von Hauner'schen Kinderspital im Zeitraum von 1976 bis 2012. Rund ein Drittel der insgesamt 138.316 Untersuchungen wurde im 1. Lebensjahr durchgeführt

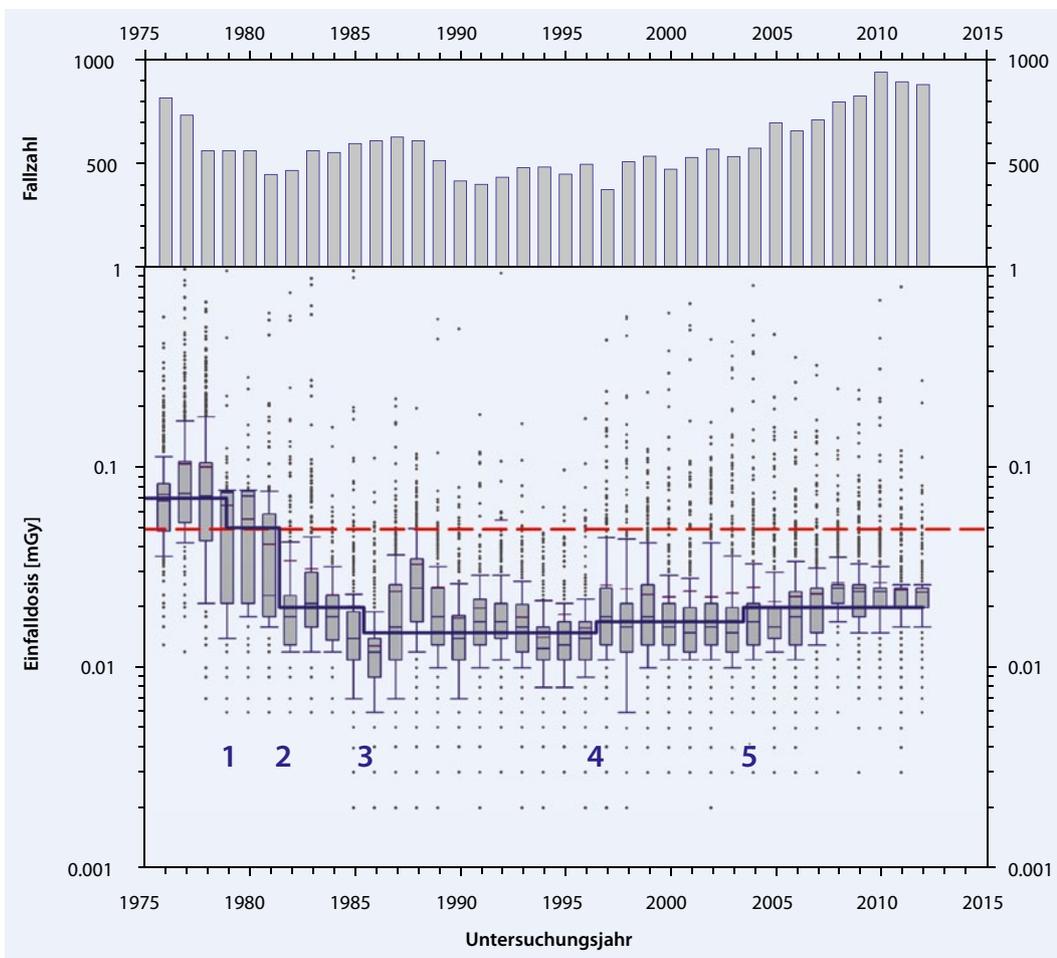


Abb. 3 ◀ Entwicklung des Dosisbedarfs der Thoraxradiographie im sagittalen Strahlengang in der Altersgruppe der 3- bis 7-Jährigen am Dr. von Hauner'schen Kinderspital zwischen 1976 und 2012. Die sprunghaftigen Dosisreduktionen sind im Wesentlichen auf folgende technische Modifikationen zurückzuführen: 1 Erhöhung der Gesamtfilterung, 2 Erhöhung der Gesamtfilterung und der Film-Folien-Empfindlichkeitsklasse, 3 und 4 Verwendung unterschiedlicher Film-Folien-Systeme mit unbekanntem Empfindlichkeitsklassen, 5 Einsatz herkömmlicher Speicherfoliensysteme (sogenannter „powder image plates“). Die rote gestrichelte Linie entspricht dem Referenzwert des Bundesamtes für Strahlenschutz [6]

Physikalische und röntgentechnische Aspekte der Thoraxuntersuchung

Die Optimierung einer Röntgenuntersuchung muss stets unter Berücksichtigung der klinischen Fragestellung und der Situation des Patienten sowie der aufnahmetechnischen Möglichkeiten erfolgen. Dabei geht die Minimierung des Dosisbedarfs der Röntgenuntersuchung nicht zwangsläufig linear mit einer Minimierung der Strahlenexposition des Patienten einher: Während der Dosisbedarf der Röntgenuntersuchung im Wesentlichen von physikalisch-technischen Merkmalen geprägt wird, ist die Strahlenexposition des Patienten zusätzlich noch vom Strahlengang und von der Strahlenfелеinstellung und diese wiederum von der klinischen Situation abhängig. Somit stellt die Optimierung der Strahlenexposition des Patienten vor dem Hintergrund einer vernünftigen Bildqualität [25] einen multimodalen Prozess dar, in welchem alle technischen Komponenten der Röntgeneinrichtung unter Berücksichtigung der anthropometrischen Eigenschaften des Patienten aufeinander abgestimmt werden müssen [12, 27, 39].

In einem Schema zeigt **Abb. 4** die einzelnen technischen Komponenten einer Röntgeneinrichtung, wie sie den röntgentechnischen Ablauf einer konventionellen Röntgenuntersuchung der Thoraxregion bestimmen.

Röhrenspannung, -strom und Belichtungsdauer

Die Durchdringungsfähigkeit und damit die Strahlenqualität der Röntgenstrahlung muss auf den vom Lebensalter des Patienten und vom Strahlengang der Röntgenuntersuchung abhängigen Durchstrahlungsdurchmesser der jeweiligen Körperregion abgestimmt werden. Hierbei unterscheidet sich die Thoraxregion ganz wesentlich von anderen anatomischen Regionen [16]. Die Strahlenqualität einer Röntgenquelle wird durch ihr Photonenflussdichtespektrum („Röntgenspektrum“) definiert und kann durch die Kenngrößen Röhrenspannung, Anodenwinkel und Gesamtfilterung charakterisiert werden [3]. Die vom Röntgenene-

Radiologe 2015 · 55:580–587 DOI 10.1007/s00117-014-2776-6
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

M.C. Seidenbusch · K. Schneider

Strahlenhygienische Aspekte bei der Röntgenuntersuchung des Thorax

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Strahlenhygiene in der konventionellen radiologischen Diagnostik basiert auf der Trias Rechtfertigung, Optimierung bzw. Limitierung der Röntgenuntersuchung bzw. Strahlenexposition. Die Optimierung einer Röntgenuntersuchung ist als multimodaler Prozess aufzufassen, in welchem sämtliche technische Komponenten der Röntgeneinrichtung sowohl miteinander als auch mit den anthropometrischen Eigenschaften des Patienten und der klinischen Fragestellung abzustimmen sind.

Ziel der Arbeit. Im vorliegenden Beitrag werden die technischen Komponenten bei der konventionellen Röntgenuntersuchung des pädiatrischen Thorax in ihrer Beziehung zueinander dargestellt und Empfehlungen für eine Optimierung der konventionellen Thoraxaufnahme bei Kindern ausgesprochen.

Ergebnisse und Diskussion. Die wichtigsten Maßnahmen bestehen in einer korrekten Einblendung, in der Anfertigung der Aufnahmen im posteroanterioren Strahlengang und im Verzicht auf Streustrahlenraster etwa bis zum 8. Lebensjahr. Auch sind in der Kinderradiologie Thoraxaufnahmen selbst bei suboptimaler Inspiration häufig noch diagnostisch verwertbar. Die Optimierung einer Röntgenuntersuchung bewirkt fast zwangsläufig eine Limitierung der Strahlenexposition.

Schlüsselwörter

Strahlenexposition · Strahlenschutz · Kinderradiologie · Anthropometrische Eigenschaften · Klinische Fragestellung

Aspects of radiation protection during chest X-radiography

Abstract

Background. Radiation safety in conventional X-ray diagnostics is based on the concepts of justification, optimization of an X-ray examination and limitation of the radiation exposure achieved during the examination. Optimization of an X-ray examination has to be considered as a multimodal process in which all technical components of the X-ray equipment have to be adapted to each other and also have to be adapted to the anthropometric characteristics of patients and the clinical indications.

Objectives. In this article the technical components of a conventional pediatric chest X-radiograph are presented, and recommendations for optimizing chest X-rays in children are provided.

Results and discussion. The following measures are of prime importance: correct x-ray beam limitation, using the posteroanterior projection when possible and not using anti-scatter grids in children under approximately 8 years old. In pediatric radiology chest x-rays that are taken not at the peak of inspiration can also be of some diagnostic significance. Optimization of an X-ray examination inevitably results in the limitation of radiation exposure.

Keywords

Radiation exposure · Radiation protection · Pediatric radiology · Anthropometric characteristics · Clinical issues

rator bereitgestellte Röhrenspannung definiert hierbei die Grenzenergie des Röntgenspektrums, während die Gesamtfilterung eine Erhöhung der effektiven Energie durch Verschiebung des Röntgenspektrums in Richtung höherer Photonenenergien bewirkt.

Im Allgemeinen nimmt bei unverändertem mAs-Produkt die absorbierte Dosis einer Röntgenuntersuchung mit der Röhrenspannung überproportional ab ([10, 32]), wobei das Röhrenstrom-Zeit-Produkt (mAs-Produkt) zur Erzie-

lung der notwendigen Bildempfängerdosis auf die gewählte Röhrenspannung abgestimmt werden muss. Wird die Röhrenspannung gesenkt, muss das mAs-Produkt und damit die Belichtungsdauer entsprechend erhöht werden, was eine höhere absorbierte Dosis zur Folge hat. Da sich die Bewegungsunschärfe mit zunehmender Belichtungsdauer vergrößert, sollte bei pädiatrisch genutzten Röntengeräten eine Möglichkeit zur Einstellung bzw. Ablesung der Belichtungsdauer vorgesehen sein; dies ist nicht bei allen Röntgen-

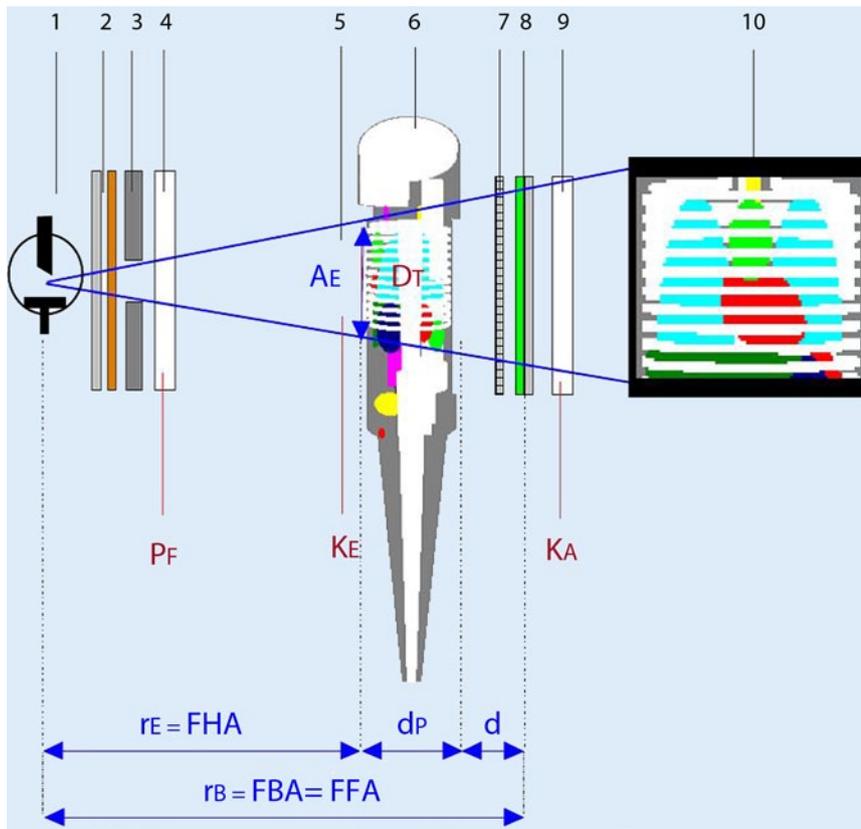


Abb. 4 ▲ Schema einer konventionellen Thoraxübersichtsaufnahme im a.p.-Strahlengang. Röntgentechnik (schwarze Beschriftung): 1 Röntgenröhre, 2 Gesamtfiltration, 3 Blendensystem, 4 Dosisflächenprodukt-Messkammer, 5 Strahlenfeld des Nutzstrahlenbündels, 6 Patient, 7 Streustrahlenraster (fakultativ), 8 Bildempfängersystem, 9 Austrittsdosis-Messkammer (fakultativ), 10 virtuelles Strahlenbild. Strahlengeometrie (blaue Beschriftung): r_E Fokus-Haut-Abstand (FHA), r_B Fokus-Bildempfänger-Abstand (FBA), A_E Feldgröße in Strahleneintrittsebene, d_P Durchstrahlungsdurchmesser, d Patient-Bildempfänger-Abstand. Dosisgrößen (rote Beschriftung): K_E Einfallsdosis (Luft-Kerma), P_F Dosis-Flächen-Produkt (DFP), D_T Organdosis im Gewebe T, K_A Austrittsdosis (Luftkerma). (Aus [31], © M. Seidenbusch 2015). Die Darstellungen des Patientenphantoms des 5-jährigen Kindes und der Projektionsradiographie wurden von der Benutzeroberfläche des PCXMC-Algorithmus [35] übernommen

geräten, insbesondere nicht bei fahrbaren Geräten der Fall. Bei Thoraxaufnahmen des Früh- und Neugeborenen sollte eine Grenzbelichtungsdauer von 4 ms nicht überschritten werden.

Abweichend von den Leitlinien der Deutschen Bundesärztekammer [5], in denen für pädiatrische Thoraxradiographien eine Röhrenspannung von 60–80 kV bzw. ab dem 8. Lebensjahr eine Röhrenspannung von 100–120 kV empfohlen wird, wurden am Dr. von Haunerschen Kinderspital vor dem 8. bzw. jenseits des 8. Lebensjahrs selten Röhrenspannungen über 70 bzw. 110 kV verwendet. Im angloamerikanischen Raum werden bei Neugeborenen und jungen Säuglingen sogar Röhrenspannungen von 50–60 kV gewählt.

Werden moderne digitale Needle-Detektoren verwendet, empfiehlt sich entgegen den Leitlinien aufgrund der höheren Quanteneffizienz die Erhöhung der Röhrenspannung auf 70–80 kV. Bei Frühgeborenen ist dies allerdings aufgrund der niedrigeren Kontrastauflösung nicht sinnvoll [29], außerdem kann hier die minimale Schaltzeit des Röntgenerators unterschritten werden.

Gesamtfiltration

Das Photonenstrahlungsfeld verlässt die Röntgenröhre durch das Strahlenaustrittsfenster, wobei es eine erste, als *Eigenfiltration* bezeichnete Modifikation seiner spektralen Zusammensetzung erfährt: Niederenergetische Komponenten

des Röntgenspektrums werden durch Absorptions- und Streuprozesse in der Wandung des Strahlenaustrittsfensters aus dem Primärstrahlenbündel entfernt. Diese Entfernung niederenergetischer, sogenannter *weicher* Anteile aus dem Röntgenspektrum bewirkt eine Erhöhung der effektiven Energie und wird auch als *Aufhärtung* der Röntgenstrahlung bezeichnet. Dieser Effekt ist erwünscht, da andernfalls die niederenergetischen Strahlungsanteile in den oberflächlichen Schichten des Patienten absorbiert würden, ohne zur Bildgebung beizutragen. Aus diesem Grunde wird für die Eigenfiltration der in der radiologischen Diagnostik eingesetzten Röntgenstrahler gegenwärtig ein Aluminiumgleichwert von mindestens 2,5 mm gefordert. In der Leitlinie der Bundesärztekammer [5] wird für konventionelle Röntgenuntersuchungen von Kindern darüber hinaus eine Zusatzfiltration von mindestens 1,0 mm Aluminium und 0,1 mm Kupfer, mithin also eine Gesamtfiltration von 3,5 mm Aluminium und 0,1 mm Kupfer, empfohlen. Röntgenspektren, wie sie aus einer Röhrenspannung von 70 kV unter verschiedenen Gesamtfiltrationen resultieren, zeigt schematisch

■ **Abb. 5.**

Strahlenfeldeinstellung

Eine möglichst enge Einblendung ist in zweifacher Hinsicht von herausragender Bedeutung, da sie sich zum einen durch Verringerung des durchstrahlten Volumens positiv auf die Strahlenexposition des Patienten und zum anderen durch Verminderung der Streustrahlung und damit des Bildrauschens positiv auf die Bildqualität auswirkt. Wie ■ **Abb. 6** anhand der Simulation einer Thoraxübersichtsaufnahme an mathematischen Phantomen des einjährigen Kindes zeigt, kann durch optimale Einblendung (*grüne Feldbegrenzungen* in ■ **Abb. 6**) gegenüber einer suboptimalen Einblendung des Strahlenfeldes (*rote Feldbegrenzungen* in ■ **Abb. 6**) die Exposition strahlenempfindlicher Gewebe reduziert werden.

Diese Feststellung gilt auch für die Leber, die bei Thoraxaufnahmen zwangsläufig partiell vom Primärstrahlenfeld erfasst wird, deren Exposition aber durch strikte Einblendung zumindest reduziert werden

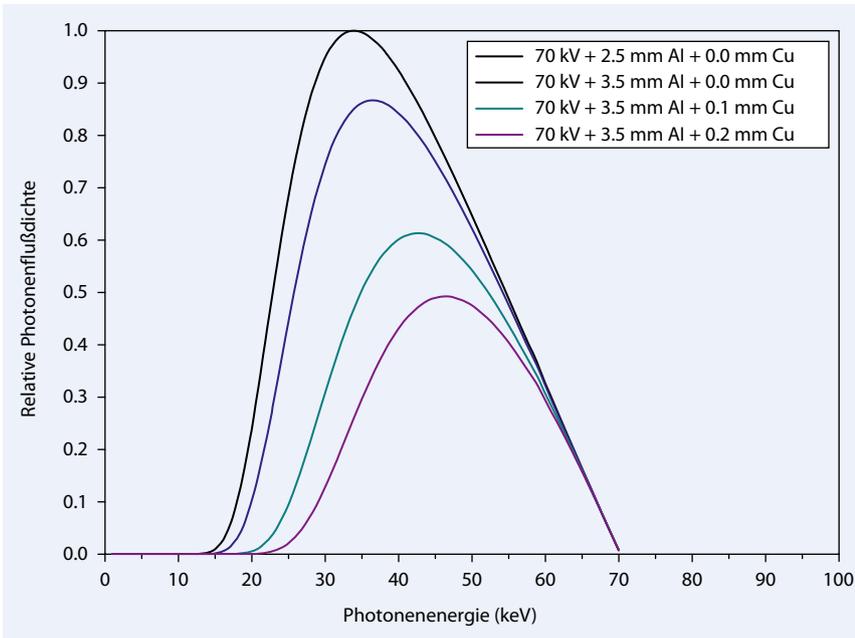


Abb. 5 ▲ Abhängigkeit der relativen Photonflussdichte von 70-kV-Röntgenstrahlung von der Gesamtfilterung. Die Simulation der Röntgenspektren erfolgte mithilfe des PCXMC-Algorithmus [35]

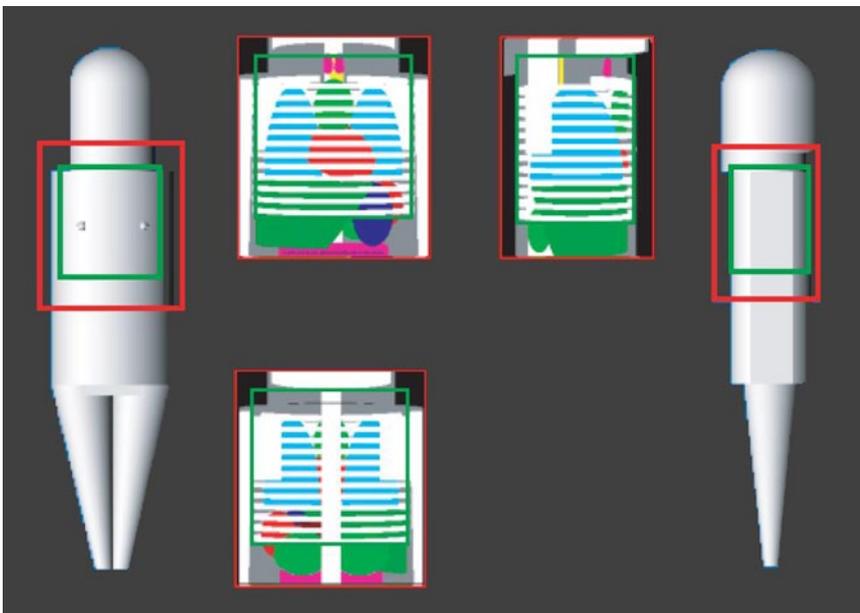


Abb. 6 ▲ Auswirkung der Einblendung des Nutzstrahlenbündels auf die Strahlenexposition von Organen und Geweben am Beispiel der konventionellen Thoraxröntgenübersichtsaufnahme beim einjährigen Kind in sagittaler Projektion (*links*) und rechtslateraler Projektion (*rechts*). Im a.p.-Strahlengang lassen sich unter optimaler Strahlenfeldeinstellung (*grüne Strahlenfeldbegrenzungen*) die unter suboptimaler Strahlenfeldeinstellung (*rote Strahlenfeldbegrenzungen*) vom Primärstrahlenfeld erfassten kaudalen Abschnitte des Magens, der Leber und des Intestinums wirkungsvoll ausblenden. (Die Darstellungen des Patientenphantoms und der Projektionsradiographie wurden wie in **Abb. 4** von der Benutzeroberfläche des PCXMC-Algorithmus [35] übernommen). **Abb. 6** wurde mit freundlicher Genehmigung des Thieme-Verlags einer analogen Abbildung in [32] entnommen)

kann. Dies ist v. a. bei Frühgeborenen von Bedeutung, da deren Leber funktionell noch als Teil des hämatopoetischen Systems zu betrachten ist: Bei Frühgeborenen befindet sich die Erythropoese noch in der hepatolienalen Phase und wird beispielsweise im Gestationsalter von 28 Wochen noch zu rund 50% durch hämatopoetische Stammzellen in der Leber bzw. zu etwa 15% durch solche in der Milz vollzogen [22]; selbst beim reifen Neugeborenen erfolgt sie in der 1. Lebenswoche noch zu etwa 5% in der Leber und wird nicht vor Vollendung des 1. Lebensmonats vollständig vom roten Knochenmark übernommen [22].

Demgegenüber wird bei projektionsradiographischen Untersuchungen häufig zu weit aufgeblendet und zudem fast immer auch falsch zentriert [13]. Die in der Erwachsenenradiologie üblichen absoluten Toleranzen in der Strahlenfeldeinstellung können aufgrund der dramatischen Feldgrößenunterschiede in den einzelnen Altersgruppen nicht ohne Modifikation auf die pädiatrische Thoraxuntersuchung übertragen werden: So bewirkt eine Vergrößerung des Strahlenfeldes um jeweils 2 cm am oberen und am unteren Feldrand beim Jugendlichen eine Vergrößerung des Strahlenfeldes um lediglich 8%, beim unreifen Frühgeborenen der 26. Schwangerschaftswoche aber um 66% (**Abb. 7**; [26]). In diesem Zusammenhang und vor dem Hintergrund der besonderen Bedeutung der Qualitätssicherung in der pädiatrischen Radiologie ist die Möglichkeit der elektronischen Nachkollimation von Thoraxaufnahmen im Rahmen der digitalen Bildverarbeitung äußerst kritisch zu beurteilen, weil damit qualitätssichernde Maßnahmen unmöglich werden [20].

Dosisflächenprodukt

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Dokumentation der im Rahmen einer konventionellen Röntgenuntersuchung applizierten Dosis gemäß §28 RöV [37] vorgeschrieben. Ein einfacher und praktikabler Indikator für die Strahlenexposition des Patienten ist in der konventionellen Radiologie das Dosisflächenprodukt (DFP), welches seiner physikalischen Definition gemäß das Produkt aus der Luftkerma und der Feldgröße des Nutzstrah-

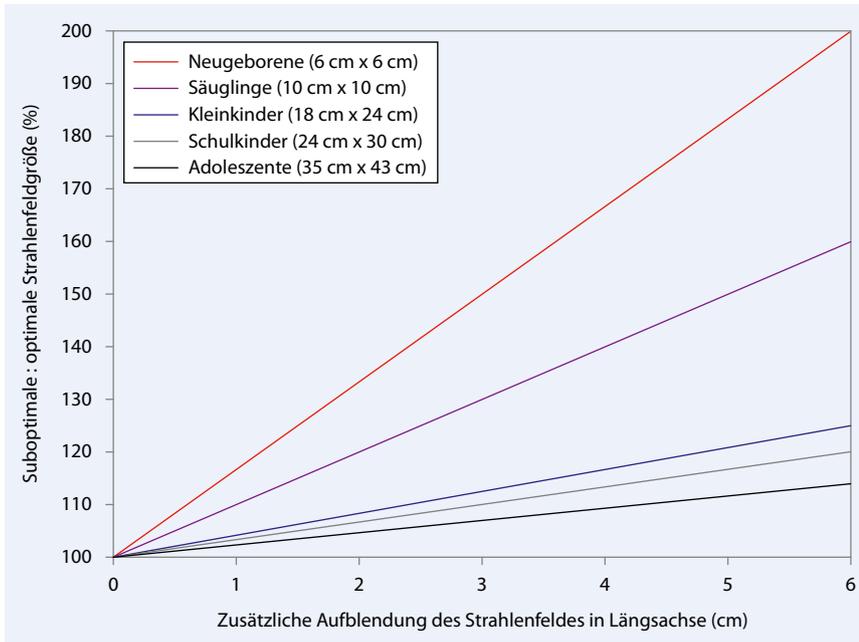


Abb. 7 ▲ Verhältnis zwischen suboptimaler Ist-Strahlenfeldgröße und optimaler Soll-Strahlenfeldgröße durch zusätzliche Aufblendung des Strahlenfeldes in der Körperlängsachse [26]

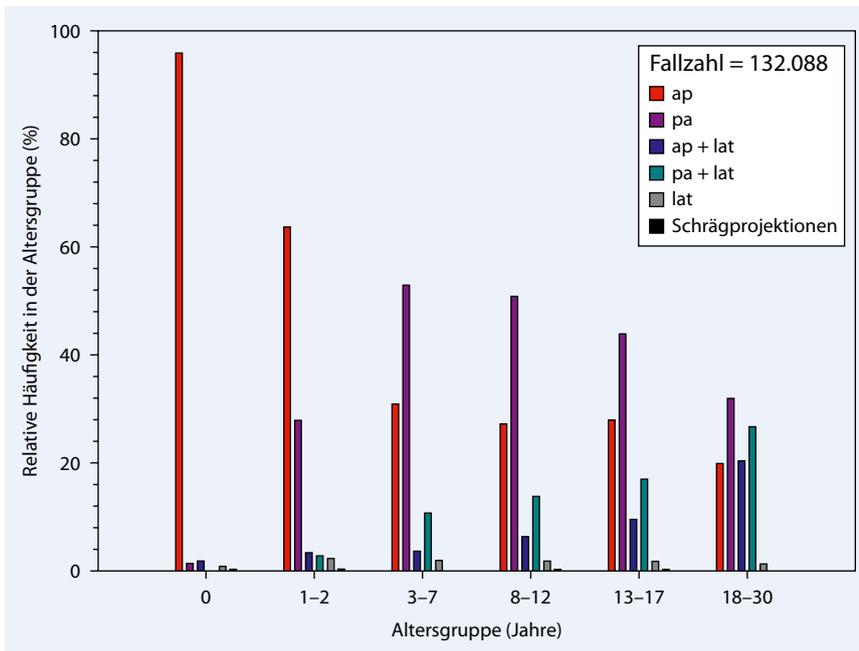


Abb. 8 ▲ Häufigkeitsverteilung der Strahlengänge bei konventionellen Thoraxaufnahmen im Dr. von Hauerschen Kinderspital im Zeitraum von 1976 bis 2012. Während bei Neugeborenen und Säuglingen die Überzahl der Untersuchungen in anteroposteriorem (ap) Strahlengang erfolgt, überwiegt bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen der posteroanteriore Strahlengang (pa). Die solitäre laterale (lat) Projektion findet nur selten Anwendung, da sie in der Regel von niedriger diagnostischer Wertigkeit ist

lenbündels am Ort der Messung ist; mit hin werden darin also der Dosisbedarf einer Röntgenuntersuchung und die Qualität der Strahlenfeldeinblendung subsumiert [23].

Patient, Strahlengang und Fokus-Haut-Abstand

In Analogie zur Erwachsenenradiologie werden pädiatrische Thoraxuntersuchungen mit Ausnahme ausgewählter In-

dikationen (wie z. B. Fremdkörperaspiration) in Inspirationsstellung durchgeführt. Dies setzt eine ab etwa dem 4. Lebensjahr zu erwartende Fähigkeit und Bereitschaft des Patienten zur Kooperation voraus. Allerdings müssen in der Kinder-radiologie selbst in suboptimaler Inspiration angefertigte Thoraxaufnahmen nicht zwangsläufig wiederholt werden, da sie etwa bei der Beurteilung der intrathorakalen Trachea und des Aortenbogens sowie von Air-trapping-Phänomenen in den Lungen noch diagnostische Wertigkeit besitzen.

Der Dosisbedarf einer Röntgenuntersuchung ist nicht allein von der notwendigen Bildempfängerdosis abhängig, sondern aufgrund des exponentiellen Schwächungsverhaltens von Photonenstrahlung auch wesentlich vom Durchstrahlungsdurchmesser der jeweiligen anatomischen Region und damit sowohl vom Lebensalter des Patienten als auch vom Strahlengang der Untersuchung (■ **Abb. 8**; [2]). So ist der Dosisbedarf einer seitlichen Thoraxaufnahme je nach Lebensalter bis zu 3-mal höher als im sagittalen Strahlengang [33]. Demgegenüber ist bei gegebenem Strahlengang der Einfluss des Lebensalters aufgrund der Besonderheiten des effektiven Schwächungsvermögens der Thoraxregion gering [16]. So ist bei optimaler Anpassung der Röntgenexpositionsparameter und der Feldgröße an die Anthropometrie des Patienten der Dosisbedarf einer Thoraxaufnahme im sagittalen Strahlengang bei Erwachsenen kaum doppelt so hoch als bei Neugeborenen. Der Dosisbedarf der Hartstrahltechnik beim Erwachsenen entspricht jenem der konventionellen Strahltechnik beim einjährigen Kind [33].

Bei gegebenem Dosisbedarf einer Röntgenuntersuchung wird die tatsächliche Strahlenexposition der Organe und Gewebe des Patienten wiederum vom Strahlengang sowie zusätzlich vom Fokus-Haut-Abstand determiniert. Bei freier Belichtung wie bei Thoraxaufnahmen mit fahrbaren Röntgeneräten bewirkt aufgrund des Abstandsquadratgesetzes eine geringfügige Verringerung des den Belichtungstabellen zugrundeliegenden Fokus-Haut-Abstands eine deutliche Erhöhung der Einfalldosis und damit der absorbierten Dosis, sofern das mAs-Pro-

Tab. 1 Nenndosisbedarf diverser Bilddetektorsysteme von 1970 bis 2005

Produktionsjahr	Film-Folien-System	Nenndosisbedarf (µGy)
1970	Rubinfolie	30
1980	Seltene-Erden-Folien	8
1990	Gadoliniumfolie	2
2005	Digitaler Flachbilddetektor	2

dukt nicht entsprechend angepasst wird. Die Gefahr einer relativen Überexposition des Neugeborenen hierdurch ist v. a. bei Inkubatoraufnahmen auf Neugeborenenintensivstationen besonders groß: Als Faustregel kann gelten, dass eine Verringerung des Fokus-Haut-Abstands um 1 bzw. 2% etc. bis 10% eine Erhöhung der Einfallsdosis um 2 bzw. 4% etc. bis 20% bewirkt. Weiterhin bestimmt der Strahlengang ganz wesentlich die relative Exposition der in unterschiedlichen Tiefenlagen unter der Hautoberfläche gelegenen Organe und Gewebe; so ist beim a.p.-Strahlengang die relative Strahlenexposition oberflächennaher Organe wie der Schilddrüse und der Mammæ deutlich höher als in p.a.-Strahlrichtung [34], welche bei Aufnahmen in aufrechter Position, wie sie ab etwa dem 2. Lebensjahr durchgeführt werden können, zu bevorzugen ist. Die Vermutung, auch die Strahlenexposition des roten Knochenmarks sei vom Strahlengang abhängig, konnte mithilfe der bisher verfügbaren Phantommodelle [35] weder bestätigt noch widerlegt werden [34].

Abschirmung des Patienten

Wie eine Berechnung der bei Thoraxübersichtsaufnahmen applizierten Gonadendosen zeigt [32], wird die Strahlenexposition der Ovarien bzw. der Hoden unter optimalen Strahlenfeldeinstellungen zu einem erheblichen bzw. überwiegenden Anteil durch Streustrahlung aus dem Thoraxraum determiniert. Deshalb scheint der Gebrauch von Gonadenabschirmungen, wie auch in den Leitlinien der Bundesärztekammer [5] empfohlen, zunächst redundant. Allerdings ist dieser Umstand messtechnisch noch nicht eindeutig gesichert. Zudem kann ein Gonadenschutz eine suboptimale Strahlenfeld-

einstellung durch den Untersucher möglicherweise kompensieren und nicht zuletzt aufgrund der subjektiven Risikowahrnehmung des Patienten und seiner Angehörigen angezeigt sein.

Streustrahlenraster

Der Einsatz von Streustrahlenrastern bewirkt nicht nur eine Absorption von Streustrahlung aus dem durchstrahlten Volumen und damit eine Verminderung des Bildrauschens, sondern führt durch Absorption von Nutzstrahlung auch zu einer Erhöhung des Dosisbedarfs. Da Streustrahlenraster ihre volle Wirksamkeit erst ab einem Durchstrahlungsdurchmesser von etwa 12–15 cm entfalten, wird ihr Einsatz bei Kindern bis zum 8. Lebensjahr nicht empfohlen [5]. Bei pädiatrischen Thoraxaufnahmen kann der Dosisbedarf hierdurch um bis zu einen Faktor 3 reduziert werden [28].

Bildempfängersystem

Naturgemäß sinkt der Dosisbedarf einer Röntgenuntersuchung mit zunehmender Empfindlichkeit des Bilddetektorsystems. Bis vor Einführung der digitalen Radiographie gegen Ende der 1980er Jahre hat die zunehmende Verfügbarkeit immer empfindlicherer Film-Folien-Kombinationen zu einer deutlichen Dosisreduktion geführt. Wie aus dem Nenndosisbedarf diverser Bildempfängersysteme abzuleiten ist (Tab. 1), war durch röntgentechnische Innovationen zwischen 1970 und 2005 zumindest theoretisch eine Senkung des Dosisbedarfs um einen Faktor 15 möglich. In der Kinderradiologie im Dr. von Haunerschen Kinderspital wurde in diesem Zeitraum bei konventionellen Thoraxuntersuchungen in der täglichen radiologischen Routine in Abhängigkeit vom Lebensalter des Patienten und vom Strahlengang der Untersuchung immerhin eine Reduktion des Dosisbedarfs auf etwa ein Sechstel erzielt [33].

Im Übrigen erfordert der zunehmende Einsatz digitaler Bildempfängersysteme zur Kontrolle der in der Kinderradiologie meist in freier Belichtung applizierten Bildempfängerdosis durch die medizinische Assistenz die Aufzeichnung und Auswertung von Dosisindikatoren [38].

Fazit für die Praxis

- Die europäischen Feldstudien bei pädiatrischen Patienten aller Altersklassen der 1990er Jahre haben gezeigt, dass bei Einhaltung der Kriterien für gute Aufnahmetechnik der Leitlinien der Europäischen Kommission bzw. der Bundesärztekammer die Referenzdosiswerte des Bundesamts für Strahlenschutz leicht eingehalten werden können, ohne dass es zu Einbußen der Bildqualität kommt (Abb. 3).
- Besonders wichtig bei der Anfertigung von Thoraxaufnahmen in der Kinderradiologie ist die möglichst exakte Einblendung, da der prozentuale Feldgrößenzuwachs auch bei geringer zusätzlicher Aufblendung beim Neugeborenen im Vergleich zu einem Jugendlichen um bis zu einen Faktor 10 höher ist.
- Die gedrunghenen Körperproportionen kleiner Patienten unter 5 Jahren bewirken eine höhere Organdosis benachbarter Organe bzw. Körperregionen, z. B. des Gesichtsschädels bzw. der Oberbauchorgane.
- Besonders hinzuweisen ist auf die Empfehlung der SSK-Orientierungshilfe, dass es keine Indikationen für die routinemäßige seitliche Thoraxaufnahme mehr gibt. Einzige Ausnahme macht hier die zystische Fibrose bei den jährlichen Routinekontrollen.
- Bei Thoraxaufnahmen auf der Intensivstation mit fahrbaren Röntengeräten können die Nichteinhaltung des Fokus-Haut-Abstands und die Nichtanpassung des mAs-Produkts zu einem Dosisanstieg führen, ohne dass wesentliche diagnostische Mehrinformationen erzielt werden.

Korrespondenzadresse



PD Dr. M.C. Seidenbusch
 Institut für Klinische Radiologie – Kinderradiologie,
 Dr. von Haunersches Kinderspital, Klinikum
 der Universität München
 Lindwurmstr. 4, 80337 München
 michael.seidenbusch@
 med.uni-muenchen.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. M.C. Seidenbusch und K. Schneider geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

1. Arroe M (1991) The risk of x-ray examinations of the lungs in neonates. *Acta Paediatrica Scand* 80:489–493
2. Bohmann I (1990) Ermittlung der Durchstrahlungsdurchmesser bei Säuglingen, Kindern und Jugendlichen zur Aufstellung von Belichtungswerten in der Röntgendiagnostik und Abschätzung der Organdosiswerte bei typischen Röntgenuntersuchungen. GSF-Bericht 16/90, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg
3. Boone JM (1988) The three parameter of equivalent spectra as an index of beam quality. *Med Phys* 15:304–310
4. Cook JV, Shah K, Pablot S et al (1998) Guidelines on best practice in the X ray imaging of children. St. George's Hospital & St. Helier Hospital, London
5. Bundesärztekammer (2007) Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik – Qualitätskriterien röntgendiagnostischer Untersuchungen
6. Bundesamt für Strahlenschutz (2010) Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenuntersuchungen
7. Deutsche Bundesregierung (2014) Unterrichtung durch die Bundesregierung. Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2012, Bundesrat-Drucksache 414/14
8. Europäischer Rat (1997) Richtlinie 97/43/Euratom des Rates vom 30. Juni 1997 über den Gesundheitsschutz von Personen gegen die Gefahren ionisierender Strahlung bei medizinischer Exposition
9. European Commission (1996) European guidelines on quality criteria for diagnostic radiographic images in paediatrics. EUR 16261, SBN 92-827-7843-6
10. Fendel H (1967) Radiation problems in Roentgen examinations of the chest. *Progr Pediatr Radiol* 1:18–32
11. Fendel H (1976) Die zehn Gebote des Strahlenschutzes bei der Röntgendiagnostik im Kindesalter. *Pädiat Prax* 17:339–346
12. Fendel H, Schneider K, Schöfer H et al (1985) Optimisation in paediatric radiology. Are there specific problems for quality assurance in paediatric radiology? In: Criteria and methods for quality assurance in medical x-ray diagnosis. *Brit J Radiol Suppl* 18:159–165
13. Griebel G (2001) Variation von Feldgröße und Dosis bei Röntgen-Thoraxaufnahmen beim 5-jährigen Kind – kritische Analyse einer Feldstudie in europäischen Kinderkliniken. Dissertation, Medizinische Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München
14. Gustaffson M, Mortenson W (1983) Radiation exposure and estimate of late effects of chest roentgen examinations in children. *Acta Radiol Diagn* 24:309–314
15. Hammer GP, Seidenbusch MC, Schneider K et al (2010) Inzidenz von Kinderkrebs nach Röntgendiagnostik im Patientenkollektiv der Jahre 1976–2003 einer Universitäts-Kinderklinik. *Fortschr Röntgenstr* 182:404–414
16. Hart D, Wall BF, Shrimpton PC et al (2000) Reference doses and patient size in paediatric radiology. ISBN 0-85951-448-X. National Radiological Protection Board NRPB-R318
17. Horwitz AE, Schweighofer-Berberich K, Schneider K et al (1993) Selected image quality parameters in a survey using a test phantom in radiological departments and offices in the Federal Republic of Germany. *Radiat Prot Dosim* 49:79–82
18. International Commission on Radiological Protection (1969) Protection against ionizing radiation from external sources. ICRP Report 15. Elsevier, Rotterdam
19. International Commission on Radiological Protection (1977) Recommendations of the International commission on Radiological Protection. ICRP Report 26. Elsevier, Rotterdam
20. Klinzmann M (2015) Qualitätsbeurteilung von Röntgen-Thoraxaufnahmen auf den pädiatrischen Intensivstationen in Abhängigkeit von den ausführenden Berufsgruppen. Inauguraldissertation, Fachbereich Medizin, Justus-Liebig-Universität Gießen
21. Moores BM, Regulla D (2011) A review of the scientific basis for radiation protection of the patient. *Radiat Prot Dosimetry* 147:22–29
22. Nathan DG, Oski FA (1981) Hematology of infancy and childhood, Bd I. Holt-Saunders, Philadelphia
23. Panzer W, Zankl M (1995) Beziehung zwischen Dosisflächenprodukt und Einfalldosis, Oberflächen-dosis, Organdosen, absorbiertes Energie (Integraldosis) und Effektivdosis. In: Löster W, Drexler G, Stieve FE (Hrsg) Die Messung des Dosisflächenproduktes in der diagnostischen Radiologie als Methode zur Ermittlung der Strahlenexposition. Hoffmann, Berlin, S 38–48
24. Regulla DF, Eder H (2005) Patient exposure in medical x-ray imaging in Europe. *Radiat Prot Dosimetry* 114:11–25
25. Schneider K (1995) Evolution of quality assurance in paediatric radiology. *Radiat Prot Dosimetry* 57:119–123
26. Schneider K (2005) Besonderheiten der Aufnahmetechnik und des Strahlenschutzes. In: Benz-Bohm G (Hrsg) *Kinderradiologie*, 2. Aufl. Thieme, Stuttgart, S 1–15
27. Schneider K, Fendel H, Bakowski C et al (1992) Results of a dosimetry study in the European Community on frequent x ray examinations in infants. *Radiat Prot Dosimetry* 43:31–36
28. Schneider K, Kohn MM, Ernst G (1998) The derivation of reference dose values to chest X-rays in paediatric radiography. *Radiat Prot Dosimetry* 80:199–202
29. Schöfer F (2008) Optimization of the relation between image quality and dose in pediatric projection radiography (Exemplified by the Examination of the Chest). Dissertation. Physik-Department, Technische Universität München
30. Schumacher R (1986) Untersuchungen zur Bildgüte und Dosisbelastung bei Thoraxaufnahmen im Kindesalter. *Klin Pädiat* 199:42–44
31. Seidenbusch MC (2006) Rekonstruktion von Organ- und Effektivdosen bei konventionellen Röntgenuntersuchungen am Dr. von Haunerschen Kinderspital der Universität München mit einer Berechnung neuer Konversionsfaktoren für die pädiatrische Radiologie. Dissertation. Medizinische Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München
32. Seidenbusch MC, Regulla D, Schneider K (2008) Zur Strahlenexposition von Kindern in der pädiatrischen Radiologie. Teil 3: Konversionsfaktoren zur Rekonstruktion von Organdosen bei Thoraxaufnahmen. *Fortschr Röntgenstr* 180:1061–1081
33. Seidenbusch MC, Schneider K (2008) Zur Strahlenexposition von Kindern in der pädiatrischen Radiologie Teil 4: Einfalldosen bei der Röntgenuntersuchung des Thorax. *Fortschr Röntgenstr* 180:1082–1103
34. Seidenbusch MC, Schneider K (2009) Zur Strahlenexposition von Kindern in der pädiatrischen Radiologie. Teil 5: Organdosen bei der Röntgenuntersuchung des Thorax. *Fortschr Röntgenstr* 181:454–471
35. Servomaa A, Tapiovaara M (1998) Organ dose calculation in medical X-ray examinations by the program PCXMC. *Radiat Prot Dosimetry* 80:213–219
36. Strahlenschutzkommission (2006) Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen – Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 51, Abschnitt M
37. Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlung (Röntgenverordnung – RöV)
38. Vano E, Ten JJ, Fernandez-Soto JM, Sanchez-Casaneva RM (2013) Experience with patient dosimetry and quality control online for diagnostic and interventional radiology using DICOM services. *AJR Am J Roentgenol* 200:783–790
39. Weigl A (1995) Untersuchung über Patientendosis und Bildqualität bei Röntgen-Thoraxaufnahmen im Säuglingsalter in Kliniken der neuen Bundesländer. Dissertation, Medizinische Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität München