

Oper Orthop Traumatol 2024 · 36:56–72
<https://doi.org/10.1007/s00064-023-00839-1>
Eingegangen: 6. Juni 2023
Überarbeitet: 25. Juli 2023
Angenommen: 14. August 2023
Online publiziert: 6. Februar 2024
© The Author(s) 2024

Wissenschaftliche Leitung
Klaus Dresing, Göttingen
Frank Unglaub, Bad Rappenau



CME

Zertifizierte Fortbildung

Bildgebung in der Kindertraumatologie/Kinderorthopädie

Theddy Slongo¹ · Enno Stranzinger²

¹ Kinderorthopädie / Kindertraumatologie, Medizinbereich Kinder und Jugendliche, Universitätsklinik für Kinderchirurgie, Bern, Schweiz

² Universitätsinstitut für Diagnostische, Interventionelle und Pädiatrische Radiologie (DIPR), Inselspital, Universitätsspital Bern, Bern, Schweiz

Zusammenfassung

Nach wie vor ist das konventionelle bzw. das digitale Röntgenbild die Grundlage der bildgebenden Diagnostik des Skelettsystems im Kindesalter. Es gilt als „Goldstandard“ in der Diagnostik, bei der Durchführung von Therapien sowie für Verlaufskontrollen. Ergänzend dazu sollen und können Verfahren wie Ultraschall, Computertomographie (CT), Magnetresonanztomographie (MRT), aber auch nuklearmedizinische Techniken eingesetzt werden. Es ist von Vorteil, dass in der Röntgendiagnostik von Kindern geschulte Radiologiefachpersonen eingesetzt werden. Im Falle von nicht spezifisch eingerichteten Kinderradiologien sollen zumindest die von Fachgesellschaften („as low as reasonable achievable“ [ALARA]) und Strahlenschutzkommissionen empfohlenen Richtlinien eingehalten werden. Es wird dargestellt, wie modernste Hilfsmittel wie Dosisüberwachungssysteme und Software-gesteuerte Bildbearbeitung und auch Nachbearbeitung sowie die verschiedenen Modalitäten optimal eingesetzt werden können, um mit möglichst geringem Aufwand und möglichst geringer Belastung für das Kind ein optimales Resultat, sprich Diagnostik, zu erreichen.

Schlüsselwörter

Kinderradiologie · Strahlenbelastung · Röntgenbild · Computertomographie · Magnetresonanztomographie

Online teilnehmen unter:
www.springermedizin.de/cme

Für diese Fortbildungseinheit werden 3 Punkte vergeben.

Kontakt

Springer Medizin Kundenservice
Tel. 0800 77 80 777
(kostenfrei in Deutschland)
E-Mail:
kundenservice@springermedizin.de

Informationen

Zur Teilnahme und Zertifizierung finden Sie im CME-Fragebogen am Ende des Beitrags.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Der vorliegende Beitrag wird in ähnlicher Version auch als Buchkapitel erscheinen: Slongo T, Stranzinger E (in Druck) Bildgebung und Klassifikation von Verletzungen im Kindes- und Jugendalter. In: Schmittenbecher PP, Sommerfeldt DW (Hrsg) Praxis der Kinder- und Jugendtraumatologie, 2. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg.

Lernziele

Nach Lektüre dieses Beitrags ...

- sind Sie in der Lage, die Vorteile der konventionellen Radiologie in der Akutsituation zu beschreiben,
- können Sie die Einstelltechnik bei Kindern richtig beurteilen,
- kennen Sie die bedeutendsten Indikationen der Sonographie,
- verstehen Sie die Vor- respektive Nachteile von Magnetresonanztomographie (MRT) und Computertomographie (CT),
- ist es Ihnen möglich, die Strahlenbelastung von Röntgenbildern richtig zu beurteilen,
- sind Ihnen die aktuellsten Strahlenschutzempfehlungen zum Gonadenschutz bekannt.

Einleitung

Das konventionelle bzw. digitale **Röntgenbild** des pädiatrischen Skelettsystems spielt nach wie vor die entscheidende Rolle für Diagnostik, Therapie und Verlaufskontrollen von Skeletttraumen und Folgen von orthopädischen Erkrankungen. Es ist die Grundlage der **bildgebenden Diagnostik**, die durch Verfahren wie Ultraschall, Computertomographie (CT), Magnetresonanztomographie (MRT) oder nuklearmedizinische Techniken ergänzt werden kann. Röntgenbilder sind weltweit gut verfügbar, können schnell durchgeführt werden und sind kosteneffizient.

Seit über 100 Jahren haben Röntgenbilder die Diagnostik und Therapie von skelettären Erkrankungen entscheidend geprägt und verbessert. Die Röntgentechnologie hat sich stetig weiterentwickelt, wobei die Bildqualität permanent verbessert werden konnte unter gleichzeitiger erheblicher Reduktion der **Strahlenbelastung**. Ausgebildete **Fachpersonen für Radiologie** (RFP), die im Umgang mit Kindern und Eltern geübt sind, erzielen eine gute Bildqualität bei geringstmöglicher Dosis, indem sie in der **Einstelltechnik** bei Kindern geschult sind und jeweils die individuellen Bedürfnisse des Kindes betreffend Lagerung und Einstellparameter berücksichtigen. **Fachärzte für Kinderradiologie** optimieren stetig zusammen mit den Applikationsspezialisten und Physikern die neuesten technischen Möglichkeiten der diagnostischen Infrastruktur. **Dosisüberwachungssysteme** unterstützen dabei die Optimierung und Einhaltung von Dosisreferenzwerten. Gut abgestimmte Abläufe zwischen der Abteilung für Bildgebung und kinderorthopädischer und/oder kinderchirurgischer Klinik ermöglichen eine qualitativ hochwertige, schnell verfügbare und gute bildgebende Diagnostik. Die **Bilddiagnostik** ist neben der Anamnese und der klinischen Untersuchung die wichtigste Information für eine korrekte Diagnose und erfolgreiche Therapie von Frakturen und Luxationen sowie orthopädischen Erkrankungen bei Kindern. Regelmäßige radiologische Bildbesprechungen oder Rapporte erlauben eine fachliche und technische Qualitätskontrolle, spielen eine Rolle in der Weiterbildung und sind für den Patienten von großem Nutzen. Der enge klinische Austausch ist nötig für die Ausbildung von Radiologen und Orthopäden und verbessert das gegenseitige Verständnis orthopädischer Erkrankungen bei Kindern.

Imaging in pediatric traumatology and orthopedics

Conventional or digital radiography is still the basis of imaging diagnostics of the skeletal system in pediatric patients. It is considered the gold standard for diagnosis, treatment selection, and follow-up. In addition, procedures such as ultrasound, computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), and also nuclear medicine techniques can and should be used. It is advantageous to use trained radiology technicians who are familiar with the handling of children in X-ray diagnostics. If there is no dedicated pediatric radiology department, it is recommended to follow the guidelines from radiology societies (as low as reasonably achievable [ALARA]) and radiation protection commissions. The present article describes how state-of-the-art tools such as dose monitoring systems and software-controlled image processing and also postprocessing can be used. The article provides information on how the various modalities can be optimally used in order to achieve the best result, i.e., diagnosis, with the least possible effort and burden for the child.

Keywords

Pediatric radiology · Radiation exposure · X-ray · Computed tomography · Magnetic resonance imaging

Röntgenbild

Der Vorteil des Röntgenbildes ist seine gute und rasche **Verfügbarkeit**, die geringe Strahlenbelastung (ein Röntgenbild der Extremitäten entspricht ca. 2–3 h natürliche Strahlenexposition), die schnelle Bildakquisition bei Kindern ohne Bewegungsartefakte und die hohe diagnostische Aussagekraft bei traumatischen Verletzungen und orthopädischen Erkrankungen. Vor allem bei Repositionen und Fixationen besticht das Röntgenbild oder Durchleuchtungsbild durch seine gute Reproduzierbarkeit und Verständlichkeit bei den meisten **Frakturen** (**Abb. 1**). Das Röntgenbild kann im Gegensatz zum Ultraschall bei Frakturen **berührungsfrei** und rasch durchgeführt werden. Zudem ist das Röntgen in einem 24-h-Klinikbetrieb wirtschaftlicher und schneller verfügbar im Vergleich zum Ultraschall, der zumeist von erfahrenen Ärzten durchgeführt werden muss.

Das Röntgenbild ist ein **Summationsbild**, wobei alle Strukturen zwischen Röntgenröhre und Detektor auf einer Ebene summiert und dargestellt werden. Zur genauen Beurteilbarkeit werden daher 2 Ebenen eines Gelenks oder einer Extremität dargestellt. Dabei können manche Frakturen bei Kindern trotz Darstellung in 2 Ebenen maskiert werden. Bei Kindern mit Trampolin-, Torwart-, Stress- bzw. Toddler-Frakturen sowie bei Kindsmisshandlung können manche „okkulte“ Frakturen erst im Verlauf von 7 bis 10 Tagen anhand der Kallusbildung oder Sklerose erkennbar werden.

Bei Kindern können **indirekte Frakturzeichen** wie das Fat-Pad-Zeichen im Ellbogengelenk, das Pronator-Quadratus-Zeichen des distalen Radius oder Weichteilödeme auf eine Fraktur hinweisen. Kenntnis der normalen Tibia-Tiltwinkel, der Rogers-Hilfslinie, der Kleins-Linie oder des Radius-Wachstumsfugen-Winkels können Hinweise für Frakturen, Epiphysiolysen, Stress- oder Überlastungsfrakturen geben (**Abb. 2; [1]**).



Abb. 1 ▲ 5-jähriges Mädchen mit einer supracondylären Humerusfraktur. Die korrekte Einstelltechnik in a.-p.- und Seitenprojektion ermöglicht eine gute Einsehbarkeit in das Ellenbogengelenk und somit eine einfachere Beurteilung der Fraktur und Stellung des Ellenbogengelenks. Man erkennt den Weichteilkontrast mit Ödem des ulnaren Ellenbogengelenks sowie die knöchernen Strukturen und das dorsale Fat-Pad-Zeichen. Das Dosisflächenprodukt ist mit 0,41 cGy \cdot cm 2 in a.-p.- und Seitenprojektion sehr niedrig. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Einstelltechnik

Die **korrekte Lagerung** ist bei Kleinkindern eine besondere Herausforderung, daher sind die Instruktion der Eltern und des Kindes über eine korrekte Einstelltechnik, aber auch die Patientenvorbereitung und Fixation wichtig. Überlagerungen auf der zu untersuchenden Region durch den nicht mehr empfohlenen Gonadenschutz, Fixationsmaterialien, Haarspangen etc. sind auf dem Röntgenbild zu vermeiden. Sie können zu falschen Beurteilungen und/oder unnötigen Wiederholungen von Röntgenaufnahmen führen. Bei der Positionierung von Gelenken ist v. a. bei Kindern darauf zu achten, dass keine schrägen Aufnahmen gemacht werden, sondern streng 90° zueinanderstehende a.-p.- und seitliche Aufnahmen (**Abb. 3**). Leider werden schlecht positionierte Aufnahmen nur zu oft mit dem Vermerk „erschwerte Aufnahmebedingungen“ versehen und als solche akzeptiert. Es ist evident, dass das Kind Schmerzen/Angst hat und somit wenig kooperativ ist. Um dennoch ein optimales Bild zur Diagnosestellung bei nicht optimaler Einstelltechnik zu erhalten, ist es sinnvoll, dass der behandelnde Arzt sich mit der verantwortlichen Radiologiefachperson (RFP) abspricht, wie die Schmerzen minimiert werden können, z. B. durch Kippen der Röntgenröhre.

Bei Kleinkindern unter 6 Jahren, die die Lokalisation einer diaphysären Verletzung nicht sicher angeben können, ist darauf zu achten, dass die **angrenzenden Gelenke** vollständig miterfasst werden. Somit können Rotationsfehlstellungen z. B. der Tibia oder Luxationen des Radius besser beurteilt werden. Eine ungenügende Darstellung des Ellenbogengelenks kann bei verpassten Radiusluxationen und Monteggia-Frakturen zu erheblichen Spätfolgen führen (**Abb. 4**).



Abb. 2 ▲ Das seitliche Röntgenbild des Unterschenkels zeigt eine „Trampolinfraktur“ bei einem 2-jährigen Kind. Der Tiltwinkel der Tibia ist physiologischerweise nach dorsal geneigt. Ein nach ventral abfallender Tibia-Tiltwinkel gilt als indirektes Frakturzeichen (+4,7°) (a), zusammen mit der Eindellung der Notch der Tuberositas tibiae spricht der positive Tibia-Tilt für eine Trampolinfraktur. Im Verlauf wird erst eine Sklerose (b) der Metaphyse sichtbar, und die Abschlusskontrolle nach 1 Jahr zeigt wieder einen normalen negativen dorsalen Tibia-Tiltwinkel von -4,8° (c). (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Im Kompendium der Röntgeneinstelltechnik und Röntgenanatomie von H.P. Nowak und anderen Standardwerken der Einstelltechnik werden die genauen Einstellungen und die **Qualitätskriterien** eines guten Röntgenbildes bei Kindern beschrieben [2]. Dabei wird einerseits die Lagerung der Extremitäten beschrieben, die Einstellung des Zentralstrahls sowie Kriterien für die gute Aufnahme werden definiert. Häufige Fehler sind die fehlende Einsehbarkeit in die Gelenke im Seitenbild (z. B. Ellenbogen) und die ungenügende Symmetrie der Kondylen im a.-p.-Bild (Knie, Ellenbogen). Es sei hier auf die Möglichkeit hingewiesen, dass man auch die Röntgenröhre schwenken kann, wenn das Kind eine korrekte Lagerung wegen Schmerzen oder Fehlstellung nicht einnehmen kann. Bei solchen „Varianten“ der Einstelltechnik ist es von Vorteil, wenn der behandelnde Kinderorthopäde unterstützend beraten kann.

Bei den Röntgengeräten ist zudem auf eine **optimierte Kollimation** (Einblendung) zu achten, auf **altersadaptierte Einstellparameter** (**Tab. 2 und 3**) und eine für Kinder angepasste Nachbearbeitung (Postprocessing).

Beim **Postprocessing** bei digitalen Röntgenanlagen gilt es zu beachten, dass die Einstellungen bei Kindern optimiert werden, um Aufhärtungen z. B. des Gesichtsschädels zu minimieren, um z. B. den Dens axis beurteilen zu können (**Abb. 5**) bzw. die Weichteile bei Gelenken gut einsehen zu können (**Abb. 1**). Dies ist hilfreich zur Darstellung von Gelenkergüssen oder Weichteilödemen.



Abb. 3 ▲ a–d verdeutlichen, was unter einer korrekt positionierten und nicht korrekt positionierten Aufnahme zu verstehen ist. Beide Male wurde eine Ellenbogenaufnahme a.-p. und seitlich verordnet. Bei den Aufnahmen a und b handelt es sich lediglich um eine undefinierte Schrägaufnahme in beiden Ebenen, während in den Aufnahmen c und d absolut korrekte a.-p.- und seitliche Aufnahmen zu sehen sind. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)



Abb. 4 ◀ a, b Röntgen des Vorderarms in 2 Ebenen mit mangelhafter Einstelltechnik. Es wurde nicht der ganze Vorderarm inklusive der Gelenke initial abgebildet und dadurch eine Luxation des Radiuskopfes verpasst (a), erst in der Verlaufskontrolle nach geheimer Ulnafraktur fällt auf, dass der Radius in ventraler Luxationsstellung verblieben ist (b). (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Im Weiteren lässt das Postprocessing auch Hardware-Artefakte respektive Überlagerungen, wie wir sie besonders bei Verwendung von externen Fixateuren sehen, so verändern, dass wir das Wesentliche, nämlich den Knochen oder die Knochenheilung korrekt beurteilen können. Dies ist in **Abb. 6** dargestellt.

Sonographie

Die Sonographie von Frakturen und Gelenkpathologien („point-of-care ultrasound“ [POCUS]) hat in vielen pädiatrischen und chirurgischen Praxen und Notfallstationen Einzug gehalten und mag bei unkomplizierten Verletzungen oder zum Ausschluss von Frakturen genügen. Der Ultraschall ist zusätzlich zum Röntgenbild hilfreich zur Bestätigung von Gelenkgüssen, knorpeligen, ligamentären oder muskulären Verletzungen. Die Ultraschallgeräte werden immer günstiger, kleiner und portabler, sodass sich ein **Bedside-Einsatz** anbietet. Dennoch bleibt der Ultraschall **untersucher-**

abhängig und bedarf guter anatomischer Kenntnisse des muskuloskeletalen Systems bei wachsenden pädiatrischen Knochen und deren zahlreichen Varianten (**Abb. 7**). Einen Vorteil der Sonographie stellt die Möglichkeit der **dynamischen Untersuchung** dar. Diese ermöglicht, z. B. Sehnenrupturen, Muskelaktivitäten und Gelenkbewegungen darzustellen. Zusätzlich kann der Ultraschall die Durchblutung von Weichteilprozessen oder vaskulären Fehlbildungen im Doppler darstellen, die Steifigkeiten von Geweben mit der Elastographie bestimmen und mit i.v.-Kontrastmittelgabe die Dynamik von vaskularisierten Läsionen beschreiben.

Der Ultraschall hat sich für **Vorsorgeuntersuchungen** bei Kindern mit Risikofaktoren, insbesondere bei Verdacht auf Hüftdysplasie, bewährt. Der Ultraschall vermag auch zur Beurteilung von Erb-Lähmungen die Stellung des Humeruskopfes beschreiben und kann für Patella- und Trochleadysplasien im Neugeborenenalter verwendet werden. Bei Neugeborenen mit Tortikollis kann der Ultraschall einfach eine Fibromatosis colli darstellen. Auch Seg-

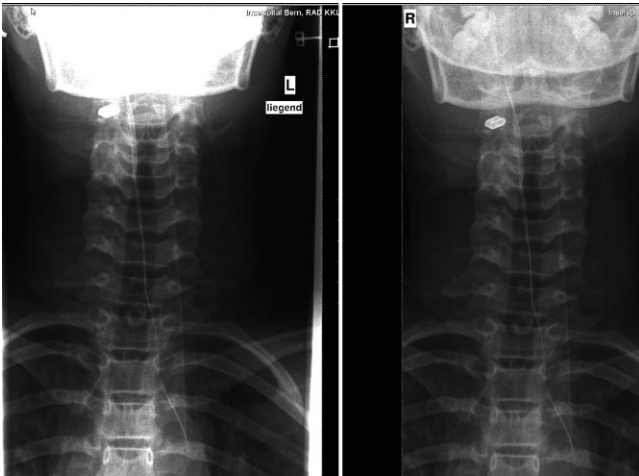


Abb. 5 ▲ Röntgenbild der Halswirbelsäule (HWS) vor und nach dem Post-processing. Die Aufhängungsartefakte des Unterkiefers lassen eine Beurteilung des Dens nicht zu. Nach dem Post-processing und besserer Fensterung ist der Dens gut beurteilbar. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

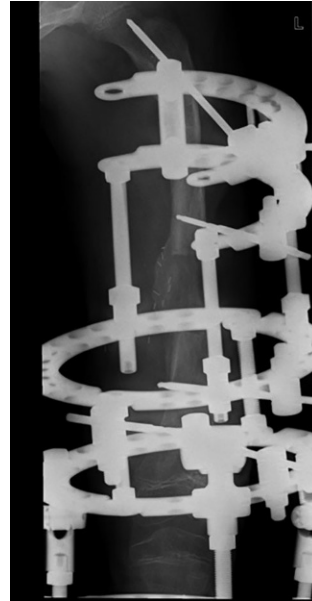


Abb. 6 ◀ 6-jähriges Mädchen nach Replantation des linken Beines und Verlängerung. Trotz des vielen Metalls konnte dank Postprocessing der Knochen in guter und beurteilbarer Weise dargestellt werden. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

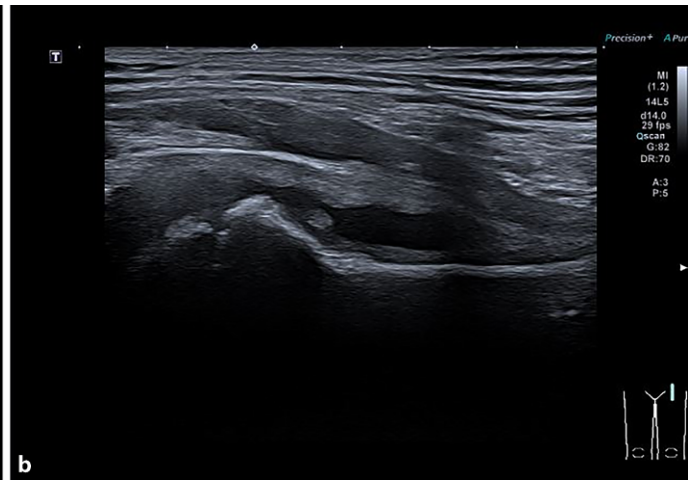


Abb. 7 ▲ 6-jähriger Knabe mit Hinken des linken Beines seit 2 Wochen. **a** Die Beckenübersichtsaufnahme zeigt eine normale Femurepiphyse ohne Anzeichen einer avaskulären Nekrose, Epiphysiolyse oder Fraktur. **b** Der ergänzende Ultraschall stellt den echoarmen Gelenkerguss des linken Hüftgelenkes dar. Zusammen mit den klinischen Angaben ist der Befund vereinbar mit einer transienten Synovitis. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

mentationsstörungen z. B. im Rahmen der Abklärung eines „tethered cord“ sind im fetalen Ultraschall oder Neugeborenenalter gut erkennbar.

Der Ultraschall hat Vorteile bei Kleinkindern mit noch knorpeliger Anlage der Epiphysen [3]. In vielen Fällen ergänzt der Ultraschall das Röntgenbild und kann in geübten Händen zu einer höheren diagnostischen Sicherheit führen.

Computertomographie

Die Computertomographie (CT) spielt bei **komplexen Frakturen** eine wichtige Rolle zur Operationsplanung und ermöglicht eine 3-dimensionale Volumen-Rendering-Darstellung sowie eine tomographische Rekonstruktion in allen Ebenen (**Abb. 8**). Die CT wird auch zunehmend zur Darstellung von Frakturen der Hand- und

Fußwurzelknochen als auch des Gesichtsschädels eingesetzt und hat tomographische Röntgenaufnahmen oder Spezialaufnahmen (z. B. Skaphoid-Quartett) weitestgehend abgelöst. Dabei gibt es kleine **Extremitäten-CT-Scanner**, die auch stehende Aufnahmen des oberen Sprunggelenkes (OSG) erlauben und nur eine begrenzte respektive limitierte Exposition der Extremitäten verursachen.

In der CT können zudem mit **Kontrastmittelgabe** angiographische Gefäßrekonstruktionen dargestellt werden. Moderne Dual-Energy- und Photon-Counting-CT ermöglichen spezifische **Gewebecharakterisierungen** wie Gichtdarstellungen, virtuelle Nativsequenzen, aber auch Knochenödemdarstellungen. Die **Strahlenbelastung** in der CT hat mit den aktuellen CT-Generationen durch Einsatz von iterativen Rekonstruktionsmöglichkeiten, automatischer Dosismodulation, modernen Detektoren, Filtern und neuer-



Abb. 8 ◀ Unterschenkel eines Adoleszenten links in 2 Ebenen. **a** Im Röntgenbild ist die Epiphysenfraktur der distalen Tibia weitestgehend maskiert und nicht sicher zu beurteilen. **b** Die Computertomographie vermag die Salter-Harris-IV-Fraktur durch die Epiphyse, Wachstumsfuge und durch das kleine metaphysäre Fragment in koronaren und sagittalen Rekonstruktionen sicher darzustellen. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

dings Photon-Counting-Detektoren signifikant abgenommen bei besserer Bildqualität.

Die **CT-Bilddateninformationen** des Knochens sind gut geeignet zur Segmentierung und Nachbearbeitung und können für 3-D-Drucke verwendet werden („standard triangulation language file“ [stl]). Dies kann eine Operationsplanung, eine Operationssimulation durch Schablonen, eine augmentierte Realität durch Bildfusionen oder eine Behandlung mit individualisierten Prothesen ermöglichen (**Abb. 9**). Zur genauen automatischen Segmentierung ist jedoch für **3-D-Drucke** häufig eine höhere Dosis zur Bildakquisition nötig als für rein diagnostische, pädiatrische CT-Untersuchungen des Skelettsystems. Das heißt, die höhere Strahlenbelastung muss mit einem therapeutischen Mehrwert für den Patienten einhergehen, der durch den 3-D-Druck erzielt wird. Eine CT-Untersuchung mit Anforderung für einen 3-D-Druck ohne diagnostischen oder therapeutischen Nutzen ist zu vermeiden. MR(Magnetresonanz)-Daten mit dem höheren Weichteilkontrast sind schwieriger nutzbar für 3-D-Drucke des Skelettsystems und bedürfen meist einer sehr zeitintensiven, manuellen Segmentierung.

Magnetresonanztomographie

Die Stärken der Magnetresonanztomographie (MRT) sind der **hervorragende Weichteilkontrast** (Knorpel, Menisken, Labren, Bänder und Sehnen) und die gute Beurteilbarkeit des Knochenmarks bei Kindern (z.B. Leukämie, Infarkte, Tumoren, Entzündungen) (**Abb. 10**). Fragestellungen zur Vaskularisation des Knochens z. B. bei Epiphysiolysen des Hüftkopfes oder Skaphoidfrakturen können mit der **Kontrastmittel-unterstützten MRT** beantwortet werden. Time-to-peak-Kurven bei Knochentumoren erlauben zusammen mit diffusionsgewichteten Sequenzen eine genauere Differenzierung von Tumoren. Moderne Knorpelsequenzen ermöglichen eine 3-dimensionale morphologische und biochemische Analyse des Gelenkknorpels.

In der akuten Phase eines Skeletttraumas hingegen hat die MRT häufig keine klinischen Konsequenzen, da das akute Knochen- und Weichteilödem das wahre Ausmaß der Verletzung überschätzt. Zudem brauchen Kleinkinder unter 6 Jahren häufig eine Sedation für die Untersuchung. Neuere KI(**künstliche Intelligenz**)-gestützte Bildrekonstruktionstechnologie erlaubt einen MR-Scan des Kniegelenkes in 2 min und kann künftig die Untersuchungszeiten verkürzen und die Notwendigkeit von Sedationen bei Kindern deutlich vermindern.

Ganzkörper-MRTs haben in der Kinderradiologie manche szintigraphische Methode abgelöst wie z. B. bei der Suche nach Histiozytosenläsionen, Darstellung von Lymphomen, Metastasen, entzündlichen multifokalen Läsionen (chronisch rekurrende multifokale Osteomyelitis [CRMO]), rheumatischen Erkrankungen. Sie können zur Suche von Skelettverletzungen bei Kindesmisshandlung ergänzend hilfreich sein.

In der MRT können **beliebige Ebenen** geplant werden, so sind auch radiäre Schichten durch Schenkelhals und Hüftkopf möglich (**Abb. 11**), wobei Fragen nach Impingement und Offset des Schenkelhalses beantwortet werden können. Nur bei sehr dünnen MR-Sequenzen sind analog zur CT auch Rekonstruktionen möglich. Eine Limitation bleibt die Bildgebung des Skeletts bei metallischen Implantaten, die in der Regel erhebliche **Artefakte** verursachen. Hier können sog. **Wrap-Sequenzen** zur Reduzierung solcher Metallartefakte benutzt werden.

Knochenszintigraphie

Eine Knochenszintigraphie ist ein nuklearmedizinischer Test, der mithilfe von **radioaktiv markierten Tracern** verschiedene Arten von Knochenerkrankungen diagnostiziert. Der Tracer wird von Knochenzellen und Geweben, die sich schnell umbauen, stärker absorbiert. So kann ein Knochen-Scan dazu dienen, die Ursache für Skelettschmerzen, eine Knocheninfektion, einen Tumor, Me-

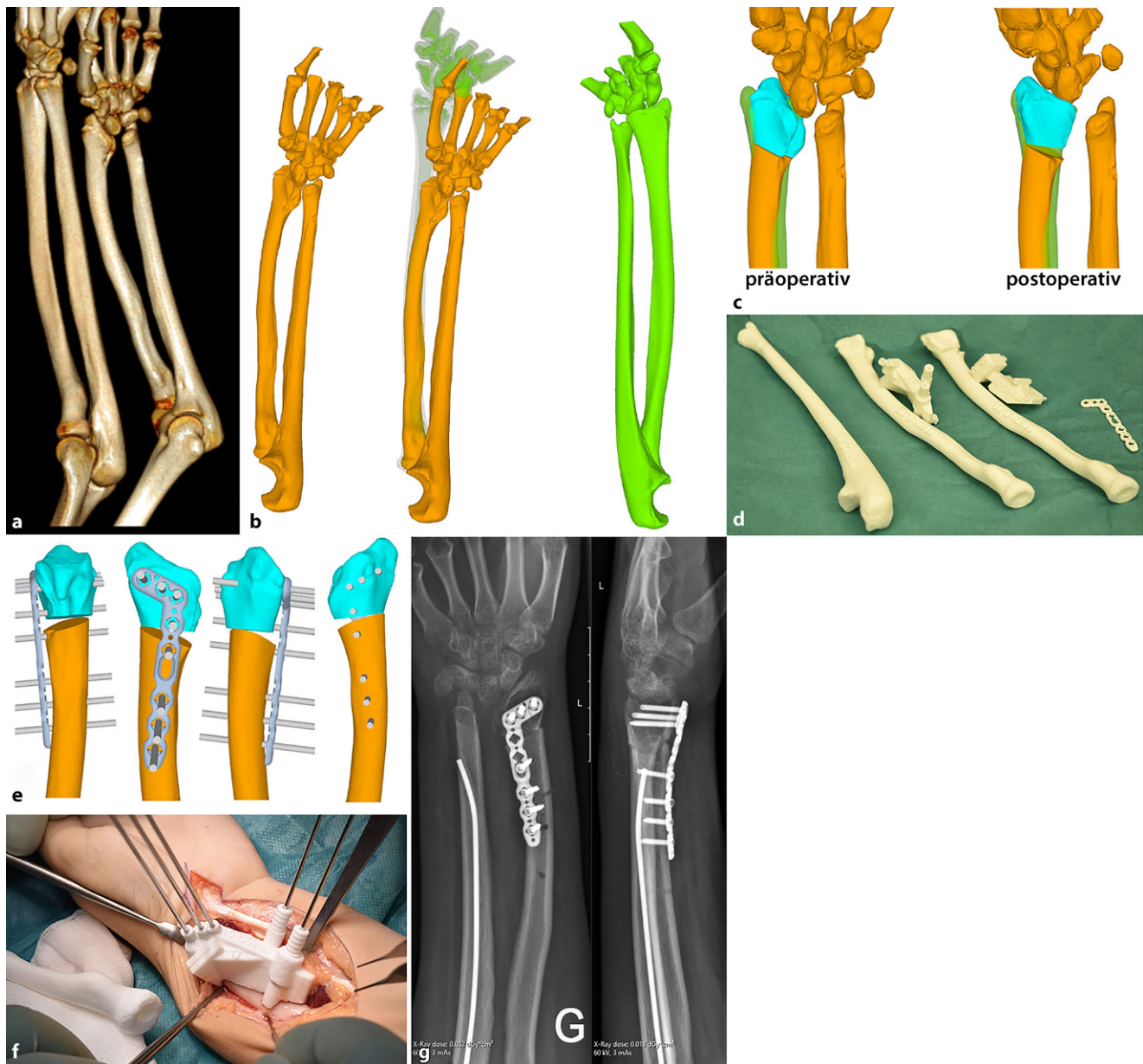


Abb. 9 ▲ **a, b** Beispiel einer Umsetzung von CT(Computertomographie)-Bildern und 3-D-Rekonstruktionen durch Implementierung der DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)-Daten in ein entsprechendes 3-D-Computer-basiertes Planungsprogramm. (Planung in Zusammenarbeit mit der orthopädischen Uni Klinik Balgrist, Zürich). **a** 3-D-Rekonstruktion einer Unterarmfehlbildung im Sinne einer Madelung-Deformität und Verkürzung, zur Planung sind immer die Referenzbilder der nichtbetroffenen Seite notwendig. **b** Darstellung der DICOM-Daten-Rekonstruktion mit der Planungssoftware; in der Mitte sehen wir die übereinander gelegten Bilder. **c** Darstellung der präoperativen und postoperativen Situation des distalen Radius, wobei die Osteotomiehöhe wie auch Osteotomieorientierung errechnet werden. **d** Entsprechend den Daten und Berechnungen werden 3-D-Modelle angefertigt sowie gemäß Planung erstellte Schnitt- und Verschraubungsschablonen inklusive der am optimalsten passenden Platte. **e** Simulierte Korrektur inklusive Vorschlag der Plattenlage. **f** Intraoperative Darstellung nach Präparation des distalen Radius und Anlage der Osteotomieschablone/Block. **g** Postoperatives Röntgenbild, das genau der Planungsvorlage entspricht. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

tastasen oder eine Knochenverletzung zu finden, die auf einem normalen Röntgenbild nicht zu erkennen ist.

Positronenemissionstomographie

Bei der Positronenemissionstomographie (PET) werden kleine Mengen radioaktiver Materialien, sog. Radiotracer oder Radiopharmaka, eine spezielle Kamera und ein Computer verwendet, um Organ-

und Gewebefunktionen zu beurteilen. Durch die Identifizierung von Veränderungen auf zellulärer Ebene kann die PET den frühen Beginn einer Krankheit erkennen. Dabei wird in der Regel ein **radioaktiv markiertes Glukoseanalogon** (FDG[F-18-Fluorodesoxyglukose]-PET) verwendet und ist zum Staging verschiedener Tumoren geeignet. Die **PET-CT** ordnet die pathologischen Stoffwechselveränderungen anatomischen Strukturen in der CT zu.



Abb. 10 ▲ Kleinkind mit Beinschmerzen. Vergleich Röntgen der distalen Tibia und Magnetresonanztomographie (MRT) (koronare TIRM [„turbo inversion recovery magnitude“]). **a** Das Röntgenbild zeigt weder Osteolysen noch eine Periostreaktion. **b** Die MRT vom gleichen Tag zeigt jedoch schon deutliche T2-hyperintense Läsionen der Diaphyse und Metaphyse sowie Periostreaktionen, vereinbar mit einer Osteomyelitis. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Strahlenschutz

Kinder unterscheiden sich von erwachsenen Patienten durch ihre geringe Größe und ihre erhöhte Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung. Zudem haben Kinder eine längere Lebenserwartung als Erwachsene und können einen theoretischen **Strahlenschaden** erleben. Daher haben Kinder ein besonderes auf Anrecht eine individuelle Anpassung der physikalischen Parameter (kV [Kilovolt], mAs [Milliamperesekunde], Filter) der Röntgenanlage bei sehr variierenden Gewichtgruppen, um das pädiatrische Skelettsystem mit einer optimalen Bildqualität bei gleichzeitig tiefstmöglicher Strahlenbelastung darzustellen. Dabei sind die Grundlagen des Strahlenschutzes, wie sie bei der CT häufig erwähnt werden, auch bei allen anderen Röntgenuntersuchungen, Durchleuchtungsuntersuchungen und intraoperativen Bildverstärkeranlagen anzuwenden (**Tab. 1**).

Der beste Strahlenschutz besteht darin, die Indikation und die Notwendigkeit einer Röntgenuntersuchung streng zu prüfen und auch Alternativen in Erwägung zu ziehen, die mit gleicher diagnostischer Sicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit die Fragestellung beantworten können. Jede Röntgenuntersuchung soll eine klinische Konsequenz nach sich ziehen, eine Effektivität nachweisen, die einen Nutzen für den Patienten bedeutet und die Strahlenbelastung rechtfertigt. Zu vermeiden sind Vergleichsaufnahmen der Gegenseite (**Abb. 12**) oder zu frühe oder zu

engmaschige oder sogar unnötige Verlaufskontrollen bei stabilen Frakturen oder sehr engmaschige Skolioseverlaufskontrollen [4].

Bei der Durchführung der Untersuchung müssen die **Qualitätsrichtlinien** bei Kindern gemäß nationaler oder internationaler Richtlinien, aktueller Referenzwerten und Verordnungen eingehalten werden.

Es besteht weiterhin eine sehr heterogene Infrastruktur der Röntengeräte im Gesundheitswesen weltweit von Film-Folien-Systemen über konventionelle Röntgensysteme bis zu modernen digitalen Röntgenanlagen. Computer Radiographie(CR)-Anlagen ermöglichen eine bis zu 50 % niedrigere Dosis im Vergleich zu Film-Folien-Systemen, die kaum mehr in Betrieb sind. Die modernen **digitalen Röntgenanlagen** mit Flat-Panel-Detektoren erreichen im Vergleich zu Computer Radiographie-Anlagen (CR-Anlagen) nochmals eine bis zu 50 % niedrigere Dosis und erlauben ein besseres Postprocessing. Entscheidend in der pädiatrischen Radiologie ist die Verwendung eines **Kupferfilters** und **Aluminiumfilters** zur Dosisreduktion [5]. Zudem wird empfohlen, Voreinstellungen auf den Geräten zu hinterlegen, die nach Gewichtsklassen oder Altersgruppen festgelegt werden können (**Tab. 2** und **3**). Eine **individualisierte Einstellung** der kV- und mAs-Parameter gemäß Gewicht und Größe kann die Dosis entscheidend reduzieren.

Für nicht unmittelbar beteiligte Personen im Operationsaal oder Röntgenraum gilt: Es sollen sich nur die Personen im Raum aufhalten, die für die Operation oder Untersuchung nötig sind, es soll das **Abstands-Quadrat-Gesetz** eingehalten werden (möglichst weite Entfernung zur BV[Bildverstärker]-Anlage), und es können Bleischürzen und Trennwände eingesetzt werden, um die Dosis für den Untersucher zu minimieren. Die Größe des Durchleuchtungsfeldes soll auf die zu interessierende Region eingeblendet werden. Helfende Hände zur Lagerung sollen möglichst nicht im Bild aufgenommen werden.

Die neuesten Richtlinien zum Strahlenschutz empfehlen, **keinen Gonadenschutz** mehr bei Kindern bei Abdomen- oder Beckenröntgenbildern zu verwenden. Die durch den Gonadenschutz verursachte **Streustrahlung** bewirkt eine höhere Strahlenbelas-

Tab. 1 Strahlenschutz in der pädiatrischen Orthopädie. (Adaptiert aus <http://rpop.iaea.org>)

1. Indikation prüfen
2. Keine unnötigen Wiederholungen oder Vergleichsbilder der Gegenseite
3. Enges Einblenden auf die zu untersuchende Region; die Blenden müssen auf dem Bild sichtbar sein
4. Prüfe Alternativen wie Ultraschall (US) oder Magnetresonanztomographie (MRT)
5. Mögliche Schwangerschaften ausschließen
6. Es muss nicht das perfekte Röntgenbild mit höchster Dosis sein, sondern ein diagnostisches Bild
7. Nutze patientenadaptierte Parameter (kV, mAs) und entsprechende Filter (Cu, Al)
8. Zentrierte das Gelenk in der Mitte des Bildes
9. Dokumentiere die Röntgendosis im Bericht bei Durchleuchtungen und Röntgenuntersuchungen der Wirbelsäule und vergleiche sie regelmäßig mit Referenzwerten (s. Tab. 2)

kV Kilovolt, mAs Milliamperesekunde, Cu Kupfer, Al Aluminium

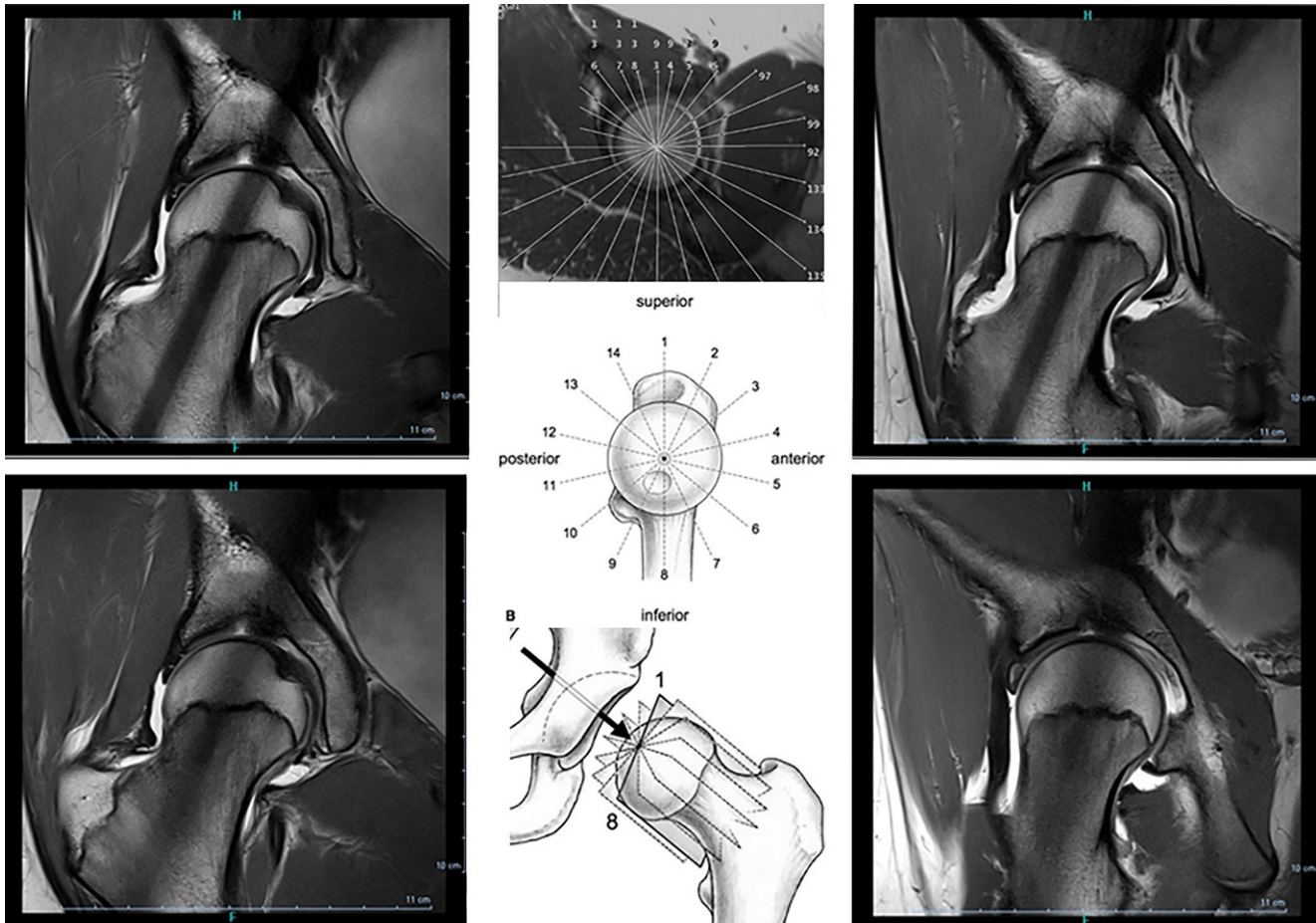


Abb. 11 ▲ Schematische und reelle Darstellung von radiären Schnitten durch die Achse des Schenkelhalses. Die Sequenzen gehen von 1 bis 14 im Uhrzeigersinn. Der Betrachter schaut sich das Ganze also aus dem Rotationszentrum heraus an. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

tung für strahlenempfindliche Gewebe wie Magen und Darm. Die Ovarien bei Mädchen werden wegen der variablen anatomischen Lage häufig nicht geschützt oder abgedeckt. Zudem verdeckt der Gonadenschutz manchmal wesentliche Pathologien, Frakturen oder Entzündungen des Beckenringes und des Sakrums [6, 7]. Zudem wird der Wichtungsfaktor für Gonaden nicht mehr so hoch eingestuft wie früher, sodass die neuesten europäischen und amerikanischen Empfehlungen auf einen Gonadenschutz bei Kindern gänzlich verzichten.

Einstellparameter

Eine ausgebildete Fachperson für Radiologie, die im Umgang mit Kindern und Eltern geübt ist, kann durch die richtige Einstelltechnik, das korrekte Einblenden auf die zu untersuchende Extremität und die Verwendung der alters- und gewichtsadaptierten Scanparameter deutlich zum Strahlenschutz und gleichzeitig zu einer besseren Bildqualität beitragen. Ein optimal durchgeführtes Röntgenbild in 2 Ebenen erhöht die diagnostische Aussagekraft und vereinfacht die Interpretation bei gleichzeitig besserer Bildqualität (Abb. 13).

Obwohl ein deterministischer Strahlenschaden durch eine einmalige Röntgenuntersuchung unwahrscheinlich ist, so kann durch häufige Verlaufskontrollen wie bei Skolioseröntgenuntersuchungen eine **stochastische Strahlenwirkung** möglich sein. Die Strahlenbelastung sollte daher für jede Röntgenuntersuchung so niedrig wie möglich gehalten werden. Viele Hersteller machen sich dieses Strahlenrisiko v. a. bei Kindern zunutze, z. B. bei **Low-dose-Ganzkörper-scannern**. Die Strahlenbelastung dieser Geräte bei kleineren Kindern kann im Vergleich zu einem korrekt angefertigten Röntgenbild mit angepassten pädiatrischen Parametern dennoch höher liegen (Abb. 14). Somit kann das konventionelle digitale Röntgenbild weiterhin die Modalität mit der geringstmöglichen Dosis sein, wenn es für Kinder optimiert ist.

In den letzten Jahrzehnten haben viele technische Innovationen der Röntgen-, Durchleuchtungs- und CT-Geräte zu einer erheblichen Strahlenreduktion im gesamten Bereich der Kinderradiologie geführt. Zudem konnte dank des Ultraschalls und der MRT das Strahlenrisiko bei Kindern so weit reduziert werden, dass kein Schaden durch die Bildgebung für den Patienten zu erwarten ist. Ein **Dosisüberwachungssystem** ist empfehlenswert, um die Röntgendosis von verschiedenen Gewichts- oder Altersgruppen jeweils optimieren zu können und die Parameter und Strahlenbelastung

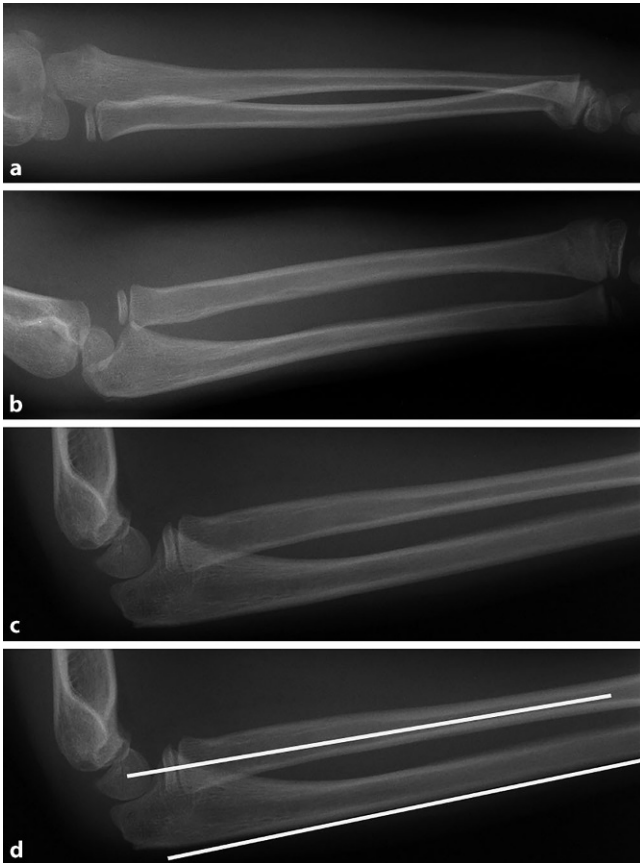


Abb. 12 ▲ a–d Typisches Beispiel einer verpassten Monteggia-Läsion trotz Vergleichsaufnahme bei einem 4-jährigen Kind. **a** Auf dem a.-p.-Bild ist eine distale Radiusfraktur zu sehen. **b** Im Seitenbild wurde die Luxation des Radiuskopfes übersehen, dies v. a. auch, weil in diesem jungen Alter die Ulna nicht gebrochen ist, sondern nur ein „Bowling“ aufweist. **c** Trotz der Vergleichsaufnahme wurde die Läsion übersehen. **d** Wendet man die entsprechenden anatomischen Kriterien an, so kann auch beim Kleinkind ohne Vergleichsaufnahme die Verletzung diagnostiziert werden; die Achse des Radius geht immer durch das Zentrum des Kapitellum, die Ulna ist im seitlichen Strahlengang gerade. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

an neue Geräte oder Innovationen (z. B. Photon-Counting-Detektoren) anpassen zu können. Um die korrekte effektive Dosis dem Patienten zuordnen zu können, ist es notwendig, für jede Röntgenuntersuchung das Gewicht und die Größe des Patienten für das Dosisüberwachungssystem zu erfassen. Diese Werte können automatisch von der Messstation an das System übermittelt und regelmäßig für verschiedene Gewichtsgruppen kontrolliert werden. Dabei spielen **Dosisreferenzwerte** eine immer wichtigere Rolle, die mit dem Dosisüberwachungssystem einfach kontrolliert und eingehalten werden können.

Die Röntgenbilder neuerer Geräte sollen dabei immer eine gleich gute oder bessere diagnostische Qualität bei möglichst niedriger Dosis im Vergleich zu der Vorgängerversion aufweisen. Häufig sind keine **kindgerechten Parameter** von Herstellerseite vorhanden, sodass man sich mit jedem neuen Gerät zusammen mit den Applikationsspezialisten und Physikern für die verschiedenen Alters- bzw. Gewichtsgruppen festlegen und jeweils die entsprechende Bildqualität beurteilen muss. Es empfiehlt sich, die

Tab. 2 Durchschnittliche Dosiswerte eines modernen digitalen Röntgengerätes mit Flat-Panel-Detektoren in $\text{cGy} \cdot \text{cm}^2$

Durchschnitt (n= 100) DFP in $\text{cGy} \cdot \text{cm}^2$	Neonaten < 5 kg + < 1 Monat	Kleinkind 5–15 kg + 1 Monat bis 4 Jahre	Mittlere Kindheit 15–30 kg + 5 bis 10 Jahre	Frühe Adoleszenz 30–50 kg + 10 bis 15 Jahre	Späte Adoleszenz > 50 kg + 14 bis 16 Jahre
Schulter a.-p.	–	0,32	0,68	1,08	1,67
Schulter lat.	–	0,48	1,56	2,28	3,44
Oberarm a.-p.	0,18	0,38	0,66	1,33	2,23
Oberarm lat.	0,08	0,26	1,05	2,15	4,83
Ellenbogen a.-p.	–	0,15	0,20	0,32	0,36
Ellenbogen lat.	–	0,16	0,22	0,26	0,36
Vorderarm a.-p.	–	0,19	0,33	0,53	0,69
Vorderarm lat.	–	0,20	0,31	0,51	0,65
Handgelenk a.-p.	–	0,11	0,18	0,26	0,32
Handgelenk lat.	–	0,11	0,15	0,21	0,26
Hand a.-p.	0,29	0,23	0,36	0,54	–
Hand schräg	–	0,19	0,36	0,48	–
Femur a.-p.	0,39	1,07	2,85	4,95	7,52
Femur lat.	0,19	0,92	2,87	4,79	7,32
Knie a.-p.	0,12	0,24	0,48	0,77	1,41
Knie lat.	0,09	0,27	0,58	0,89	1,53
Unterschenkel a.-p.	0,22	0,41	0,84	1,49	2,20
Unterschenkel lat.	0,11	0,43	0,95	1,63	2,26
OSG a.-p.	–	0,16	0,31	0,48	0,72
OSG lat.	–	0,18	0,41	0,63	0,97
Fuß a.-p.	0,16	0,22	0,36	0,57	0,70
Fuß schräg	0,16	0,24	0,41	0,63	0,80

DFP Dosis-Flächenprodukt, a.-p. anterior-posterior, lat. lateral, OSG oberes Sprunggelenk

Tab. 3 Voreinstellungen der Röntgengeräte nach Gewichtsgruppen

Beschreibung	Gewichtsgruppe	Alter
Neonaten	< 5 kg	< 1 Monat
Kleinkinder	5–15 kg	1 Monat bis 4 Jahre
Mittlere Kindheit	15–30 kg	5 bis 10 Jahre
Frühe Adoleszenz	30–50 kg	10 bis 15 Jahre
Späte Adoleszenz	50–80 kg	14 bis 18 Jahre

in **Tab. 3** aufgeführten Gewichts- oder Altersgruppen bei Kindern einzuteilen und für jedes Gerät festzulegen.

Dank des Dosisüberwachungssystems ist es in unserer Röntgenabteilung gelungen, die Strahlenbelastung von Skolioseröntgenbildern um 85 % bei gleichbleibend guter Bildqualität zu reduzieren (**Abb. 15**). Die Standardabweichungen der Strahlenbelastung konnten auch deutlich reduziert werden. Dazu beigetragen hat eine systematisches und stufenweises Optimieren der Röntgenuntersuchung unter Verwendung eines Kupferfilters, der Optimierung von kV- und mAs-Parametern und der Einführung einer seitlichen Kollimation der Mammæ [5].



Abb. 13 **a** Das Röntgenbild des Vorderarms in 2 Ebenen zeigt bei einem 5-jährigen Kind eine Condylus-radialis-Fraktur. Diese Untersuchung zeigt eine falsche Lagerung und zu hohe Einstellparameter (kV [Kilovolt] und mAs [Milliamperesekunde]), eine ungenügende Kollimation des Vorderarms und eine fehlende Filtration. Die Gesamtdosis beträgt Dosislängenprodukt (DLP) $5,4 \text{ dGycm}^2$, und das Bild wirkt überstrahlt, die Weichteile sind im Seitenbild nicht mehr beurteilbar. Das Ellenbogengelenk ist wegen schlechter Einstelltechnik nicht gut beurteilbar. **b** Die Verlaufsuntersuchung an einem Zentrum für pädiatrische Bildgebung mit korrekter Einstellung, richtigem Einblenden und gewichtsadaptierten Scanparametern zeigt eine markant bessere Bildqualität und ein deutlich niedrigeres Dosisflächenprodukt von $0,045 \text{ dGycm}^2$ (120-mal niedrigere Dosis). (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Ein bleibendes Problem ist die eingeschränkte oder fehlende Kooperation von Kleinkindern (unter 6 Jahren) während der Röntgenuntersuchung. Vor allem Kinder mit Verletzungen haben Schmerzen und Angst und sind schwierig zu überzeugen, während der Röntgenuntersuchung die korrekte Lagerung einzuhalten. Daher sind eine gute Führung, Lagerung und Fixation der Kinder und ein aktiver Einbezug der Eltern notwendig, um ein korrektes Röntgenbild zu erreichen. Ist zur Sicherstellung der Diagnose ein optimales Röntgenbild unerlässlich, sollte mit den Eltern sowie mit dem Röntgenpersonal über eine mögliche **Analgesedation** diskutiert werden. In diesem Fall muss eine entsprechende Überwachung während der Untersuchung sowie je nach regionalen Richtlinien 1–2 h über die Untersuchung hinaus gewährleistet sein.

Eine **gute Kooperation** und **Vorbereitung** des Kindes hingegen ermöglichen die optimale Lagerung und Einstellung des Gelenkes sowie die richtige Kollimation auf die zu untersuchende Region. Dies trägt wesentlich zur Dosisreduktion bei und zur besseren Beurteilbarkeit der Pathologie. Alle Fremdkörper, sichtbaren Lagerungshilfen, Gipse sollten möglichst aus dem Untersuchungsgebiet entfernt werden.

Eine Wiederholung der Untersuchung oder ein Seitenvergleich der gesunden Seite sollte möglichst vermieden werden (**Abb. 12**). Es gibt Atlanten oder Websites, um ein normales Gelenk von Kindern in verschiedenen Altersklassen zu vergleichen [2, 8].

Betrieb von Bildverstärkeranlagen

BV(Bildverstärker)-Anlagen werden häufig in der Notfallaufnahme für Repositionen und im Operationssaal für geschlossene Repositionen und intraoperative Stellungskontrollen verwendet. Der Vorteil der **intraoperativen Durchleuchtung** besteht darin, dass der C-Bogen immer so gekippt werden kann, dass perfekte a.-p./laterale oder falls notwendig auch gezielte Schrägaufnahmen gemacht werden können. Somit sollte es zum Standard werden, dass nach einer Reposition zur Dokumentation perfekte Bilder gemacht werden, die dann (heute meist vorhanden) ins PACS („Picture Archiving and Communication System“) eingelesen werden. Dies erübrigt dann nochmalige konventionelle Röntgenaufnahmen, häufig dann mit Gipsverband, was die Beurteilungsqualität immer vermindert.

Die dabei zu beachtenden Punkte sind in **Tab. 4** aufgeführt.

Intraoperative Bildverstärkeranlagen

Auch bei intraoperativem Gebrauch von Röntgengeräten, hier v. a. der Durchleuchtungsgeräte, muss unbedingt auf entsprechende **Einblendung** (Kollimation) geachtet werden (**Abb. 16**), zudem sollten die Hände des Operators ebenfalls nicht im Strahlengang liegen. Für jede Operation oder Reposition mit BV-Anlage



Abb. 14 ▲ Vergleich einer digitalen Röntgenaufnahme der Wirbelsäule in 2 Ebenen (a) mit dem Bild eines Low-dose-Scanners (b) bei einem Jugendlichen mit idiopathischer Adoleszentskoliose. Beachte, dass die Dosis des Röntgenbildes total 1,053 dGy \cdot cm 2 beträgt, wobei die Low-dose-Technologie des Slit-Scanners 4,3 dGy \cdot cm 2 ausmacht. Im Röntgenbild ist es möglich, die Augenlinsen zu schützen. Bei behinderten Kindern ist zudem der Slit-Scanner sehr anfällig für Bewegungsartefakte, da die gesamte Untersuchungsdauer bis zu 8–10 s betragen kann. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)



Abb. 15 ◀ Effekt verschiedener Maßnahmen auf die effektive Dosis der durchschnittlichen Wirbelsäulenröntgenaufnahmen in 2 Ebenen (Skolioseabklärung) in mSv bei gleich guter, diagnostischer Bildqualität. CU Kupfer, kV Kilovolt, mAs Milliamperesekunde. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Maßnahme	Ausgangslage	Kupferfilter	Optimierung kV, mAs	Seitliche Kollimation
Effektive Dosis	0.234 mSv	0.14 mSv	0.039 mSv	0.035 mSv

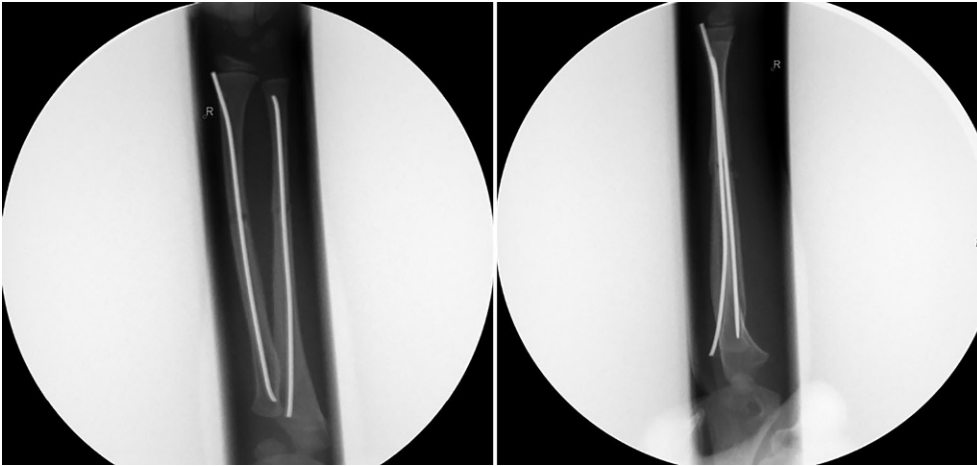


Abb. 16 ◀ Intraoperative Kollimation. Besonders bei geschlossenen Frakturversorgungen, hier am Beispiel einer elastisch stabilen Marknagelung (ESIN) am Unterarm. Hier sollte besonders auf die Einblendung geachtet werden, denn dies verhindert nicht nur die Bestrahlung des Operateurs, sondern erhöht auch die Bildqualität. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Tab. 4 Allgemeine Tipps und Tricks in der Durchleuchtung oder mit BV (Bildverstärker)-Anlagen

1. Kinder gut lagern und BV auf die zu untersuchende Region zentrieren
2. Keine Lagerungshilfen, Fremdkörper, Leitungen im Untersuchungsgebiet
3. Nur im Fluoro-Modus arbeiten (nicht Cine oder Exposition)
4. Kürzestmögliche Pulsationsrate, gepulste Durchleuchtung
5. Einblenden auf relevante Anatomie
6. Keine Vergrößerung
7. Nur sehr kurze Durchleuchtungssequenzen durchführen und als Film oder „last image hold“ aufnehmen
8. Bei Übertischröhren optimale hohe Lage der Röhre, Lichtvisier nutzen
9. Bei Untertischröhren möglichst nahe Position der BV-Anlage beim Objekt
10. Keine Wiederholungen des Gleichen
11. Standardisierte Abläufe/Ebenen

müssen im Operationsbericht die in **Tab. 5** aufgeführten Angaben vorhanden sein.

Indikationen

Häufige Indikationen in der Kinderorthopädie und -traumatologie für eine bildgebende Diagnostik sind:

- Verletzungen,
- entzündliche Veränderungen,
- Tumordiagnostik,
- angeborene Fehlbildungen und Skelettdysplasien,
- Abklärungen von Kindesmisshandlung mit standardisiertem Skelettstatus,
- Beinlängendifferenzen,
- Skoliosen
- etc.

Die klinische Fragestellung, das Alter, die Verfügbarkeit der Diagnostik und die Dringlichkeit beeinflussen die Wahl der bildgebenden Modalität [9].

Tab. 5 Dokumentation einer Röntgen- oder Durchleuchtungsuntersuchung im Operationssaal, der Fluoroskopie oder unter Bildverstärker

Patienten-ID
Eingriff
Datum
Dosisflächenprodukt
Durchleuchtungszeit

Bei Kleinkindern mit **Schonhinken** nach viralem Infekt kann ein Ultraschall als erste und einzige Maßnahme zur Darstellung eines Gelenkergusses genügen. Hingegen ist ein sog. **Hüftschnupfen** eine Ausschlussdiagnose, und man sollte immer an ein Frühstadium eines Morbus Perthes denken, an eine Epiphysiolyse, eine septische Arthritis oder einen Knocheninfarkt (z. B. Neuroblastommetastasierung oder Sichelzellanämie), sodass ein Röntgenbild häufig nötig sein kann (**Abb. 17**).

Die Indikation zu einer MRT bei Kindern mit **unklaren Rückenschmerzen**, die im Röntgenbild nicht erklärt werden können, muss früh und großzügig gestellt werden z. B. zur Diagnosestellung Osteomyelitis, Spondylodiszitis oder Knochentumoren (**Abb. 18**).

Die MRT ist äußerst nützlich bei Knieinnenläsionen, Schulterverletzungen oder Hüft-Impingement-Abklärungen. Arthrographische MR-Untersuchungen werden bei Kindern hingegen nur selten durchgeführt.

Befundung des pädiatrischen Skeletts

Der radiologische Befund zu jeder Bildgebung soll eine akkurate und zeitnahe Interpretation der Bilder beinhalten und in einem Format erscheinen, das die formale Analyse oder Klarstellung der klinischen Fragestellung beschreibt. Der Text soll den Befund möglichst genau, klar und prägnant beschreiben, sodass eine **klinisch-pathologische Korrelation** möglich ist. Der Befund soll neben der Deskription eine Differenzialdiagnose und weitere Empfehlungen zur Abklärung enthalten, die für den Kliniker einen Behandlungsplan für den Patienten erlauben.

Die Befundung der bildgebenden Verfahren hat sich auch weiterentwickelt. Grundsätzlich soll für jede bildgebende Untersuchung die Indikation geprüft werden. Künftig können intelligente



Abb. 17 ▲ Beispiel Hüftschmerzen und Verdacht auf Hüftschnupfen. Das Röntgenbild zeigt eine diffuse Sklerose aller ossären Strukturen bei Metastasierung eines Neuroblastoms. Der Ultraschall zeigte keinen relevanten Gelenkerguss. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Systeme direkt aus der Bildinformation im PACS Messungen in das Radiologie-Informationssystem (RIS) integrieren. Der Befund muss weiterhin die Indikation, die klinische Fragestellung, den deskriptiven Befund und die Beurteilung enthalten. Dabei sollen die Art der Untersuchung und die Ebenen im Titel erwähnt werden.

Für die **Frakturbeschreibung** haben sich unterschiedliche Klassifikationen und Nomenklaturen etabliert. Grundlage gemäß der AO (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen)-Klassifikation nach Slongo et al. [10, 11] ist die anatomische Zuordnung nach Knochen und die Lokalisation innerhalb des Knochens in Epiphyse, Metaphyse und Diaphyse. Anschließend folgen die Art der Fraktur (Torus-, Grünholz- oder komplette Frakturen) und schließlich das Ausmaß der Fehlstellung. Eine Sonderstellung des pädiatrischen Skeletts sind Frakturen, welche die offenen Epiphysenfugen be-

treffen (Salter-Harris- oder Aitken-Müller-Klassifikation), und bei beginnendem Verschluss der Wachstumsfugen des OSG müssen Übergangsfrakturen wie Twoplane- und Triplane-Frakturen unterschieden werden. Durch diese standardisierte Definition der Frakturen gelingt eine einfache Beurteilung in konservativ zu behandelnde Frakturen und Frakturen, die einer chirurgischen Reposition mit Fixation bedürfen [10, 11, 12].

Für die Beschreibung des Skeletts bei **Tumoren** und **Entzündungen** spielt die Charakterisierung der ossären Läsion eine wichtige Rolle. Es wird bei **Osteolyse** geografisch in Mottenfraß- und permeative Osteolyse unterschieden. Die Periostreaktion kann Aufschluss geben über die Aggressivität einer Knochenveränderung (Codman-Dreieck, Spiculae, lamelläre Periostreaktion). Neben Osteolyse spielen **Osteosklerosen** eine Rolle bei chronischen Veränderungen oder Knochenmatrix-bildenden Tumoren. Die anatomische Lokalisation in Epiphyse, Metaphyse und Diaphyse, das Alter und Geschlecht können die Differenzialdiagnose von ossären Prozessen einschränken.

Viele neue **automatische Auswertesoftware**-Lösungen erlauben eine standardisierte und untersucherunabhängige Vermessung des Skeletts. Mit künstlicher Intelligenz gelingt es, das Knochenalter der Hand verlässlich zu bestimmen. Längen-, Winkel- und Kurvenmessungen können dank Segmentierung des Knochens in Orthoradiogrammen, Beckenröntgen oder Skolioseröntgen automatisch durchgeführt werden. Dennoch bedarf es der ärztlichen Kontrolle solcher automatischen Auswertungen, sodass Pathologien nicht übersehen werden.

Immer häufiger werden strukturierte Befundtexte und Befundvorlagen verwendet, die systematisch die Beschreibung aller relevanten Strukturen erlauben (z. B. Knie-MRT, Schulter-MRT, Rotationsmessungen etc.).

Bei allen dosisintensiven Untersuchungen wie Computertomographie, Durchleuchtungen und intraoperativen Bildverstärkeruntersuchungen müssen Aufklärungsgespräch, verwendete Dosis und Zeit sowie verwendete Kontrastmittelmenge und Name dokumentiert werden.



Abb. 18 ◀ 12-jähriger Junge mit Rückenschmerzen seit 3 Monaten. **a** Das Röntgenbild zeigt eine linksseitige Höhenminderung von Lendenwirbelkörper (LWK) 3 mit paravertebraler Weichteilmasse und rechtskonvexer Haltung der Lendenwirbelsäule (LWS). **b** In der koronaren TIRM („turbo inversion recovery magnitude“-MRT (Magnetresonanztomographie) ist ein hyperintenses Signal von LWK 3 erkennbar mit Höhenminderung linksseitig und paravertebraler Raumforderung. Der Befund ist vereinbar mit einem Ewing-Sarkom. (Mit freundl. Genehmigung von © Universitätsklinik, Inselspital Bern/Bern, Schweiz. Alle Rechte vorbehalten)

Bildverteilung und Archivierung

Dank des „Picture Archiving and Communication System“ (PACS) gehen Röntgenbilder nicht mehr verloren und sind innerhalb eines Klinikverbundes einfach und jederzeit abrufbar. Auch zuweisenden Hausärzten und Patienten können unmittelbar digitale Bildinformationen zugänglich gemacht werden. Als Bildformat hat sich der DICOM („Digital Imaging and Communications in Medicine“)-Standard etabliert, der auch an einer beliebigen Workstation eine Nachbearbeitung wie Bildfensterung, Messungen und Rekonstruktionen erlaubt. Wegen der immer zahlreicheren Bilderdaten in der CT und MRT, aber auch im Ultraschall werden immer größere digitale Bildspeicher benötigt.

Fazit für die Praxis

- Moderne digitale Röntgenanlagen ermöglichen eine deutlich niedrigere Strahlenbelastung bei besserer Bildqualität im Vergleich zu Computer Radiographie(CR)-Anlagen oder Film-Folien-Systemen. Gonadenschutze sind somit obsolet. Es gelten weiterhin bei allen bildgebenden Modalitäten mit ionisierenden Strahlen die Grundlagen des Strahlenschutzes im Kindesalter, wobei die Indikationsprüfung, das Einblenden, der Einsatz von Filtern und alters- bzw. gewichtsadaptierten Einstellparametern wesentlich zum Strahlenschutz beitragen können.
- Bei Kindern müssen die Eltern gut eingebunden und aufgeklärt werden. Positionierung der Gelenke, Kollimation und Optimierung der Dosisparameter spielen eine wichtige Rolle in der Kinderradiologie. Es soll immer daran gedacht werden, dass das Kind Schmerzen haben könnte und man deshalb unnötige Manipulationen vermeiden sollte, vielmehr sollte in Betracht gezogen werden, die Röntgenröhre zu schwenken.
- Ultraschall, Computertomographie oder Magnetresonanztomographie können ergänzend offene Fragestellungen beantworten, wobei jede dieser Modalitäten ihre Stärken und Schwächen hat. Das Röntgenbild bildet weiterhin die Grundlage der diagnostischen Bildgebung des pädiatrischen Skeletts.

Korrespondenzadresse

Dr. Theddy Slongo

Kinderorthopädie / Kindertraumatologie, Medizinbereich Kinder und Jugendliche, Universitätsklinik für Kinderchirurgie
Juli-von-Jenner-Haus, Freiburgstr. 15, 3010 Bern, Schweiz
theddy.slongo@outlook.com

Funding. Open access funding provided by University of Bern

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Gemäß den Richtlinien des Springer Medizin Verlags werden Autoren und Wissenschaftliche Leitung im Rahmen der Manuskripterstellung und Manuskriptfreigabe aufgefordert, eine vollständige Erklärung zu ihren finanziellen und nichtfinanziellen Interessen abzugeben.

Autoren. T. Slongo gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht. E. Stranzinger: A. Finanzielle Interessen: E. Stranzinger gibt an, dass kein finanzieller Interessenkonflikt

besteht. – B. Nichtfinanzielle Interessen: Leitender Arzt an der Abteilung für Diagnostische, Interventionelle und Pädiatrische Radiologie | Universitätsklinik, Inselspital Bern | Freiburgstr., 3010 Bern, Schweiz.

Wissenschaftliche Leitung. Die vollständige Erklärung zum Interessenkonflikt der Wissenschaftlichen Leitung finden Sie am Kurs der zertifizierten Fortbildung auf www.springermedizin.de/cme.

Der Verlag erklärt, dass für die Publikation dieser CME-Fortbildung keine Sponsorengelder an den Verlag fließen.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts, über die Patient/-innen zu identifizieren sind, liegt von ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern/Vertreterinnen eine schriftliche Einwilligung vor.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Stranzinger E, Leidolt L, Eich G, Klimek PM (2014) The anterior tilt angle of the proximal tibia epiphyseal plate: a significant radiological finding in young children with trampoline fractures. *Eur J Radiol* 83:1433–1436
2. Keats TS, T. (1977) *An Atlas of Normal Developmental Roentgen Anatomy*. Year Book Medical Publishers, Inc.
3. Kohlhof H, Heidt C, Bahler A, Kohl S, Gravius S, Friedrich MJ, Ziebarth K, Stranzinger E (2015) Can 3D ultrasound identify trochlea dysplasia in newborns? Evaluation and applicability of a technique. *Eur J Radiol* 84:1159–1164
4. Knott P, Pappo E, Cameron M, Demauroy J, Rivard C, Kotwicki T, Zaina F, Wynne J, Stikeleather L, Bettany-Saltikov J, Grivas TB, Durmala J, Maruyama T, Negri S, O'Brien JP, Rigo M (2014) SOSORT 2012 consensus paper: reducing x-ray exposure in pediatric patients with scoliosis. *Scoliosis* 9:4
5. Brosi P, Stuessi A, Verdun FR, Vock P, Wolf R (2011) Copper filtration in pediatric digital X-ray imaging: its impact on image quality and dose. *Radiol Phys Technol* 4:148–155
6. Frush DP, Strauss KJ (2022) Changing the practice of routine gonadal shielding during radiography: „Y“? *Pediatr Radiol* 52:7–9
7. Strauss KJ, Gingold EL, Frush DP (2017) Reconsidering the value of gonadal shielding during abdominal/pelvic radiography. *J Am Coll Radiol* 14:1635–1636
8. Schiller RSE, Medizinische Fakultät Universität Pedirad Skelettröntgen. University of Bern, Bern
9. Wolf RS, E. (2015) *Kinderradiologie – Indikationsstellung zur Bilddiagnostik*. Hans Huber.
10. Slongo T, Audige L, Lutz N, Frick S, Schmittebecher P, Hunter J, Clavert JM (2007) Documentation of fracture severity with the AO classification of pediatric long-bone fractures. *Acta Orthop* 78:247–253
11. Slongo TF, Audige L, Group AOPC (2007) Fracture and dislocation classification compendium for children: the AO pediatric comprehensive classification of long bone fractures (PCCF). *J Orthop Trauma* 21:S135–S160
12. Audige L, Slongo T, Lutz N, Blumenthal A, Joeris A (2017) The AO Pediatric Comprehensive Classification of long bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop* 88:133–139

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.



Bildgebung in der Kindertraumatologie/Kinderorthopädie

Zu den Kursen dieser Zeitschrift: Scannen Sie den QR-Code oder gehen Sie auf www.springermedizin.de/kurse-oot

? Bei Kleinkindern sollen bei Verdacht auf Unterarmfrakturen immer die beiden angrenzenden Gelenke geröntgt werden, um folgenden Befund besser beurteilen zu können:

- Luxation des Radiusköpfchens bei isolierter Ulnafraktur
- Subluxation des Radiusköpfchens bei distaler Radiusfraktur
- Luxation im distalen Ulna-Radial-Gelenk
- Bowing von Radius und Ulna
- Luxation der Ulna bei proximaler Ulnafraktur

? Ein indirektes Frakturzeichen bei Ellbogenfrakturen kann sein:

- Das Pronator-Quadratus-Zeichen
- Der anteriore Tiltwinkel der Tuberositas
- Das Fat-Pad-Zeichen
- Der dorsale Tiltwinkel der distalen Radiuswachstumsfuge
- „Toddler sign“

? Die Röntgendosis kann vermindert werden bei altersentsprechender Anpassung von:

- Film-Folien Systemen
- Dynamischen Durchleuchtungssequenzen statt Röntgenbild
- einer Vergrößerung des Abstandes der Röntgenröhre
- mAS (Milliamperesekunde) und kV (Kilovolt)
- Dual-Energy-CT (Computertomographie) bei unklaren Fragestellungen

? Die Sonographie ist dem Röntgenbild überlegen bei ...

- Dokumentation von Galeazzi Frakturen.
- Sensitivität von intraartikulären Frakturen.
- Winkelbestimmung von suprakondylären Frakturen.
- Sensitivität von Gelenkergüssen.
- Ausprägung der Achsabweichung bei Schafffrakturen.

? Die konventionelle Computertomographie von Gelenken ist hilfreich bei ...

- Gefäßrekonstruktion ohne Kontrastmittel.
- Übergangsfrakturen bei Jugendlichen.
- Darstellung von Knochenödemen.
- Früherkennung einer Osteomyelitis.
- Altersbestimmung von Wirbelkörperfrakturen.

? Die Magnetresonanztomographie (MRT) wird bei Kindern zumeist nicht eingesetzt bei ...

- Torsionsmessungen der unteren Extremitäten.
- Kniebinnenläsionen.
- Beurteilung bei Hüftdysplasien nach Reposition im Gips (Typ IV).
- Osteomyelitis der Metaphysen.
- Frakturabklärung im Schockraum bei Polytrauma.

? Eine der wichtigsten Strahlenschutzmaßnahmen beinhaltet bei Kindern:

- Grundsätzlich beide Seiten zum Vergleich röntgen
- Die Indikation zur Röntgendiagnostik prüfen
- Alternativen wie Computertomographie (CT) oder Fluoroskopie anstatt Magnetresonanztomographie (MRT) oder Sonographie
- Wenig Rauschen im Bild
- Dezentrierung des Gelenkes in der Computertomographie (CT)

? Welche Aussage trifft nicht zu?

- Der Gonadenschutz bei Kindern wird nicht mehr empfohlen.
- Der Gonadenschutz führt zu einer höheren Streustrahlung von Darm und Magen.
- Der Gonadenschutz bei Mädchen schützt nicht immer die Ovarien im Becken.
- Die Strahlenbelastung eines Röntgenbildes des Beckens entspricht ca. 100 Tagen natürlicher Strahlenexposition (1,2 mSv).
- Die Strahlenbelastung des Röntgens des Fußes entspricht ca. 2 h natürlicher Strahlenexposition (0,001 mSv).

Informationen zur zertifizierten Fortbildung

Diese Fortbildung wurde von der Ärztekammer Nordrhein für das „Fortbildungszertifikat der Ärztekammer“ gemäß § 5 ihrer Fortbildungsordnung mit **3 Punkten** (Kategorie D) anerkannt und ist damit auch für andere Ärztekammern anerkennungsfähig.

Anerkennung in Österreich: Für das Diplom-Fortbildungs-Programm (DFP) werden die von deutschen Landesärztekammern anerkannten Fortbildungspunkte aufgrund der Gleichwertigkeit im gleichen Umfang als DFP-Punkte anerkannt (§ 14, Abschnitt 1, Verordnung über ärztliche Fortbildung, Österreichische Ärztekammer (ÖÄK) 2013).

Hinweise zur Teilnahme

- Die Teilnahme an dem zertifizierten Kurs ist nur online auf www.springermedizin.de/cme möglich.
- Der Teilnahmezeitraum beträgt 12 Monate. Den Teilnahmeschluss finden Sie online beim Kurs.
- Die Fragen und ihre zugehörigen Antwortmöglichkeiten werden online in zufälliger Reihenfolge zusammengestellt.

- Pro Frage ist jeweils nur eine Antwort zutreffend.
- Für eine erfolgreiche Teilnahme müssen 70% der Fragen richtig beantwortet werden.
- Teilnehmen können Abonnenten dieser Fachzeitschrift und e.Med-Abonnenten.

? Welche Aussage ist richtig? Beim intraoperativen Gebrauch eines Bildverstärkers sollte man darauf achten, dass ...

- versucht wird, lange Durchleuchtungssequenzen anzustreben.
- ein Einblenden des Operationsgebietes vermieden wird.
- die maximale Vergrößerung gewählt wird.
- das Lichtvisier vermieden wird.
- eine kurze Pulsationsrate verwendet wird.

? Welche Aussage trifft für Skolioseröntgenbilder zu?

- Die Dosis kann mit Verwenden eines Kupferfilters um 10 % reduziert werden.
- Die Optimierung von kV (Kilovolt) und mAs (Milliamperesekunde) ermöglicht zusätzlich eine Dosisreduktion von über 50 %.
- Die Bildqualität ist erheblich beeinträchtigt bei einer Dosisreduktion von 50 % im Vergleich zu Erwachsenenparametern.
- Die Kollimation der Brustdrüsen trägt über 20 % zur Dosisreduktion bei.
- Die Wirbelsäule ist bei Kleinkindern weniger strahlensensibel als bei älteren Kindern.