

Rolle der modernen Strahlen- und Protonentherapie für Tumoren des Kindes- und Jugendalters

Krebs im Kindesalter ist selten. Die Überlebensraten 5 Jahre nach dieser Diagnose sind heute bis auf 80% gestiegen. Heute wird die Strahlentherapie bei verschiedenen Tumorarten im Kindesalter eingesetzt, wie zum Beispiel häufig bei Sarkomen und Tumoren des zentralen Nervensystems. Die Strahlentherapie ist ein wichtiger Bestandteil des multimodalen Behandlungskonzeptes und wird meist im Rahmen von Studien nationaler und internationaler Fachgesellschaften angewendet. Aufgrund ihres Wachstums sind Kinder besonders empfindlich gegenüber strahlungsbedingten Nebenwirkungen und der Induktion von Sekundärmalignomen. Auch birgt das junge Patientenalter besondere Herausforderungen für die Familien sowie die beteiligten Fachdisziplinen bei der Bestrahlungsvorbereitung und -durchführung. Die kontinuierliche Entwicklung moderner Strahlentherapietechniken ermöglicht eine Therapie, die gleichzeitig so intensiv wie nötig und so schonend wie möglich ist. Darüber hinaus werden moderne Behandlungskonzepte verbessert, um Langzeitwirkungen zu minimieren.



**Prof. Dr. med.
Beate Timmermann**

Strahlentherapie in der pädiatrischen Onkologie

Krebserkrankungen im Kindesalter sind aufgrund ihrer Seltenheit, der großen Vielfalt an histologischen Typen und der Komplexität der Behandlungskonzepte eine Herausforderung für jeden Radioonkologen. Nach den Leukämien (30,3%) sind in Deutschland Tumoren des zentralen Nervensystems (23,8%) die am häufigsten gemeldeten Krebserkrankungen. Knochentumoren und Weichteilsarkome machen zusammen weitere 11% der Tumorerkrankungen aus (1). In den letzten Jahrzehnten sind die Überlebenschancen

von Kindern mit Krebserkrankungen stark gestiegen. Heute überleben in Deutschland 85% der Kinder, die im Alter unter 15 Jahren an Krebs erkranken, mindestens fünf Jahre; 83% überleben mindestens zehn Jahre (1). Die Strahlentherapie ist neben der Chemotherapie und der Operation bei vielen Tumoren ein unverzichtbarer Bestandteil des multimodalen Behandlungskonzeptes. Ziel einer guten Strahlentherapie ist hierbei, die größtmögliche lokale Heilungswahrscheinlichkeit mit dem geringsten Risiko einer strahleninduzierten Komplikation zu erreichen. Daher ist es ein Grundprinzip der Strahlentherapie in der pädiatrischen Onkologie, die Behandlungsintensität auf das individuelle Risikoprofil der Kinder abzustimmen und die Behandlung nur so intensiv wie nötig und so schonend wie möglich zu gestalten. Aufgrund des sich in der Entwicklung befindlichen Gewebes sind Kinder jedoch besonders gefährdet, strahlungsbedingte Nebenwirkungen zu entwickeln, die die Organfunktion oder die normale Entwicklung beeinträchtigen. Ebenso besteht ein Risiko für die strahlentherapiebedingte Induktion von Sekundärmalignomen.

Heute wird die Strahlentherapie bei verschiedenen Tumorarten im Kindesalter eingesetzt, wie zum Beispiel häufig bei Sarkomen oder Tumoren des zentralen Nervensystems.

Entwicklungen und Fortschritte der Strahlentherapie

Bereits seit den 1930-er Jahren wird die Strahlentherapie in der pädiatrischen Onkologie routinemäßig durchgeführt, meist eingebunden in ein multidisziplinäres Behandlungskonzept aus Operation, Chemotherapie und Strahlentherapie. Die Rolle der Strahlentherapie hat sich in den vergangenen Jahrzehnten stark gewandelt und ist inzwischen integraler Bestandteil der pädiatrischen Onkologie. Sehr häufig erfolgt die Strahlentherapie in Kombination mit der Operation oder auch allein. Ziel ist in der Regel die Heilung, beispielsweise wenn der Tumor nicht oder nicht ausreichend operabel ist, weil sich dieser in unmittelbarer Nachbarschaft zu kritischen Strukturen befindet.

Aufgrund der steigenden Überlebensraten bei Kindern mit Krebserkrankungen in den letzten Jahrzehnten, besteht das Hauptziel der Strahlentherapie nun also nicht mehr nur darin, eine Tumorerkrankung zu heilen und die lokale Tumorkontrolle zu maximieren, sondern auch darin, die behandlungsbedingten chronischen Spätnebenwirkungen zu reduzieren und damit die Lebensqualität der späteren Erwachsenen zu verbessern (2). Moderne Behandlungskonzepte beinhalten die Minimierung der Langzeitnebenwirkungen und werden stetig verbessert. Um behand-

lungsbedingte, späte Nebenwirkungen zu vermeiden, ohne die Tumorkontrolle zu gefährden, wurden in den letzten Jahrzehnten immer individuellere Konzepte, aber auch präzisere strahlentherapeutische Modalitäten und Techniken entwickelt, die je nach Tumorrisiko auf eine Verringerung der Strahlendosis oder des bestrahlten Volumens abzielen. Neben der gezielteren, „konformalen“ (genaue 3D-Anpassung der Strahlendosis an die Tumorausdehnung) Dosisabgabe im Rahmen der Strahlentherapie haben auch technologische Fortschritte in der Diagnostik zu einer besseren Tumorabgrenzung und kleineren Zielvolumina geführt (3, 4). Mit der konformalen Strahlentherapie soll eine möglichst exakte Verabreichung der therapeutisch wirksamen Dosis im zuvor definierten Zielvolumen erreicht, und eine unnötige Belastung des gesunden umgebenden Gewebes verhindert werden.

Moderne Bestrahlungstechniken in der pädiatrischen Onkologie

Die Techniken der Strahlentherapie haben sich kontinuierlich weiterentwickelt. Zur Behandlung von Tumoren im Kindesalter wird überwiegend die externe Strahlentherapie mit Photonen oder Protonen oder die Brachytherapie eingesetzt, wobei vor allem die Protonentherapie in den letzten zehn Jahren verstärkt bei pädiatrischen Tumoren zum Einsatz kommt. Heute wird die Strahlentherapie bei Neuroblastomen im Kindesalter, Lymphomen, Hirntumoren sowie Weichteil- und Knochensarkomen eingesetzt (5).

Photonentherapie

Die Photonen-(Röntgen-)Strahlentherapie ist der konventionelle strahlentherapeutische Ansatz bei pädiatrischen Tumoren. Hierbei werden die Photonen durch einen Beschleuniger auf eine sehr hohe Energie und als elektromagnetische Welle in den Körper gebracht, damit sie tief ins Gewebe eindringen können, und dort therapeutisch wirken. Obwohl die Strahlung auf den Tumor gerichtet ist, beeinflusst sie auch das normale Gewebe, das sie auf ihrem Weg in den Körper und aus dem Körper hinaus durchläuft. Nachdem in den 1980-er Jahren der Einsatz von 2D-Techniken durch konventionelle 3D-Techniken ersetzt wurde, ist der aktuelle Behandlungsstandard in den meisten Zentren heutzutage die 3-D konformale

Strahlentherapie mit Photonen (3D-CRT) (6). Die 3D-CRT nutzt Computertomographie (CT)-Bilder und spezielle Computer, um die Lage eines Tumors sehr genau in 3 Dimensionen abzubilden. Je nach Entität, Lokalisation und Alter des Patienten löst die photonenbasierte intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT) als eine weiterentwickelte Form der Strahlentherapie mit Photonen die 3D-CRT jedoch zunehmend ab. Neben vielen, verschiedenen Einstrahlrichtungen können bei dieser Technik auch sehr verschiedene Strahlintensitäten für die optimale Tumorabdeckung bzw. Gewebeschonung eingestellt werden. Heute werden dabei zusätzlich bildgebende Verfahren - wie Röntgensysteme, Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) - eingesetzt, um die Präzision in der Planung und täglichen Behandlungsanwendung zu erhöhen („Image Guided Radiotherapy“ (IGRT)). Die lokale Zuordnung von Dosis und Zielgebiet kann hiermit verbessert werden und ermöglicht eine Reduzierung der Sicherheitssäume einer Bestrahlung. Hierdurch kann dem Tumor eine hohe Strahlendosis bei gleichzeitiger Minimierung des bestrahlten Volumens des Normalgewebes verabreicht werden. Die Abgabe einer hohen Dosis an den Tumor durch mehrere Photonenfelder führt jedoch unter Umständen zu einer unerwünschten Exposition und Dosis-Verschmierung im umgebenden Normalgewebe, was unter Umständen zu einem höheren Risiko von strahleninduzierten Nebenwirkungen führen kann (6). Daher muss bei der Auswahl der Strahlentherapietechnik besonders bei Kindern immer eine individuelle, kritische Abwägung von potentiellen Vor- und Nachteilen erfolgen.

Protonentherapie

Anders als bei der konventionellen Photonentherapie erfolgt die Strahlentherapie mit Protonen mit geladenen Wasserstoffionen, die mit einem Beschleuniger auf ca. 200.000 km/s und damit auf etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Im Unterschied zur konventionellen Bestrahlung erfolgt bei der Behandlung mit Protonen keine Durchstrahlung des Körpers. Vielmehr kann die Eindringtiefe des Protonenstrahls präzise eingestellt werden. Dies ist aufgrund der physikalischen Eigenschaft der Protonen möglich: Die maximale Dosis wird durch

die Wahl der entsprechenden Energie genau am Zielort erreicht und fällt danach abrupt ab, was im Gegensatz zur Photonenbestrahlung die Ausgangsdosis vermeidet („Bragg-Peak“) (7). Die Protonentherapie kann dadurch die Strahlenbelastung des umgebenden Gewebes reduzieren – im Vergleich zur Bestrahlung mit Photonen um den Faktor 2 bis 3 (8). Somit können mit der Protonentherapie gegenüber der Photonentherapie potentiell strahleninduzierte Nebenwirkungen und das Auftreten von Sekundärmalignomen reduziert und die Lebensqualität von Patienten verbessert werden (9-11). Der potenzielle Vorteil der Protonentherapie wurde erstmals 1946 berichtet, als der Physiker Robert Wilson aufgrund ihrer besonderen physikalischen Eigenschaften Protonen für den klinischen Einsatz vorschlug (12). Damals wurden die Anlagen zur Protonentherapie lediglich als Forschungsanlagen für die technische Nutzung und Weiterentwicklung konzipiert. Erst seit den 1990-er Jahren wurden derartige Anlagen speziell für die Patientenbehandlung errichtet. Mittlerweile sind weltweit etwa 65 Protonenanlagen in Betrieb, weitere befinden sich derzeit im Bau bzw. sind in Planung. Bis Ende 2018 wurden weltweit etwa 220.000 Patienten mit Partikeln bestrahlt, etwa 190.000 Patienten davon mit Protonen (13). Die Nutzung der Protonentherapie steigt in Europa stetig an. Während im Jahr 2014 insgesamt etwa 200 Kinder eine Protonentherapie erhielten, waren es im Jahr 2018 bereits nahezu 700 (14). In Deutschland stehen 6 Anlagen mit unterschiedlichen technischen Ausstattungen und klinischen Schwerpunkten zur Verfügung. Bei etwa einem Drittel der Kinder in Deutschland erfolgt eine Strahlentherapie mit Protonen. Technische Fortschritte, wie beispielsweise die Einführung des Pencil Beam Scanning (PBS) und der intensitätsmodulierten Protonentherapie (IMPT), konnten eine noch bessere Dosiskonformität, eine geringere Eintrittsdosis (die Strahlenbelastung, die bei der Durchdringung auf dem Weg von der Haut bis zum Zielgebiet entsteht) und eine geringere Neutronendosis-Kontamination ermöglichen. Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Behandlung pädiatrischer Tumoren, weil neben der Entstehung von Akutnebenwirkungen vor allem langfristige Nebenwirkungen auf den sich noch entwickelnden Körper

oder das Risiko von Sekundärtumoren von immenser Bedeutung sind.

Die Protonentherapie ist also ein vielversprechendes Instrument, um entweder - wenn nötig - die lokale Therapie zu intensivieren oder das Risiko akuter Nebenwirkungen und der Entstehung von Sekundärtumoren nach der Tumorbehandlung zu reduzieren und damit die Lebensqualität zu erhöhen (10, 11). Obwohl die Verfügbarkeit der Protonentherapie im Vergleich zu anderen Techniken schlecht ist (15), wurden in den letzten Jahren nachhaltige Fortschritte erzielt. Insbesondere bei der Behandlung von Tumoren in der Nähe kritischer Organe wie ZNS-Tumoren oder in sehr früher Kindheit wächst das Interesse an der Protonentherapie. Gerade bei Bestrahlungen von Hirntumoren sowie im Bereich des gesamten Zentralnervensystems sind Kinder wegen des sich noch entwickelnden Gewebes besonders anfällig für die Entstehung von Nebenwirkungen und Sekundärmalignomen (16). Sie wird daher in vielen Ländern zunehmend eingesetzt (17). Das Westdeutsche Protonentherapiezentrum in Essen hat sich speziell auf die Behandlung von Kindern fokussiert und bietet das größte Bestrahlungsprogramm für Kinder in Europa.

Dieser technische Fortschritt in der Bestrahlung bewirkt eine bessere Schonung des normalen Gewebes und dadurch eine Minimierung der Langzeitfolgen der Strahlung. Die aktuelle Forschung fokussiert sich daher zunehmend auch auf das Auftreten und die Vermeidung von Spätfolgen, die für die Lebensqualität von entscheidender Bedeutung sind.

Brachytherapie

Im Gegensatz zur externen Strahlentherapie mit Photonen oder Protonen handelt es sich bei der Brachytherapie um eine Kontakt-Strahlentherapie. Hierbei wird eine umschlossene Strahlenquelle direkt neben oder in das Zielvolumen platziert. Der Dosisabfall in die Umgebung ist im Vergleich zu externen Strahlentherapiemethoden extrem steil. Der Vorteil der Brachytherapie besteht in der Möglichkeit, eine hohe Strahlendosis auf einen kleinen und definierten Bereich zu übertragen, ohne dass Schädigungen des weiter entfernten normalen Gewebes entstehen. Obwohl die meisten Tumoren im Kindesalter mit externer Strahlentherapie in einem multimodalen Umfeld be-

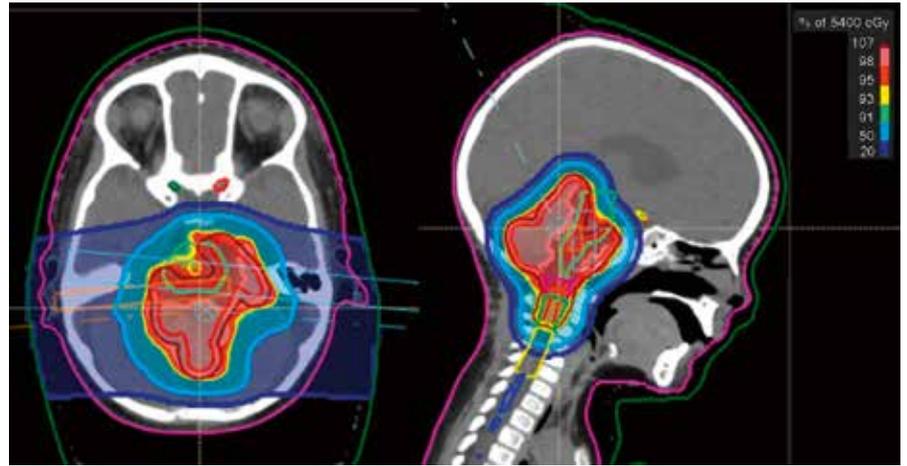


Abbildung 1: Transversale und sagittale Ansicht eines Protonen-Bestrahlungsplans für ein Kind mit Ependymom. Rote Linie: Bestrahlungsvolumen/Tumorbett. Hellblau bis dunkelblau: Bereiche mit geringer Dosis.

handelt werden, wird die Brachytherapie in Einzelfällen als vorteilhaft hinsichtlich unerwünschter Ereignisse angesehen, zum Beispiel bei kleinen und örtlich abgegrenzten Tumorumfängen (18).

Die Brachytherapie wird zum Beispiel im Zusammenspiel mit einer Operation bei einigen Weichteilsarkomen des Kopf-/ Halsbereichs, bei Tumoren des Urogenitalsystems (19), oder auch bei lokal begrenzten Retinoblastomen (20, 21) eingesetzt.

Konzepte der Strahlentherapie

Neben den verschiedenen Techniken haben sich auch die Konzepte in der Strahlentherapie gewandelt. Insbesondere bei der Behandlung von soliden Tumoren des ZNS (22) oder von Tumoren der Knochen und des Weichgewebes ist die Strahlentherapie nach wie vor ein sehr wichtiger Bestandteil der multimodalen Therapiestrategie. Aber auch bei Neuroblastomen, Lymphomen, Wilms-tumoren oder Retinoblastomen findet sie regelmäßig Anwendung. Seltener kommt die Strahlentherapie bei Behandlungen von Leukämien zum Einsatz (Tabelle 1). Während beispielsweise ZNS-Tumoren noch bis in die 1980-er Jahre immer identisch behandelt wurden, erlauben moderne, individualisierte Strahlentherapiekonzepte heutzutage eine dem Tumorrisiko angepasste Bestrahlung mit Berücksichtigung der individuellen Risikokonstellation der Patienten. Es wird dadurch derzeit nicht mehr wie früher das gesamte ZNS (Gehirn und Rückenmark) bestrahlt, sondern oft nur noch die Region, in der sich der Tumor befindet (Abbildung 1). Hierdurch

wird eine Reduktion des bestrahlten Gesamtvolumens erreicht, wodurch sich auch das Risiko für strahleninduzierte Schädigungen des gesunden Gewebes reduziert. Moderne Behandlungskonzepte tragen also dazu bei, die Lebensqualität der Kinder und jungen Erwachsenen zu erhalten und das Auftreten von Spätfolgen und Zweittumoren zu reduzieren. Nur bei dringendem Bedarf wird die kraniospinale Achse (also das gesamte ZNS) ebenfalls bestrahlt.

Auch strukturell hat sich in der pädiatrischen Onkologie einiges getan. Unter dem Dach der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie (GPOH) konnten vor allem durch den Aufbau kooperativer Strukturen für Erfassung, Diagnostik, Therapie und Nachsorge pädiatrisch-onkologischer Erkrankungen Wissen generiert und eine positive Entwicklung der Therapiekonzepte und damit der Heilungsraten ermöglicht werden. In Deutschland werden über 90% aller Kinder und Jugendlichen mit einer Krebserkrankung in interdisziplinären Therapieoptimierungsstudien und Registern diagnostiziert und behandelt (23). Diese Studien dienen der Qualitätssicherung, Standardisierung und Optimierung von Therapieoptionen. Die Fachleute der Strahlentherapie sind dabei integraler Bestandteil des Expertennetzwerkes.

Wirkung, Chancen und mögliche Risiken bei Kindern

Sowohl die Photonen- als auch die Protonentherapie sind als strahlentherapeutische Optionen für die Behandlung

von Tumoren im Kindesalter akzeptiert und konnten sich als eine wichtige Säule im Behandlungskonzept für eine Vielzahl von Diagnosen etablieren. Die Fähigkeit der Protonen, die Strahlenbelastung von Kindern zu verringern, kann als wichtiger Fortschritt in der Behandlung von Krebs-erkrankungen im Kindesalter erachtet werden, insbesondere bei Tumoren des zentralen Nervensystems. Dennoch birgt jegliche Strahlentherapie bei Kindern auf Grund des noch unreifen Gewebes besondere Risiken.

Die individuellen Nebenwirkungen der Bestrahlung hängen dabei vom bestrahlten Gebiet, von der applizierten Dosis, vom Alter des Kindes sowie eventueller Begleittherapien oder Neben-erkrankungen ab. Grundsätzlich muss zwischen Akutreaktionen und Spätnebenwirkungen unterschieden werden. Akute Nebenwirkungen treten meist lokal und während der Therapie auf und werden zum Beispiel in Form von Hautreizungen im Bestrahlungsfeld sichtbar, klingen aber in der Regel zum Ende der Therapie wieder ab. Bei den Akutreaktionen ist eine klare Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Strahlendosis und dem Ausmaß der Schädigung/Inaktivierung proliferierender Stammzellen erkennbar. Ebenfalls kann es aber neben den örtlichen Hautreizungen eher allgemein zu Ermüdungserscheinungen, Kopfschmerzen oder Unwohlsein kommen (24). Um dem Auftreten radiogener Nebenwirkungen frühzeitig entgegen-

wirken zu können, sollten während der Bestrahlung engmaschige Kontrollen und Beratungen stattfinden. In den meisten Fällen sind die Symptome durch einfache Supportivmaßnahmen kontrollierbar.

Spätfolgen hingegen manifestieren sich oftmals erst nach einigen Monaten oder Jahren und sind in der Regel nicht reversibel. Je nach Bestrahlungsbereich und Dosis können sich beispielsweise Beeinträchtigungen bei der Hormonbildung, Speichelbildung sowie beim Wachstum ergeben, aber auch Beeinträchtigungen der Organfunktionen oder Nerven-/Sinnesfunktionen. Das jeweilige Ausmaß hängt dabei von vielen Faktoren ab wie Alter, Begleittherapien, eventuellen Operationsfolgen sowie bestehenden Komorbiditäten. In seltenen Fällen können auch strahleninduzierte Zweittumoren auftreten, teilweise erst nach Jahrzehnten; ihre Inzidenz wird in der Literatur mit ca. 3% nach 20 Jahren angegeben (25). Angesichts der langen Lebenserwartung bei Kindern kommt der Entstehung von Sekundärmalignomen bei ihrer Behandlung eine besondere Bedeutung zu und bedarf dementsprechend regelmäßiger und vor allem langjähriger Nachsorgeuntersuchungen. Sekundärmalignome, die bereits innerhalb der ersten fünf Jahre nach Erstbehandlung auftreten, sind bei vielen Entitäten mit einem signifikant schlechteren 5- und 10-Jahres-Überleben vergesellschaftet als bei einem späteren Auftreten (26).

Inwieweit sich dosiseinsparende, moderne Techniken wie zum Beispiel eine Protonentherapie hierbei positiv auf eine zukünftig hoffentlich niedrigere Zweitumorrate auswirken werden, ist weitgehend noch unklar. Obwohl viele dosimetrische Studien und Modellierungsstudien die theoretischen Vorteile der Protonentherapie unterstützen, beginnen sich die tatsächlichen klinischen Ergebnisse erst jetzt im Rahmen von Langzeitdaten zu zeigen. Das Vollbild von Spätfolgen lässt sich erst viele Jahre nach Beendigung der Strahlentherapie erkennen. Zu den bestehenden Herausforderungen gehören die geringen Patientenzahlen, die Latenzzeiten, die geringe Inzidenz schwerwiegender Spätfolgen, Kosten im Zusammenhang mit Langzeit-Follow-up-Studien oder Registern und die generell geringe Verfügbarkeit einer Protonentherapie. Bisherige klinische Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Protonentherapie strahlenbedingte Spätnebenwirkungen wie neurokognitive Beeinträchtigungen und sekundäre Tumoren reduzieren kann. Daher wird die Anwendung von Protonen bei jungen Kindern mittlerweile oftmals bevorzugt.

Herausforderungen bei der Bestrahlung von Kindern

Im Rahmen der onkologischen Therapie von Kindern ist immer ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den behandelnden Kinder-

Tabelle 1: Nutzung der Strahlentherapie in der pädiatrischen Onkologie bei verschiedenen Tumoren.

Tumoren	Diagnosen (Beispiele)	Nutzung Radiotherapie
Hirntumoren	Ependymome, Medulloblastome,	Häufig
Tumoren der Knochen, Knorpel und Weichteile (Sarkome)	Rhabdomyosarkome, Ewing-Sarkome	Häufig
Keimzelltumoren	Germinome, Non-Germinome	Intrakraniell: Häufig Extrakraniell: Selten
Neuroblastome	Neuroblastome	Regelmäßig bei bestimmten Risikofaktoren
Nephroblastome	Nephroblastome	Regelmäßig bei bestimmten Risikofaktoren
Lymphome	Hodgkin-Lymphome, Non-Hodgkin-Lymphome	Regelmäßig bei bestimmten Risikofaktoren
Leukämien	Akute myeloische Leukämie (AML), Akute lymphatische Leukämie (ALL)	Selten
Andere, seltene	Nasopharynx-Karzinome, Retinoblastome	Regelmäßig Risikoabhängig

kliniken und, je nach Komplexität der Fälle, auch anderer Fachabteilungen (zum Beispiel Kinder-Endokrinologie, Neurologie, Neurochirurgie, Neuropädiatrie, Radiologie, HNO oder Ophthalmologie) erforderlich. Dabei werden die jeweiligen Behandlungskonzepte mit den Studienzentralen der „Deutschen Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie“ (GPOH) und Experten der „International Society of Paediatric Oncology“ (SIOP) sowie mit den betreuenden heimatnahen pädiatrischen Onkologen und innerhalb interdisziplinärer Tumorboards abgestimmt. Auch bei Kindern beträgt die Therapiedauer, in Abhängigkeit der Gesamtdosis und des Fraktionierungskonzeptes, in der Regel 5-7 Wochen. Die Bestrahlung erfolgt meist ambulant, einmal täglich an 5 Tagen die Woche mit Einzeldosen in Höhe von 1,6–1,8 Gy. Sowohl in der Vorbereitung auf die Strahlentherapie als auch während und nach der Strahlentherapie benötigen Kinder besonders viel Aufmerksamkeit und Zuwendung. In Abhängigkeit vom Alter des Kindes kann es daher vorteilhaft sein, das Kind schon in die Vorbereitungsgespräche mit einzubeziehen. So kann das Kind bereits frühzeitig und behutsam auf die Bestrahlungsplanung und -Durchführung vorbereitet werden, um einen möglichst stressfreien Behandlungsablauf für Kind und Behandler sicherzustellen. Für die Bestrahlungsplanung und die einzelnen Bestrahlungssitzungen ist es von großer Wichtigkeit, dass der Patient jedes Mal exakt die gleiche, reproduzierbare Position einnimmt. Hierbei unterstützen verschiedene Lagerungs- und Immobilisierungshilfen, wie Masken, Kopfhaltungen, Vakuumkissen oder Knierollen (Abbildung 2).

Schon eine geringe Bewegung des Kindes kann die modernsten Strahlentherapietechniken zur Schonung der vitalen, normalen Gewebefunktion untergraben und die therapeutische Wirksamkeit beeinträchtigen. Für sehr junge Kinder ist es allerdings oftmals schwer, über die gesamte Dauer bei Planungs-CT/-MRT sowie bei den täglichen Bestrahlungssitzungen einschließlich der Lagekontrollen still zu liegen. In diesen Fällen ist eine anästhesiologische Begleitung erforderlich, um eine sichere und präzise Bestrahlungsdurchführung zu gewährleisten. Diese Anästhesien werden meist von ei-



Abbildung 2: Kind im Bestrahlungsraum vor der Behandlung.

nem sehr erfahrenen, speziell ausgebildeten Anästhesieteam durchgeführt.

Bei älteren Kindern (älter als 5-6 Jahre) ist es zwar möglich, die Strahlentherapie auch ohne Sedierung durchzuführen, stellt die Kinder aber oftmals vor große Herausforderungen. Hier kann eine entsprechende psychosoziale Begleitung zur Vorbereitung und im gesamten Verlauf der Strahlentherapie unterstützend wirken. Mit Zeit und einem hohen Maß an Einfühlungsvermögen kann die Compliance der kleinen Patienten erheblich gefördert und die Angst vor der Behandlungsprozedur genommen werden.

Fazit für die Praxis

Die Anwendung der Strahlentherapie bei Kindern ist für viele solide Tumoren Bestandteil des multimodalen Therapiekonzeptes. Durch die Entwicklung innovativer Strahlentherapietechniken, die Optimierung der Bildgebung sowie von risikoadaptierten Therapiekonzepten sind die Überlebensraten von jungen Patienten mit Krebserkrankungen in den letzten Jahrzehnten deutlich angestiegen. Es ist davon auszugehen, dass moderne, konformale Bestrahlungstechniken wie die Protonentherapie in Zukunft verstärkt zur Behandlung von Kindern eingesetzt werden, hohe Tumorkontrollraten erreichen und gleichzeitig das Risiko für Nebenwirkungen verringern. Zur

Stärkung der Evidenz, auch in Bezug auf Wirkung und Spätfolgen der Strahlentherapie, bedarf es einer prospektiven und multiinstitutionellen Datensammlung im Rahmen von Studien und Registern.

Die Bestrahlungsplanung und -durchführung ist besonders bei sehr kleinen Kindern höchst anspruchsvoll und sollte nur in erfahrenen Zentren mit entsprechender interdisziplinärer Infrastruktur und Expertise durchgeführt werden.

Literatur bei den Verfasserinnen

Korrespondenzanschrift:

Prof. Dr. med. Beate Timmermann
Klinik für Partikeltherapie
Universitätsklinikum Essen
Westdeutsches Protonentherapiezentrum
Essen
Hufelandstr. 55, 45147 Essen
E-Mail: beate.timmermann@uk-essen.de

Dr. Stefanie Schulze Schleithoff
E-Mail: stefanie.schulze-schleithoff@uk-essen.de

Theresa Steinmeier
E-Mail: theresa.steinmeier@uk-essen.de

Interessenkonflikt:

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt vorliegt.

Red.: Huppertz