



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn
<http://www.ssk.de>

CT-Expositionen im Kindesalter und Krebserkrankungen

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 341. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02./ 03. Februar 2026

Vorwort

Zur Fragestellung des Zusammenhangs zwischen einer diagnostischen Computertomografie (CT)-Exposition in der Kindheit und einer Krebsentstehung im späteren Leben sind in den letzten Jahren Ergebnisse großangelegter Studien veröffentlicht worden. Dazu zählen die europäische EPI-CT Studie (European Epidemiological Study to Quantify Risks for Paediatric Computerized Tomography) und die RIC-Studie (Risk of Pediatric and Adolescent Cancer Associated with Medical Imaging) aus den USA und Kanada. Dies nahm das Bundesumweltministerium zum Anlass, die Strahlenschutzkommission (SSK) mit der Bewertung der aktuellen wissenschaftlichen Evidenz zu beauftragen. Insbesondere sollten die Evidenz für einen ursächlichen Zusammenhang zwischen einer CT-Exposition in der Kindheit und einer späteren Krebsentstehung in Abhängigkeit von der Höhe der Exposition untersucht, Trends bei der Anwendung von CT-Untersuchungen an Kindern in Deutschland analysiert und mögliche risikobehaftete Personengruppen identifiziert werden.

Um die aktuelle wissenschaftliche Evidenz zu bewerten und die oben skizzierten Fragestellungen zu untersuchen, wurde die Arbeitsgruppe „CT-Expositionen im Kindesalter und Krebserkrankungen“ des Ausschusses „Strahlenrisiken“ der SSK eingesetzt, der die folgenden Mitglieder angehören:

- Herr Prof. Dr. Mentzel
- Herr Dr. Deng
- Frau Gill, M. Sc.
- Frau Prof. Dr. Klein
- Frau Prof. Dr. Renz
- Herr Prof. Dr. Dr. Sorantin
- Herr Dr. Stamm
- Herr Prof. Dr. Wollschläger

Des Weiteren wurde die Arbeitsgruppe durch Herrn Prof. Dr. Hauptmann (Medizinische Hochschule Brandenburg Theodor Fontane, Sachverständiger der Arbeitsgruppe) unterstützt. Die SSK dankt dem BfS für die Bereitstellung umfangreicher Fachinformationen und fachlicher Unterstützung.

*Prof. Dr.
Hans-Joachim Mentzel*
Vorsitzender der Arbeits-
gruppe „CT-Expositionen im
Kindesalter und Krebser-
krankungen“

*Prof. Dr.
Daniel Wollschläger*
Vorsitzender des
Ausschusses
„Strahlenrisiko“

*Prof. Dr.
Ursula Nestle*
Vorsitzende der
Strahlenschutzkommission

INHALT

1	Einleitung.....	4
2	Empfehlungen	7
3	Wissenschaftliche Begründung	8
3.1	Ursächlicher Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Hirntumoren sowie hämato-onkologischen Erkrankungen	9
3.1.1	Fragestellung.....	9
3.1.2	Literaturrecherche	9
3.1.3	Studien	10
3.1.3.1	Nicht berücksichtigte Studien.....	10
3.1.3.2	Vorstellung detailliert berücksichtigter Studien.....	11
3.1.4	Ergebnisse	13
3.1.5	Methodische Bewertung der berücksichtigten CT-Studien.....	18
3.1.5.1	Studiendesign.....	18
3.1.5.2	Erfassung der Exposition.....	18
3.1.5.3	Definition und Erfassung der Gesundheitsendpunkte	20
3.1.5.4	Confounding	21
3.1.5.5	Exclusion Period.....	23
3.1.5.6	Latenzperiode.....	23
3.1.5.7	Statistische Auswertung	24
3.1.5.8	Messunsicherheit.....	24
3.1.6	Zusammenfassung	25
3.2	Trend bei der Anwendung von CT in Bezug zu Alter und Geschlecht	26
3.2.1	Indikation von CT-Anwendungen.....	26
3.2.2	Häufigkeit von CT-Anwendungen	29
3.2.3	Dosis bei CT-Anwendungen	32
3.3	Beurteilung risikobehafteter Gruppen	35
3.3.1	Kinder und Jugendliche im Vergleich zu Erwachsenen.....	35
3.3.2	Feten, Neugeborene und Säuglinge in Bezug zu Gewicht und Schwangerschaftswoche	37
3.3.2.1	Feten	37
3.3.2.2	Dosis beim Fetus.....	38
3.3.2.3	Früh- und Neugeborene in Bezug zu Gewicht und Schwangerschaftswoche	39
3.3.3	Kinder mit Keimbahnmutation/TPS.....	41
	Literatur	46
	Abkürzungen	72
	Begriffserklärungen	74

1 Einleitung

Das Bundesumweltministerium (BMUV, jetzt BMUKN) beauftragte die Strahlenschutzkommission (SSK) am 21. Juni 2023, sich mit dem Zusammenhang von Computertomografie (CT)-Expositionen im Kindesalter und Krebserkrankungen (Malignomen) zu befassen. Dabei sollen „aktuelle Studien zu Krebserkrankungen/Leukämien nach medizinischer Strahlenexposition mit niedrigen Dosen im Kindesalter, wie beispielsweise der EPI-CT-Studie (The European Epidemiological Study to Quantify Risks for Paediatric Computerized Tomography)“ (Hauptmann et al. 2023, Bosch de Basea Gomez et al. 2023) bewertet und folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie stark ist die Evidenz für einen ursächlichen Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition und der späteren Erkrankung in Abhängigkeit von der Höhe der Exposition?
- Gibt es einen Trend bei der Anwendung von CT an Kindern in Deutschland?
- Ergeben sich aus der Studienlage Hinweise auf besonders risikobehaftete Personengruppen oder Anwendungsbereiche?
- Ergibt sich aus Sicht der SSK aus diesen Erkenntnissen Handlungsbedarf für das BMUV (jetzt BMUKN) und – wenn ja – in welcher Form?

Das Lebenszeitrisiko, an einem Malignom zu erkranken, beträgt in Deutschland ca. 45 % für Frauen und 52 % für Männer (RKI und GEKID 2023). Dabei steigt das Risiko für maligne Erkrankungen ab einem Alter von ca. zehn Jahren mit zunehmendem Alter zunächst leicht an, bevor es ab einem Alter von etwa 40 bis 50 Jahren beschleunigt zunimmt. Weniger als 1 % der malignen Neuerkrankungen in Deutschland entfallen auf den Altersbereich unter 18 Jahren. Bei Kindern und Jugendlichen in diesem Alter treten ca. 2 290 inzidente Fälle pro Jahr in Deutschland auf. Mit jährlich ca. 17 Fällen pro 100 000 Kindern und Jugendlichen sind Malignome damit für diese Altersgruppe relativ seltene Erkrankungen (Ronckers et al. 2025).

Das mit dem Alter stark steigende Risiko für maligne Erkrankungen korrespondiert allgemein damit, dass im Laufe des Menschenlebens die Zahl genetischer Mutationen zunimmt und gleichzeitig die Fähigkeit zur Tumorabwehr abnimmt. Generell haben Krebserkrankungen bei Erwachsenen vielfältige Ursachen. Zum Krebsrisiko trägt eine Kombination aus individueller Genetik, Umweltexpositionen und Lebensweise bei (Cooper 2000, Jassim et al. 2023). Diese Faktoren können die Entstehung maligner Zellpopulationen und deren unkontrolliertes Wachstum beeinflussen. Die Ursachen für Krebsentstehung bei Kindern sind meist unklar. So können bekannte Risikofaktoren (genetische Faktoren und Umweltexpositionen) nur ca. 10 % der inzidenten Fälle erklären (Erdmann et al. 2019, Schüz und Erdmann 2016).

Zu den von der Internationalen Agentur für Krebsforschung der WHO (IARC) als gesichert eingestuften Risikofaktoren für Malignome zählt ionisierende Strahlung (IARC 2000). Die im Wesentlichen auf ICRP (International Commission on Radiological Protection)-Veröffentlichung 103 basierenden Regularien im Strahlenschutz gründen sich auf dem Linear-No-Threshold Modell (LNT-Modell), anhand dessen der Zusammenhang des Krebsrisikos mit der Strahlendosis abgeschätzt wird. Für die Strahlenexposition von Menschen in vivo liegt international als gesichert betrachtete Evidenz für einen proportionalen Zusammenhang von Dosis und Risiko im Bereich von ca. 100 mGy bis 1 Gy vor (IAEA 2023). Das LNT-Modell nimmt für Zwecke des Strahlenschutzes an, dass sich dieser Zusammenhang linear auf niedrigere Dosiswerte extrapolieren lässt und keine Wirkungsschwelle existiert.

Das wissenschaftliche Komitee der Vereinten Nationen zu den Effekten von atomarer Strahlung, UNSCEAR, bewertet das allgemeine Risiko für Krebsentstehung nach Exposition

im Kindes- und Jugendalter als höher im Vergleich zu exponierten Erwachsenen, wobei potenziell strahleninduzierte Tumorerkrankungen innerhalb weniger Jahre bis zu vielen Dekaden nach der Exposition auftreten können. Allerdings zeigt sich diese erhöhte Strahlensensitivität nur für einen Teil der Tumorentitäten, darunter Leukämien und Erkrankungen der Schilddrüse, der Brust, der Haut und des Gehirns (UNSCEAR 2013).

Sowohl bildgebende Diagnostik als auch interventionelle Prozeduren sind auch bei Kindern und Jugendlichen oft auf den Einsatz von ionisierender Strahlung angewiesen, wobei die Organdosis bei einzelnen Untersuchungen in aller Regel deutlich unter 100 mGy liegt. Inwiefern auch die durch röntgendiagnostische Anwendungen bei Kindern und Jugendlichen verursachte Strahlendosis tatsächlich deren späteres Krebsrisiko erhöht, ist umstritten. Die bislang verfügbare epidemiologische Evidenz erlaubt keine sichere Charakterisierung der Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Strahlendosen unter etwa 50 mGy und dem Krebsrisiko. Deren Verlauf wird daher aktuell aus dem Bereich höherer Dosen mit vorhandener empirischer Evidenz linear nach unten extrapoliert. Für eine Einschätzung des tatsächlichen zusätzlichen Krebsrisikos für zu behandelnde Personen aufgrund röntgendiagnostischer Anwendungen ist diese Extrapolation nur begrenzt aussagekräftig.

Aus anderen Studien abgeleitete Dosis-Wirkungs-Beziehungen werden benutzt, um die Anzahl der durch CT-Strahlung verursachten Krebsfälle zu schätzen. Berrington de Gonzalez et al. (2009) und Smith-Bindman et al. (2025b) benutzten zum Beispiel das Modell des Komitees zu „Biological Effects of Ionizing Radiation VII“ des National Research Council (Council 2006). Dieses Modell stützt sich wesentlich auf die Ergebnisse der Life Span Study (LSS)¹ unter Überlebenden der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki. Smith-Bindman et al. (2025b) schätzen anhand von Daten zur Häufigkeit und zur Dosis von CT-Untersuchungen aus einem kalifornischen CT-Dosis-Register (University of California San Francisco International CT Dose Registry), dass durch die Strahlung von 93 000 000 CT-Untersuchungen bei 61 510 000 zu behandelnden Personen (Kinder und Erwachsene) in den USA im Jahr 2023 bis zu deren Tod etwa 103 000 Krebsfälle verursacht werden. Für 3 069 000 CT-Untersuchungen an Kindern im Jahr 2023 rechnet das Autorenteam mit etwa 9 700 später verursachten Krebsfällen. Das Autorenteam folgert aus seiner Untersuchung, dass etwa 5 % aller jährlich neu diagnostizierten Krebsfälle in den USA durch CT-Strahlung verursacht sein könnten. Methodisch wird die Registerstudie aufgrund der verwendeten Risikomodelle und bestehender Unsicherheiten kritisch gesehen. CT-Untersuchungen werden insbesondere bei älteren und schwer erkrankten Patienten durchgeführt, die Abschätzung erfolgte aber für die gesamte Bevölkerung. Die Häufigkeit der CT-Anwendungen pro Einwohner ist in den USA wesentlich höher als in Deutschland. Für Kinder sind die Schätzungen der Studie außerdem nicht auf Deutschland zu übertragen, da die Indikation hier aufgrund der Strahlenschutzgesetzgebung sehr streng gestellt wird. So liegt der Anteil von CT-Untersuchungen bei Kindern in den USA bei 4,2 %, in Deutschland bei unter 1 %. Für Details wird auf die Stellungnahme des Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) verwiesen (BfS 2025).

Hinsichtlich der CT-Methodik ist zu beachten, dass aufgrund der Größenverhältnisse von Schädel und Körperstamm insbesondere bei Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern der cranialen CT (cCT) eine besondere Bedeutung zukommt, da hier in großem Umfang blutbildendes – und somit strahlensensibles – Knochenmark exponiert wird. Auch bei röntgendiagnostischen Anwendungen am Körperstamm ist im Vergleich zum peripheren Skelett die

¹ Die Life Span Study ist ein Forschungsprogramm der Radiation Effects Research Foundation (RERF), siehe https://www.rerf.or.jp/en/programs/research_activities_e/outline_e/proglss-en/

höhere Strahlensensibilität aufgrund des höheren Anteils von blutbildendem Mark zu berücksichtigen. Verglichen mit Erwachsenen ist bei Kindern auch im peripheren Skelett ein höherer Anteil an blutbildendem Mark vorhanden.

Eine zuverlässige Abschätzung des Krebsrisikos nach diagnostischer Strahlenexposition mit CT im Kindes- und Jugendalter mit Hilfe epidemiologischer Studien ist schwierig. Zu den Gründen zählen die niedrige Grundrate von Malignomen bis zum mittleren Erwachsenenalter, die relativ seltene Anwendung von CT-Untersuchungen in der Kindheit sowie die notwendigen langen Beobachtungszeiträume aufgrund der teils mehrjährigen Latenz einer Krebsentstehung, insbesondere bei soliden Tumoren. Eine besondere methodische Herausforderung bei diesen Studien liegt an der Möglichkeit systematischer Verzerrungen, weil CT-Untersuchungen zur Erstdiagnose bei Verdacht auf bestehende solide Tumoren gehören. Krebserkrankungen, die nach einer CT-Untersuchung diagnostiziert werden, können sich daher bereits vor der Untersuchung entwickelt haben. Eine erhöhte Erkrankungsrate nach CT-Untersuchungen belegt für sich genommen damit noch nicht, dass die diagnostische Strahlenexposition die Erkrankung ausgelöst hat. Zu dieser Fragestellung durchgeführte epidemiologische Studien wurden vor dem Hintergrund möglicher Verzerrungen Mitte der 2010er Jahre teils kritisch bewertet (Boice 2015, Walsh et al. 2014).

Seither hat sich vor allem durch die Veröffentlichung von Ergebnissen aus der europäischen EPI-CT-Studie und der amerikanisch-kanadischen RIC (Risk of Pediatric and Adolescent Cancer Associated with Medical Imaging) -Studie (Smith-Bindman et al. 2025a) die vorliegende epidemiologische Evidenz zum Ausmaß des durch diagnostische CT-Exposition in Kindheit und Jugend verursachten Krebsrisikos im späteren Leben verändert. Ein Ziel dieser Studien und begleitender Untersuchungen war es, das Strahlenrisiko genau und unverzerrt durch methodische Störeinflüsse schätzen zu können.

Parallel zur Veröffentlichung strahlenepidemiologischer Evidenz haben technische Weiterentwicklungen in der Radiologie in den letzten Jahren dazu geführt, dass die Einzeldosis für eine Untersuchung erheblich reduziert werden konnte. Zudem haben sich durch Entwicklungen in der radiologischen Diagnostik ohne ionisierende Strahlung Veränderungen in der Indikationsstellung für CT-Untersuchungen ergeben. Die SSK-Empfehlung „Bildgebende Diagnostik bei Kindern“ (SSK 2022) hat dieses Thema zum Gegenstand.

Zusammengenommen ergibt sich aus der veränderten wissenschaftlichen Lage in der Epidemiologie und Entwicklungen in der radiologischen Diagnostik die Notwendigkeit, das Strahlenrisiko durch CT-Untersuchungen in Kindheit und Jugend neu zu bewerten.

2 Empfehlungen

Die aktuellen epidemiologischen CT-Studien zeigen, dass ein konsistenter Dosis-Wirkungs-Zusammenhang zwischen CT-Untersuchungen im Kindesalter und dem Risiko für maligne Hirntumoren sowie für hämato-onkologische Erkrankungen im späteren Leben besteht. Für maligne Hirntumoren wurde dieser Zusammenhang statistisch signifikant ab einer Hirndosis von ca. 50 mGy demonstriert, für Leukämien und Lymphome ab einer Knochenmarksdosis von ca. 25 mGy.

Anhand der Ergebnisse dieser Studien und ausgehend von etwa 150 000 CT-Untersuchungen bei Kindern pro Jahr in Deutschland lässt sich abschätzen, dass eine niedrige bis mittlere zweistellige Anzahl dieser Kinder als Folge der Strahlenexposition bei ihrer CT-Untersuchung später im Leben an Krebs erkranken könnten. Der diesem geschätzten Risiko gegenüberstehende medizinische Nutzen der CT-Untersuchungen wurde in den betrachteten Studien nicht quantifiziert.

Die SSK empfiehlt:

- Die Anwendung der Computertomografie (CT) bei Kindern und Jugendlichen bedarf einer strengen Indikationsstellung und der Erwägung von Alternativverfahren ohne ionisierende Strahlung, wobei die aktuelle Version der „Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren“ der Strahlenschutzkommission zu berücksichtigen ist. Bei besonders vulnerablen Gruppen (z.B. bei Tumorprädispositionssyndromen, TPS) ist das erhöhte Risiko zu beachten.
- Radiologische Einrichtungen, in denen Kinder und Jugendliche untersucht werden, sollen regelmäßig aktualisierte Standard Operating Procedures (SOPs) für CT-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen für verschiedene Parameter (Alter, Gewicht, Sagittaldurchmesser) vorhalten und anwenden.
- Der aus strahlenhygienischen Gründen notwendige Mehrbedarf an alternativen Untersuchungsverfahren (z. B. an Magnetresonanztomografien (MRT)) bei Kindern und Jugendlichen sowie die damit verbundenen Kosten für Personal und der höhere Zeitbedarf sollen bei der wirtschaftlichen Kalkulation von Gesundheitseinrichtungen berücksichtigt werden.
- Aufgrund der Risiken und größeren Empfindlichkeit von Kindern gegenüber ionisierender Strahlung und der oftmals individuellen Fragestellung sollten geplante CT-Untersuchungen in spezialisierten Einrichtungen für Kinder- und Jugendlradiologie durchgeführt werden.
- Alle medizinischen Anwendungen ionisierender Strahlung sollten inklusive dosisrelevanter Parameter registriert werden – etwa im Rahmen der elektronischen Patientenakte oder als eigenständiges nationales Dosisregister (vgl. ACR Dose Index Registry (<https://www.acr.org/Practice-Management-Quality-Informatics/Registries/Dose-Index-Registry>)).
- Gerätehersteller sollten verpflichtet werden, in den Dosisberichten künftig Angaben zum Size Specific Dose Estimate (SSDE) aufzunehmen und den Betreibern von CT-Anlagen für häufig durchgeführte Computertomographien bei Kindern und Jugendlichen entsprechende, differenzierte Protokolle zu übergeben sowie das technische Personal in der Anwendung zu schulen.

3 Wissenschaftliche Begründung

Der Beratungsauftrag an die SSK wurde zu einem Zeitpunkt erteilt, zu dem aus großen epidemiologischen Studien neue Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Computertomografie (CT) im Kindesalter und dem Krebsrisiko publiziert wurden. Dem waren bereits zum Anfang des 21. Jahrhunderts erste, große Studien zum prognostizierten oder beobachteten Krebsrisiko durch CT vorausgegangen (Brenner et al. 2001, Pearce et al. 2012b). Gleichzeitig stehen der pädiatrischen Radiologie innovative technische Entwicklungen zur Verfügung, die zur Senkung der Strahlenexposition der untersuchten Kinder beitragen können. Dazu zählen das Photon-Counting-CT, Zusatzfilter, iterative Rekonstruktionsalgorithmen sowie die Nutzung künstlicher Intelligenz (Mese et al. 2024). Aber auch das Angebot an CT-Geräten wird größer, verbunden mit zu erwartenden Unterschieden bezogen auf das Dosisaufkommen in der pädiatrischen CT. So ist die CT-Dosisexposition in spezialisierten Einrichtungen für Kinder- und Jugendradiologie signifikant niedriger als in allgemeinradiologischen diagnostischen Abteilungen (Strauss et al. 2019). Entscheidend für die Dosisreduktion sind neben strenger Indikationsstellung u. a. differenzierte, kindgerechte Untersuchungsprotokolle, die kostenneutral und rasch umgesetzt werden können sowie der alternative Einsatz bildgebender Verfahren ohne ionisierende Strahlung. Dies wird generell in den Empfehlungen der SSK berücksichtigt (SSK 2022).

Kernpunkt dieser Empfehlung ist der Zusammenhang zwischen CT-Untersuchungen im Kindesalter und einer Krebsentstehung im späteren Leben. Das durch ionisierende Strahlung bedingte Krebsrisiko ist kumulativ und abhängig vom Alter, in dem die Exposition stattfindet. Es ist davon auszugehen, dass Kinder stärker von den Folgen einer Strahlenexposition betroffen sind als Erwachsene. Zum einen weisen Kinder für eine Reihe von Krebserkrankungen ein höheres Strahlenrisiko als Erwachsene auf (UNSCEAR 2013). Zum anderen kommt hinzu, dass Kinder eine höhere verbleibende Lebenserwartung als Erwachsene besitzen, wodurch ein größeres Zeitfenster für die Entwicklung einer Krebserkrankung besteht. Kinder können ferner einer höheren Strahlendosis als nötig ausgesetzt sein, wenn die CT-Einstellungen nicht an ihre geringere Körpergröße im Vergleich zum Erwachsenen Referenzkörper angepasst sind.

Krebserkrankungen im Kindesalter sind selten (Steliarova-Foucher et al. 2017). So wurde aus den Jahren 2012 bis 2021 in Deutschland eine mittlere Anzahl von jährlich 2 290 Neuerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen unter 18 Jahren ermittelt, was ca. 0,5 % der Gesamtzahl an inzidenten Krebsfällen entspricht. Am häufigsten waren Leukämien mit 29,2 %, gefolgt von Tumoren des Zentralnervensystems (24 %), Lymphomen (15,8 %), Weichteilsarkomen (5,4 %), peripheren Nervenzelltumoren (5,4 %) und Knochentumoren (5 %). Andere Krebsarten nehmen nach dem Deutschen Kinderkrebsregister in Summe ca. 15 % der Malignome ein (Ronckers et al. 2025).

Zunehmend werden kausale Zusammenhänge mit genetischen Faktoren und Umweltexpositionen bekannt. Schätzungen zufolge werden etwa 8 % der Krebserkrankungen bei Kindern und Jugendlichen durch genetische Veränderungen verursacht (Gröbner et al. 2018, Zhang et al. 2015). So können Tumorprädispositionssyndrome (TPS) nicht nur per se das Entstehen maligner Erkrankungen begünstigen, sondern auch die Anfälligkeit junger Menschen für die Entwicklung von Krebserkrankungen infolge einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung erhöhen. Dies bedeutet, dass Kinder und Jugendliche mit malignen Erkrankungen auch für strahleninduzierte Zweitmalignome prädisponiert sein können (Porter 2016, Bochtler et al. 2018). Dieses zusätzliche Risiko einer malignen Erkrankung besteht Jahre bis Jahrzehnte nach der eigentlichen Exposition. Bei Kindern und Jugendlichen mit Krebserkrankungen infolge von TPS sind Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren unausweichlich (Lindor et al. 2008,

Glutig et al. 2021). Somit ist bei der Auswahl der bildgebenden Verfahren für diese Personengruppen die erhöhte Strahlenempfindlichkeit zwingend zu berücksichtigen.

Die nachfolgenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zu CT-Anwendungen im Kindes- und Jugendalter basieren auf einer strukturierten und geplanten Literaturrecherche nach dem PECO-Schema (P – Population, E – Exposure, C – Comparator, O – Outcome) (Morgan et al. 2018), auf Datenerhebungen des Statistischen Bundesamtes (z. B. fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik) und des BfS. Zur Frage nach den Indikationen für CT-Untersuchungen im Kindes- und Jugendalter wurden einschlägige nationale und internationale Leitlinien mit entsprechender Stichwortsuche analysiert und exemplarisch aufgeführt. Ein Anspruch auf eine vollständige Berücksichtigung aller Leitlinien, die eine CT-Untersuchung bei Kindern beinhalten, besteht nicht. Zur Beurteilung von Personengruppen des Kindes- und Jugendalters mit als unterschiedlich eingestuftem Risiko für eine Malignomentstehung (z. B. Personen mit TPS) wurde Literatur ab dem Jahr 2000 evaluiert. Mit Hilfe von Suchmaschinen (PubMed, Cochrane Library, Scopus) wurde u. a. zu den Stichwörtern „computed tomography, low dose, ionising radiation, preterm, newborn, infants, children, adolescents“ gesucht, bei „cancer predisposition syndrome, cancer susceptibility syndrome“ wurden diese zudem einzeln berücksichtigt (z. B. „ataxia teleangiectasia, Nijmegen breakage syndrome, heritable retinoblastoma, neurofibromatosis type I“). Vorteilhaft war die wechselseitige Information und Zusammenarbeit mit der Task Force „CT & Dose“ der European Society of Paediatric Radiology (ESPR) (<https://www.espr.org/taskforces/ct-dose/>).

3.1 Ursächlicher Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Hirntumoren sowie hämato-onkologischen Erkrankungen

3.1.1 Fragestellung

In diesem Kapitel werden bisher veröffentlichte Studien beschrieben, die den Zusammenhang zwischen diagnostischer Strahlenexposition im Rahmen von CT-Untersuchungen im Kindes- und Jugendalter und einem späteren Risiko an Krebs zu erkranken analysieren. Es wird untersucht, inwieweit die Evidenz eine kausale Assoziation nahelegt, z. B. indem eine Dosis-Wirkungs-Beziehung gezeigt wird (Hill 1965). Da die meisten Studien sich mit Tumoren des Gehirns und/oder hämato-onkologischen Erkrankungen befassen, werden andere Endpunkte hier nicht dargestellt.

3.1.2 Literaturrecherche

Relevante Literatur wurde auf zwei Arten identifiziert. Zunächst wurde im Juli 2024 eine Suche in PubMed durchgeführt und im Dezember 2025 wiederholt. Dabei wurde derselbe Suchterm verwendet wie im von (Cao et al. 2022) publizierten systematischen Review zum Zusammenhang zwischen CT-Exposition und Krebsrisiko:

```
((Pediatric[Title/Abstract]) OR (Child[Title/Abstract]) OR
(Adolescent[Title/Abstract]) OR (Adolescent[MeSH]) OR (Child[MeSH]) OR
(Infant[MeSH]) OR (“Young Adult”[MeSH])) AND ((“Tomography, X-Ray
Computed”[MeSH]) OR (CT[Title/Abstract]) OR (“Computed
Tomography”[Title/Abstract]) OR (“Computerized Tomography”[Title/Abstract]) OR
(“Computerised Tomography”[Title/Abstract]) OR (“Radiation Exposure”[MeSH]))
AND (“Neoplasms, Radiation-Induced”[MeSH]) AND (2012/1/1:3000/12/12[pdat])
NOT (“Animals”[MeSH]) NOT “Humans”[MeSH])
```

Außerdem wurde Snowballing (auch: Reference Tracking) (Badampudi et al. 2015) mit den Tools: <https://tera-tools.com/> und <https://estech.shinyapps.io/citationchaser/> durchgeführt.

Beim Snowballing werden für eine Liste von Indexpublikationen alle Artikel identifiziert, die von Indexartikeln zitiert werden oder einen solchen zitieren.

Folgende Indexpublikationen wurden benutzt:

- Abalo KD, et al. Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol*. 2021 Jan;51(1):45-56. Epub 2020 Sep 10. <https://doi.org/10.1007/s00247-020-04803-0> (Erratum in: *Pediatr Radiol*. 2020 Oct 22; PMID: 32910229.)
- Berrington de Gonzales A, et al. Epidemiological studies of CT scans and cancer risk: the state of the science. *Br J Radiol* 2021; 95(1135): 20210471. <https://doi.org/10.1259/bjr.20210471>
- Bosch de Basea M, et al. Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults. *Nature Medicine* 2023; 29: 3111-3119. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02620-0>
- Daniels RD, et al. Strengths and Weaknesses of Dosimetry Used in Studies of Low-Dose Radiation Exposure and Cancer. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56): <https://doi.org/10.1093/jncimonographs/lgaa004>
- Foucault A, et al. Childhood cancer risks estimates following CT scans: an update of the French CT cohort study. *Eur Radiol* 2022; 32, 5491–5498. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08602-z>
- Hauptmann M, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56): 188-200. <https://doi.org/10.1093/jncimonographs/lgaa010>
- Hauptmann M, et al. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. *Lancet Oncol* 2022. 24: 45-53. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(22\)00655-6](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(22)00655-6)
- NCRP. Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear Nonthreshold Model and Radiation Protection, Commentary No. 27. 2018. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements.
- Shao YH, et al. Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks. *JNCI Cancer Spectr* 2020; 4(1): pkz072. <https://doi.org/10.1093/jncics/pkz072> (Adults)
- Thierry-Chef I, et al. Dose estimation for the European Epidemiological Study on Pediatric Computed Tomography (EPI-CT). *Radiat Res* 2021; 196: 74-99. <https://doi.org/10.1667/RADE-20-00231.1>
- Smoll NR, et al. Computed tomography scan radiation and brain cancer incidence. *Neuro-Oncology* 2023; 25(7): 1368-1376. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noad012>

3.1.3 Studien

Eingeschlossen in die folgende Übersicht wurden epidemiologische Längsschnittstudien, bei denen die Exposition aus ionisierender Strahlung durch CT-Untersuchungen während des Kindes- und Jugendalters bestand, jedem Studienteilnehmenden pro CT-Untersuchung eine Organdosis für den jeweiligen Endpunkt zugewiesen wurde, Risiken empirisch beobachtet und dosisabhängige Risikoschätzer präsentiert wurden.

3.1.3.1 Nicht berücksichtigte Studien

Nicht berücksichtigt wurden Studien, die keine individuelle Organdosis benutzten oder nur externe Vergleiche mit der Allgemeinbevölkerung durchführten (z. B. Huang et al. 2014, Kojimahara et al. 2020 und Wang et al. 2023).

Auch eine retrospektive koreanische Kohortenstudie (Han et al. 2025) mit 1,38 Millionen CT-exponierten Kindern wurde nicht detailliert berücksichtigt. Trotz durchgeführter individueller Dosimetrie und einem internen Dosis-Wirkungs-Vergleich für verschiedene Krebserkrankungen erlaubt diese Studie keinen direkten Bezug auf eine Organdosis für geschätzte relative Risiken. Zum einen wurden relative Risiken nur bezogen auf eine Standardabweichung der Dosisverteilung berichtet. Zum anderen wurden in Tabellen lediglich CTDI_{vol} Werte für ein Referenzphantom, nicht jedoch für die individuelle Patientenanatomie geschätzte Organdosen aufgeführt.

Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden sogenannte Projektionsstudien. Diese untersuchen nicht in einer eigenen Studie, ob es einen Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition durch CT und dem später beobachteten Krebsrisiko gibt. Stattdessen wenden sie aus früheren Studien abgeleitete Risikomodelle auf die erhobene Strahlenexposition durch CT in einer Bevölkerungsgruppe an, um für diese Gruppe die Anzahl der erwarteten zusätzlich verursachten Krebsfälle vorherzusagen. Zwei Beispiele sind die Studien von Berrington de Gonzalez et al. 2009 und Smith-Bindman et al. 2025b, die beide das Risikomodell für Krebs des Komitees zu „Biological Effects of Ionizing Radiation VII“ des National Research Council benutzen. Dieses Modell stützt sich wesentlich auf die Risikoschätzungen unter den Überlebenden der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki (LSS).

3.1.3.2 Vorstellung detailliert berücksichtigter Studien

Im Folgenden werden fünf zentrale Studien detailliert beschrieben. 1) Die EPI-CT-Studie (Hauptmann et al. 2023, Bosch de Basea Gomez et al. 2023) ist eine gepoolte Studie mehrerer europäischer Kohortenstudien zu malignen Hirntumoren und hämato-onkologischen Erkrankungen. 2) Die australische Studie (Smoll et al. 2023) ist eine retrospektive Kohortenstudie zu malignen Hirntumoren mit Medicare-Daten. 3)+4) Zwei finnische Studien (Nikkilä et al. 2018, Abuhamed et al. 2025) sind registerbasierte Fall-Kontroll-Studien zur Kinderleukämie und zu (malignen und nicht-malignen) Hirntumoren nach demselben Design. 5) Die retrospektive RIC-Studie (Smith-Bindman et al. 2025a, Kwan et al. 2022) untersucht eine Kohorte von ab Geburt bis zum 21. Lebensjahr beobachteten Kindern in den USA und Ontario (Kanada) und berichtet bisher Risiken für hämato-onkologische Erkrankungen.

1) EPI-CT

Die EPI-CT-Studie basiert auf Einzelstudien nach vergleichbarem Design in neun europäischen Ländern (Bosch de Basea et al. 2015). Die Ergebnisse der Einzelstudien wurden teils separat veröffentlicht, werden aber hier zugunsten der Gesamtauswertung nicht weiter berücksichtigt.

Durch Kontaktierung von Krankenhäusern wurden Kohorten von insgesamt 948 174 Patientinnen und Patienten aufgestellt, die im Zeitraum 1977 bis 2014 mindestens eine CT-Untersuchung vor Erreichen des 18. Lebensjahres erhalten hatten. Die so ermittelten Daten wurden mit den jeweiligen Krebsregistern abgeglichen, um Informationen zum späteren Auftreten einer Krebserkrankung zu erhalten.

Für den Endpunkt der Hirntumoren wurden Personen aus der Studie ausgeschlossen, wenn die Nachbeobachtungszeit weniger als 5 Jahre betrug oder in diesem Zeitraum ein bösartiger Hirntumor auftrat. Für die Risikoanalyse berücksichtigt wurden also nur Hirntumoren, die frühestens 5 Jahre nach der ersten CT-Untersuchung auftraten. Diese in Abschnitt 3.1.5.5 sowie 3.1.5.6 näher erläuterten Maßnahmen wurden getroffen, um zu vermeiden, dass Krebserkrankungen fälschlicherweise das geschätzte Strahlenrisiko beeinflussen, die nicht durch die CT-Exposition verursacht worden sein können.

Für den Endpunkt der hämato-onkologischen Erkrankungen wurden Personen mit einer Nachbeobachtungszeit von weniger als zwei Jahren oder mit einer Krebsdiagnose in diesem Zeitraum ausgeschlossen. Die berücksichtigte „Zeit unter Risiko“ begann für die Personen zwei Jahre nach ihrer ersten CT-Untersuchung.

Die Exposition der behandelten Personen wurde durch ein neues Dosimetrie-System geschätzt (Thierry-Chef et al. 2021). Dafür wurden zunächst alle in den einzelnen Studien erhobenen Details von im PACS (Picture Archiving and Communication System) vorliegenden Untersuchungen kombiniert. Mit Hilfe des National Cancer Institute Dosimetrie-System für CT (NCICT) (<https://dceg.cancer.gov/tools/radiation-dosimetry-tools/computed-tomography>, Lee et al. 2022) wurden für jede der aus den PACS-Daten ermittelten Untersuchungen für ca. 30 verschiedene Organe die Organdosen berechnet. Die im PACS dokumentierten Untersuchungen waren dabei nur eine Subgruppe aller CT-Untersuchungen und stammten vorwiegend aus kurz zurückliegenden Jahren. Jeder CT-Untersuchung wurde schließlich eine möglichst gut passende Untersuchung aus der Subgruppe der PACS-Daten zugeordnet, und es wurden deren Organdosen verwendet. Für den Endpunkt „Hirntumore“ wurde die kumulative Dosis um fünf Jahre verzögert berücksichtigt, für die hämato-onkologischen Erkrankungen um zwei Jahre, weil angenommen wird, dass eine Exposition aus biologischen Gründen nicht vorher zu einer klinisch sichtbaren Krebserkrankung führen kann.

2) Australien

Die australische Studie (Smoll et al. 2023) ist eine Kohorte von 10 524 842 australischen Medicare-Teilnehmenden im Alter von 0 bis 19 Jahren im Zeitraum 1985 bis 2005. Von diesen hatten 611 544 mindestens eine CT-Untersuchung vor dem 20. Lebensjahr. Die Kohorte wurde mit dem nationalen Krebs- und Todesregister bis 2012 abgeglichen. Organdosen wurden mit dem NCICT berechnet, unter Zuhilfenahme von Daten über typische technische Gegebenheiten bei spezifischen CT-Untersuchungen. Dazu wurden Daten aus Umfragen, Studienprotokollen, für regulatorische Zwecke genutzten Datenbanken und aus der Literatur herangezogen. Für diese Empfehlung wurde nur die aktualisierte Analyse berücksichtigt und eine frühere Veröffentlichung mit kürzerem Follow-up nicht eingeschlossen (Mathews et al. 2013).

Es wurden nur Krebsdiagnosen berücksichtigt, die später als zwei Jahre nach der ersten CT-Untersuchung gestellt wurden. Weiterhin begann die „Zeit unter Risiko“ zwei Jahre nach der ersten CT-Untersuchung. Die kumulative Dosis wurde in der Dosis-Wirkungs-Analyse um zwei Jahre verzögert verwendet.

3)+4) Finnland

Die finnische Studie zur Leukämie (Nikkilä et al. 2018) identifizierte aus dem finnischen Krebsregister 1093 Fälle von Kinderleukämie (unter 15 Jahren) im Zeitraum 1990 bis 2011, und zu jedem Fall drei Kontrollen, die bzgl. Geschlecht und Geburtsjahr übereinstimmten. Von den zehn größten Krankenhäusern des Landes wurden für diese Personen alle dort durchgeführten CT-Untersuchungen erhoben. In den teilnehmenden Krankenhäusern wurden in den Jahren 1975 bis 2011 schätzungsweise 87 % aller CT-Untersuchungen bei Kindern in Finnland durchgeführt. Für plausible Werte der technischen Einstellungen der CT-Scanner wurden Expertenauskünfte eingeholt. Dabei wurde der Gerätehersteller und soweit bekannt der Gerätetyp berücksichtigt. Auf Basis dieser Annahmen wurden mittels NCICT die individuellen kumulativen Knochenmarksdosen berechnet. Die kumulativen Dosen wurden in der Dosis-Wirkungs-Analyse um zwei Jahre verzögert verwendet. Kinder und Jugendliche mit den folgenden TPS wurden aus der Studie ausgeschlossen, um eine Verzerrung des Strahleneffekts zu vermeiden (Neurofibromatose Typ 1 sowie Typ 2, tuberöse Sklerose, Li-Fraumeni-Syndrom, Nävoid-Basalzell-Karzinom-Syndrom, Turcot-Syndrom, Cowden-Syndrom, Retinoblastoma-Prädisposition, Rubinstein-Taybi-Syndrom).

Die finnische Studie zu malignen und nicht-malignen Hirntumoren (Abuhamed et al. 2025) identifizierte 967 Fälle (unter 15 Jahren) im Zeitraum 1990 bis 2016. Die kumulative Dosis wurde in der Dosis-Wirkungs-Analyse mit einer zeitlichen Verzögerung von fünf Jahren berücksichtigt. Ansonsten folgte die Studie dem Design der Kinderleukämiestudie (Nikkilä et al. 2018).

5) RIC-Studie

Den methodischen Ansatz einer Geburtskohorte wählte die RIC-Studie, die mehr als 3,7 Millionen Neugeborene aus den Jahren 1996 bis 2016 einschloss (Smith-Bindman et al. 2025a). Diese waren in insgesamt sechs US-amerikanischen Gesundheitseinrichtungen, die mit dem medizinischen Versorgungsverbund Kaiser Permanente assoziiert sind, registriert oder Mitglied in der gesetzlichen Krankenkasse für die kanadische Provinz Ontario. Ausgeschlossen waren Kinder mit weniger als sechs Monaten Nachbeobachtungszeit sowie mit einer diagnostizierten Krebserkrankung innerhalb der ersten sechs Lebensmonate. Die Mitglieder der Kohorte wurden bis zu ihrem 21. Lebensjahr, bis zu einer diagnostizierten Krebserkrankung bzw. bis spätestens Ende Dezember 2017 nachverfolgt. Im Mittel betrug die Nachbeobachtungszeit ca. zehn Jahre pro Person und ca. 35,7 Millionen Personenjahre insgesamt.

Die klinischen Akten erlaubten es, alle radiologischen Untersuchungen zu erfassen. Dazu zählten konventionelle Röntgenuntersuchungen, CT-Untersuchungen, Durchleuchtungen, Angiographien und nuklearmedizinische Anwendungen. Die Geburtskohorte schloss jedoch auch nicht exponierte Kinder, also solche ohne radiologische Untersuchung ein. Für alle durchgeführten radiologischen Untersuchungen wurde die individuelle Knochenmarksdosis auf Basis eines Vorhersagemodells geschätzt (Stewart et al. 2025). Die kumulative Strahlendosis wurde mit einer Latenzperiode von sechs Monaten in der Dosis-Wirkungs-Analyse berücksichtigt (s. Abschnitt 3.1.5.6), wobei eine Sensitivitätsanalyse diese Periode auf zwei Jahre ausdehnte. Für Kinder aus dem Kaiser Permanente Versorgungsverbund sowie für stationäre und Notfalluntersuchungen in Ontario konnte auch die Indikation für die radiologischen Untersuchungen ausgewertet werden. In Ontario deckte dies 60 % aller radiologischen Untersuchungen ab.

Zur Erfassung hämato-onkologischer Krebserkrankungen verwendete die RIC-Studie die klinischen Akten der eingeschlossenen Personen sowie ein Record-Linkage mit Krebsregistern. Auf Basis der klinischen Akten wurden auch Personen mit diagnostiziertem Down-Syndrom identifiziert, da diese ein höheres Leukämie-Risiko haben.

3.1.4 Ergebnisse

Hämato-onkologische Krebserkrankungen

Die Ergebnisse der EPI-CT-Studie zeigen sowohl für myeloische als auch für lymphatische Krebserkrankungen einen deutlichen und ähnlich starken Zusammenhang mit der kumulativen Knochenmarksdosis. Das zusätzliche relative Risiko ERR (Excess Relative Risk) pro 100 mGy für myeloische Krebserkrankungen betrug 2,01 (95 % Konfidenzintervall (KI): 1,02-3,42) bei 578 Fällen. Für lymphatische Krebserkrankungen war das ERR 1,96 (95 % KI: 1,10-3,12) bei 790 Fällen. Die Ergebnisse waren in einer Serie von Sensitivitätsanalysen robust, unter anderem für längere Exklusionsintervalle als die in der Hauptanalyse verwendeten zwei Jahre, oder ohne Personen mit den höchsten Dosen. In der nach Altersgruppe (< 5 Jahre, 5 bis < 10 Jahre, >= 10 Jahre) stratifizierten Auswertung wurde für beide Endpunkte beobachtet, dass das ERR pro 100 mGy mit der Altersgruppe anstieg. Insbesondere vor dem Hintergrund einer in der LSS demonstrierten höheren Strahlensensibilität von Kindern im Vergleich zu Erwachsenen ist dieser Befund unerwartet (siehe unten).

Die Fall-Kontroll-Studie aus Finnland fand ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen der kumulativen Knochenmarksdosis und der Inzidenz von Leukämien im Kindesalter. Allerdings betrug die Excess Odds Ratio (EOR) 13 pro 100 mGy (95 % KI: 2-26) und war damit um einen Faktor sechs höher als bei der EPI-CT-Studie. Dieser hohe Wert wurde mit dem Einfluss von Zufallsschwankungen begründet, eine plausible Erklärung angesichts der geringen Anzahl von nur acht exponierten Fällen.

Die RIC-Studie schätzte in einer linearen Dosis-Wirkungs-Analyse für alle 2961 diagnostizierten hämato-onkologischen Erkrankungen ein zusätzliches relatives Risiko pro 100 mGy von 2,54 (95 % KI: 1,70-3,51). Basierend auf dieser Schätzung betrug der auf die diagnostische Strahlenexposition attributable Anteil an allen hämato-onkologischen Erkrankungen 10,1% (95 % KI: 5,8-14,2). Bei mindestens 30 mGy Knochenmarksdosis (durchschnittlich 57 mGy) wurde die zusätzliche kumulative Inzidenz hämato-onkologischer Erkrankungen bei Personen ohne Down-Syndrom bis zum Alter von 21 Jahren auf 25,6 pro 10 000 Kinder geschätzt. Dabei entsprachen 30 mGy Knochenmarksdosis etwa zwei Schädel-CTs, deren mittlere Knochenmarksdosis auf 13,7 mGy geschätzt wurde. In der Sensitivitätsanalyse mit einer Latenzzeit von zwei Jahren für die kumulative Dosis ergab sich ein ERR pro 100 mGy von 2,16 (95 % KI: 1,30-3,16). Weitere Sensitivitätsanalysen, etwa durch Ausschluss von Beobachtungen über 50 bzw. 100 mGy Knochenmarksdosis oder bei Ausschluss von Kindern mit Down-Syndrom lieferten mit dem Hauptergebnis konsistente Schätzungen für das ERR pro 100 mGy.

In einer auf separate Dosiskategorien bezogenen Auswertung der RIC-Studie stiegen die jeweiligen relativen Risiken für die Dosiskategorien 15-20 mGy, 20-30 mGy, 30-50 mGy, 50-100 mGy sowie ≥ 100 mGy mit der Dosis an und überschritten inklusive ihrer Konfidenzintervalle (KI) die 1. Dabei wurden 89 von 2961 hämato-onkologischen Erkrankungen bei Personen mit einer geschätzten kumulativen Knochenmarksdosis von mindestens 20 mGy beobachtet.

Ein linearer Dosis-Wirkungs-Zusammenhang wurde in der RIC-Studie sowohl für lymphoide Erkrankungen – einschließlich akuter lymphatischer Leukämie (ALL) – mit einem ERR pro 100 mGy von 1,95 (95 % KI: 1,09-2,97) wie für myeloproliferative Erkrankungen und das myelodysplastische Syndrom (ERR pro 100 mGy 10,19; 95 % KI: 3,61-20,82) gezeigt. Dieser Zusammenhang gilt insbesondere für das Non-Hodgkin Lymphom (ERR pro 100 mGy 2,56; 95 % KI: 1,52-3,81). Anders als in der EPI-CT Studie wurden weder Zusammenhänge für das Hodgkin Lymphom (ERR pro 100 mGy 0,00; 95 % KI: 0,00-1,10) noch für AML (ERR pro 100 mGy 0,00; 95 % KI: 0,00-1,49) beobachtet.

Hirntumoren

Für maligne Hirntumoren zeigt die EPI-CT-Studie mit einem ERR pro 100 mGy von 1,27 (95 % KI: 0,51-2,69) bei 165 exponierten Fällen eine deutliche Assoziation mit der kumulativen Hirndosis durch CT-Untersuchungen des Schädels. Auch für die Subgruppe der Gliome waren die Ergebnisse ähnlich. Ein erwarteter Anstieg des Risikos pro Dosis bei niedrigerem Alter zum Zeitpunkt der Exposition zeigte sich nicht. Vielfältige Sensitivitätsanalysen schließen methodische Verzerrungen als alleinige Ursache der beobachteten Assoziation aus.

Konsistente Ergebnisse für maligne Hirntumoren zeigte die australische Studie: Die ERR betrug 0,80 pro 100 mGy (95 % KI: 0,54-1,06), basierend auf 4 472 Fällen, von denen 237 exponiert waren. Für Gliome waren die Ergebnisse ähnlich und variierten wenig in verschiedenen Sensitivitätsanalysen.

Die finnische Studie umfasste sowohl maligne als auch nicht-maligne Hirntumoren. Die EOR pro 100 mGy kumulative Hirndosis betrug 5,50 (95 % KI: 0,31- 10,95) basierend auf neun

exponierten Fällen. Für maligne Hirntumoren betrug die EOR 3,48 pro 100 mGy (95 % KI: -2,33-9,64; 4 exponierte Fälle) und für Gliome (höher- und niedriggradige Gliome) 1,06 (95 % KI: -6,55-9,30; 3 exponierte Fälle). Durch die sehr niedrige Anzahl exponierter Fälle ist die Präzision dieser Schätzungen stark eingeschränkt. Der geschätzte Risikokoeffizient für maligne Hirntumoren war einerseits um einen Faktor drei bis vier höher als in der EPI-CT Studie und der australischen Studie, allerdings nicht statistisch signifikant von null verschieden.

Alter bei Exposition

Die EPI-CT-Studie untersuchte auch die Abhängigkeit des Risikos vom Alter bei Exposition. Für hämato-onkologische Krebserkrankungen stieg das ERR pro 100 mGy mit steigendem Alter bei Exposition signifikant an ($p=0,001$): 0,78 für <5 Jahre, 1,81 für 5 bis <10 Jahre und 4,02 für ≥ 10 Jahre (Bosch de Basea Gomez et al. 2023). Damit konsistent wurde in der RIC-Studie für eine feste Dosis und eine feste Zeit seit Exposition ein Anstieg des relativen Risikos für hämato-onkologische Erkrankungen von der Altersgruppe < 1 Jahr (2,18 bei 30 mGy vs. nicht exponiert) auf ein bis vier Jahre (2,81) auf fünf bis zehn Jahre (6,09) beobachtet, um dann in der Altersgruppe zehn bis 20 Jahre wieder 3,54 abzufallen. Die finnische Studie zur Kinderleukämie bestätigte bei geringen Fallzahlen diese Ergebnisse nicht.

Für maligne Hirntumoren beobachteten Hauptmann et al. 2023 in der EPI-CT-Studie keinen signifikanten Unterschied der ERR pro 100 mGy zwischen verschiedenen Altersgruppen bei Exposition ($p=0,16$): 0,40 für 0 bis <6 Jahre, 1,98 für 6 bis <12 Jahre, und 1,62 für ≥ 12 Jahre. Die finnische Studie zu Hirntumoren berichteten kein geschätztes Krebsrisiko pro Doseinheit stratifiziert nach Altersgruppe. Das geschätzte Krebsrisiko für den kategorialen Vergleich der jemals CT-exponierten vs. niemals CT-exponierten Personen wies keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen Altersgruppen bei Diagnose auf. Die australische Studie berichtete keine Ergebnisse altersstratifizierter Analysen. Jedoch zeigte sich keine statistisch signifikante Modellverbesserung der Dosis-Wirkungs-Analyse, wenn das Alter bei Exposition mitberücksichtigt wurde.

Details zu den Methoden und Ergebnissen dieser zentralen Studien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Methoden und Ergebnissen der berücksichtigten Studien (Autor: Prof. Michael Hauptmann, Medizinische Hochschule Brandenburg Theodor Fontane)

	Australien (Smoll et al. 2023)	EPI-CT Europa (Bosch de Basea Gomez et al. 2023, Bosch de Basea et al. 2015, Hauptmann et al. 2023)		RIC Kalifornien, USA & Ontario, Kanada (Smith-Bindman et al. 2025a)	Finnland (Abuhamed et al. 2025, Nikkilä et al. 2018)	
Veröffentlichungsjahr	2023	2024		2025	2025	2018
Design	Kohorte	Kohorte von Exponierten (≥ 1 CT-Untersuchung)		Kohorte	Fall-Kontroll	
Endpunkte	maligne intrakranielle Hirntumoren	maligne intrakranielle Hirntumoren	hämato-onkologische Erkrankungen	hämato-onkologische Erkrankungen	maligne und nicht-maligne Hirntumoren 0 –15 Jahre	Leukämie 0 –15 Jahre
Studienumfang						
Personen	10 524 842	658 752	876 771	3 724 623		
Personenjahre	235 643 748	4 536 716	6 863 833	35 715 325		
Mittleres Follow-up (in Jahren)	22,4	6,9	7,8	10,1		
Fälle				2 961	604	911
Kontrollen					1 809	2 730
Exponierte Fälle	237	141	790 lymphatische, 578 myeloische Neoplasien	1 700 (davon 272 mit kumulativer Knochenmarksdosis ≥ 1 mGy)	9	8
Expositionszeitraum	1985 – 2005	1977 – 2014		1996 – 2017	1978 – 2011	
Alter bei Exposition (Jahre)	0 – 19	0 – 22		0 – 21	0 – 14	
Diagnosezeitraum	1985-2012	1977-2014		1996-2017	1990-2016	1990-2011
Dosimetrie	Zuordnung von CT-Protokollen nach Körperteil, Jahr und Alter aufgrund technischer Parameter für externe CT-Untersuchungen aus Surveys, klinischen Protokollen und Literatur, Dosisberechnung mit NCICT	Ableitung von CT-Protokollen nach Körperteil, Geschlecht, Alter und CT-Scanner-Typ aufgrund technischer Parameter für Subgruppe von 378 000 der CT-Untersuchungen, Dosisberechnung mit NCICT		Dosisberechnung für 27 595 CTs anhand von technischen Parametern, Größe, Gewicht, Geschlecht, Körperteil. Imputation für alle anderen CTs mit diesen Daten anhand von Größe, Gewicht, Geschlecht, Datum,	Technische Parameter teilweise erhoben, teilweise geschätzt, Dosisberechnung mit NCICT	

				Einrichtung, Körperteil, Anzahl Phasen.		
Dosimetrik	kumulative Hirndosis (mGy)	kumulative Hirndosis (mGy)	kumulative Knochen- markdosis (mGy)	kumulative Knochenmark- dosis (mGy)	kumulative Hirndosis (mGy)	kumulative Kno- chenmarkdosis (mGy)
Lag-Intervall (Jahre)*	2	5	2	0,5	5	2
Kumulative Dosis (mGy)	44 (Mittelwert) 32 (Median)	47,4 (Mittelwert) 44,0 (Median)	15,6 (Mittelwert)	14,0 (Mittelwert) durch alle Bildgebungsmodalitä- ten unter Personen mit ku- mulativer Knochenmark- dosis $\geq 0,1$ mGy	22,0 (Mittelwert)	9,71 (Median Fälle) 7,14 (Median Kon- trollen)
Ausschluss-Periode (Jahre)**		5	2	0,5	Keine	Keine
Statistisches Risikomodell	RR= EXP(b*Dosis), ERR= RR-1	RR= 1+ b* Dosis mit b= ERR		RR= 1+ b* Dosis mit b= ERR	OR= EXP(b* Dosis), EOR= OR-1	OR= EXP (b* Do- sis), EOR= OR-1
Hauptergebnisse	ERR/100 mGy= 0,80 (95 % KI: 0,54-1,06), (4 472 Fälle)	ERR/100 mGy= 1,27 (95 % KI: 0,51-2,69), (165 Fälle)	Alle hämato-onkologi- schen Erkrankungen ERR/100 mGy= 1,96 (95 % KI: 1,10- 3,12), (790 Fälle) Lymphatische Maligni- täten ERR/100 mGy= 2,01 (95 % KI: 1,02-3,42), (578 Fälle) Myeloische Malignitä- ten ERR/100 mGy= 2,02 (95 % KI: 0,47-4,77), (203 Fälle)	Alle hämato-onkologi- schen Erkrankungen ERR/100 mGy= 2,54 (95 % KI: 1,70-3,51), (2961 Fälle) Lymphatische Malignitä- ten ERR/100 mGy= 1,95 (95 % KI: 1,09-2,97), (2349 Fälle) Myeloische Malignitäten ERR/100 mGy= 1,82 (95 % KI: >0-4,02), (460 Fälle)	EOR/100 mGy= 5,50 (95 % KI: 0,31, 10,95), (9 exponierte Fälle) Maligne Hirntumoren EOR/100 mGy= 3,48 (95 % KI: -2,33, 9,64), (4 exponierte Fälle)	EOR/100 mGy= 13 (95 % KI: 2-26), (8 exponierte Fälle)

RR: Relatives Risiko, ERR: Excess RR, KI: Konfidenzintervall, EOR: Excess Odds Ratio

*Angenommenes minimal mögliches Zeitintervall, in dem eine Exposition eine Diagnose des Endpunkts verursachen kann.

**Intervall, in dem Personen nach der ersten CT-Untersuchung tumorfrei geblieben sein müssen, um in Analyse eingeschlossen zu werden.

3.1.5 Methodische Bewertung der berücksichtigten CT-Studien

Bei der Bewertung der Aussagekraft strahlenepidemiologischer Studien sind verschiedene methodische Aspekte zu berücksichtigen. Das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR (2017)) bietet eine allgemeine Übersicht relevanter methodischer Kriterien, von denen die im Kontext der hier betrachteten Studien wichtigsten näher erläutert werden.

3.1.5.1 Studiendesign

Die berücksichtigten Untersuchungen sind epidemiologische Beobachtungsstudien, bei denen Informationen zur Strahlenexposition sowie zu aufgetretenen Gesundheitsereignissen auf individueller Ebene erfasst wurden, d.h. für jede Person der Studienpopulation separat. In Beobachtungsstudien gibt es bei Durchführung keine Möglichkeit einer aktiven Intervention bei der Studienpopulation und keine Kontrolle der Randbedingungen. Die erreichbare epistemische Aussagekraft ist damit prinzipiell geringer, als sie es bei randomisierten kontrollierten Studien sein kann. Insbesondere erlauben epidemiologische Studien alleine keine zwingenden Kausalschlüsse von der Strahlenexposition auf einen medizinischen Endpunkt.

In Verbindung mit dem mittlerweile erreichten Verständnis der physikalischen, biologischen und physiologischen Strahlenwirkung auf Basis kontrollierter Studien können jedoch mit hoher methodischer Qualität durchgeführte epidemiologische Studien eine starke Evidenz liefern.

3.1.5.2 Erfassung der Exposition

Systematisch verzerrte Dosisschätzungen können die geschätzte Dosis-Wirkungs-Beziehung verfälschen. Hinzu kommt, dass auch zufällige Fehler in der Dosimetrie statistische Parameterschätzungen beeinflussen können (Abschnitt 3.1.5.8). Daher ist die Zuverlässigkeit der Dosimetrie ein wesentliches Kriterium zur Bewertung einer epidemiologischen Studie. Um die Qualität der Dosimetrie der betrachteten Studien einzuschätzen, ist die Quelle der Dosisrelevanten Informationen zu beachten, die Detailliertheit und Genauigkeit der verwendeten Informationen sowie die Methode der Dosisschätzung selbst.

Die Expositionsschätzung in den betrachteten Studien basiert auf Listen von CT-Untersuchungen entweder von Krankenhäusern oder Krankenkassen, die zu Zwecken der Terminvereinbarung oder Abrechnung erstellt wurden. Diese Listen enthalten minimale Information (z. B. Datum, untersuchtes Körperteil, Geschlecht, Alter). Sie können auch geplante, aber tatsächlich nicht oder anders durchgeführte Untersuchungen dokumentieren. Aus den Listeneinträgen geht oft nicht hervor, wie viele CT-Serien Teil einer Untersuchung waren. So können durchgeführte Serien in den Listen fehlen, weil sie in der Qualitätskontrolle als unzureichend bewertet, gelöscht und wiederholt wurden. Eine Ursache für CT-Untersuchungen mit geringer Bildqualität sind Bewegungsartefakte, die insbesondere bei längerer Scan-Dauer und reduzierter Compliance (z. B. bei Kleinkindern) auftreten können. Dies spricht dafür, dass die Wahrscheinlichkeit nicht dokumentierter, verworfener Serien abhängig vom Alter des Kindes zum Zeitpunkt der CT-Untersuchung ist. Gleichzeitig führten CT-Untersuchungen in der Vergangenheit zu höheren Organdosen als heute, da in geringerem Umfang für Kinder und Jugendliche optimierte Protokolle eingesetzt wurden.

Detaillierte Informationen über dosisrelevante technische Parameter (z. B. Scanner-Typ, -Hersteller, -Modell, CTDI_{vol}, Pitch, Röhrenstrom, Röhrenspannung) lagen in allen Studien nur für entweder einen Teil der durchgeführten CT-Untersuchungen oder aber nur für CT-Untersuchungen an der Studienpopulation ähnelnden, aber nicht eingeschlossenen Personen vor. Aus diesen vorhandenen Informationen wurden in allen Studien plausible Parameterkonstellationen für Klassen von CT-Untersuchungen (Protokolle) abgeleitet. Kategorien wurden dabei unter

anderem nach untersuchtem Körperteil, Geschlecht, Altersgruppe und Kalenderjahr gebildet. Für diese Gruppen wurden jeweils mittels NCICT (Lee et al. 2015) oder eines eigenen Vorhersagemodells für alle Arten von radiologischen Untersuchungen (RIC-Studie, Stewart et al. 2025) die verschiedenen relevanten Organdosen geschätzt.

Die Kenntnis der Details der Scan-Protokolle ist deswegen wichtig, weil die mit einer CT-Untersuchung einhergehende Dosis im Laufe der Zeit deutlich gesunken ist. Dies liegt an verbesserter Scannertechnologie und der zunehmend verbreiteten Optimierung der Protokolle für die Untersuchung von Kindern und Jugendlichen. Die Unsicherheit der Dosimetrie wurde für die EPI-CT Studie aufwendig modelliert (Thierry-Chef et al. 2021, Simon et al. 2014a), allerdings flossen diese Ergebnisse nicht in die Methode der Dosis-Wirkungs-Analyse ein. Für die australische Studie und die finnischen Studien liegen keine quantitativen Analysen zur Unsicherheit der Dosimetrie vor. Ausführliche Details der Dosimetrie für die RIC-Studie einschließlich ihrer Unsicherheiten befinden sich in Stewart et al. 2025). Die Dosis-Wirkungs-Analyse verwendete keine Methoden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Knochenmarksdosis.

Die Frage nach der Informationsquelle ist auch für Personeneigenschaften von Bedeutung. So sind für die Organdosis Körpergröße und Gewicht relevant. Diese Angaben waren jedoch, anders als das Alter der Personen nicht (EPI-CT, australische Studie, finnische Studien) oder nur zum Teil (RIC) dokumentiert. Die Variabilität von Körpergröße und Gewicht ist bei Kindern und Jugendlichen gleichen Alters hoch, so dass aus dem Alter abgeleitete Normwerte keine perfekten Surrogatmarker sind. Davon ausgenommen ist der Schädel, dessen Größe im Durchschnitt bereits ab ca. zehn Jahren bei Mädchen und ab ca. 14 Jahren bei Jungen die von Erwachsenen erreicht (Farkas et al. 1992).

Unabhängig vom genauen Vorgehen bei der Dosimetrie sind Probleme bei der vollständigen Erfassung aller an Personen der Studienpopulation durchgeführten CT-Untersuchungen. Für die meisten Kinder in der EPI-CT-Studie konnten alle an ihnen durchgeführten pädiatrischen CT-Untersuchungen erfasst werden. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass auch einzelne CT-Untersuchungen stattgefunden haben, die in der Studie nicht berücksichtigt wurden. So können Kinder und Jugendliche bereits vor ihrer ersten der Studie zugerechneten CT-Untersuchung weitere CT-Untersuchungen gehabt haben, die nicht erfasst werden konnten, z. B. weil sie in anderen Einrichtungen erfolgten. Dies hätte eine Unterschätzung der Strahlenexposition und damit eine Überschätzung des Strahlenrisikos pro Dosis zur Folge. In den finnischen Studien deckten die zur Erfassung von CT-Untersuchungen einbezogenen Krankenhäuser ca. 87 % aller CT-Untersuchungen des Landes ab. In der australischen Studie und der RIC-Studie ist aufgrund der Struktur der Gesundheitsversorgung in Australien, den USA und Kanada von einer fast vollständigen Erfassung aller CT-Untersuchungen (Australien) bzw. aller radiologischen Untersuchungen (RIC) auszugehen.

Ein Unterschied zwischen den betrachteten Studien besteht im Anteil der Exponierten an der Studienpopulation. Während die EPI-CT-Studie nur Personen einschließt, die vor Erreichen des Erwachsenenalters mindestens eine CT-Untersuchung hatten, beziehen sich die australische Studie, die finnischen Studien und die RIC-Studie auf die Allgemeinbevölkerung, von der nur ein geringer Anteil CT-Untersuchungen hatte. Dadurch umfassen die Studien aus Australien, Finnland und den USA / Kanada eine große Anzahl nicht exponierter und damit für die Bewertung des dosisabhängigen Strahlenrisikos wenig informativer Personen. Aufgrund der großen Kohorte von ca. 3,7 Millionen Personen waren jedoch in der RIC-Studie über 270 000 CT-Untersuchungen erfasst. Hinzu kamen etwa 267 000 Durchleuchtungen, 11 000 Angiografien, 66 000 nuklearmedizinische Untersuchungen und 6,7 Millionen konventionelle Röntgenuntersuchungen.

3.1.5.3 Definition und Erfassung der Gesundheitsendpunkte

Für Vergleich und Bewertung der betrachteten epidemiologischen Studien ist deren Definition der erfassten Gesundheitsendpunkte relevant. Alle berücksichtigten Studien betrachten neu aufgetretene, also inzidente Krebsfälle und nicht die Mortalität als Endpunkt. Den Studien war weiterhin gemein, dass die Endpunkte über einen Abgleich mit den nationalen (Kinder-) Krebsregistern erhoben wurden.

Die Erfassung der Krebsinzidenz über Krebsregister ist dabei mit spezifischen methodischen Herausforderungen verbunden. So setzt sie ein zuverlässiges System der Krebsregistrierung voraus. Die Qualität der Krebsregister kann je nach Region und Zeitperiode hinsichtlich Vollständigkeit und Vollständigkeit der Angaben erheblich variieren. In Europa ist zumindest ab den 1990er Jahren von einer sehr hohen Vollständigkeit auszugehen.

Fehlen hingegen nationale Krebsregister, ist eine komplette Erfassung inzidenter Krebsfälle in der Studienpopulation schwierig. So ist es u. a. in Deutschland für Erwachsene der Fall. Auch eine Trennung der Krebsregistrierung bei Kindern und Jugendlichen von der bei Erwachsenen kann eine vollzählige Erfassung erschweren. So hat bei der EPI-CT Studie die Nutzung von Kinderkrebsregistern in Frankreich und Deutschland dazu geführt, dass nur Krebserkrankungen bis zum 15. Lebensjahr einbezogen werden konnten.

Wichtig ist weiterhin die Frage, ob im Follow-up die Inzidenz bei mehr oder weniger stark exponierten Personen mit gleicher Vollständigkeit erhoben werden konnte. Falls die Intensität des Follow-up je nach Expositionsstatus unterschiedlich war und z. B. mittelbar von der Indikation zur CT-Untersuchung beeinflusst wurde, kann dies eine Verzerrung bewirken, sogenanntes Confounding.

Selbst wenn Krebsregister mit hoher Qualität existieren, können Schwierigkeiten dabei auftreten, Personen einer Studienpopulation im Krebsregister korrekt zu identifizieren. Aus Datenschutzgründen erfolgt der Abgleich von Daten (Record-Linkage) oft nicht mit Klarnamen, Geburtsdatum und Adresse, sondern in Form sog. Kontrollnummern. Dies sind Zeichenfolgen als Ergebnis einer kryptografischen Verschlüsselung der Klarangabe. Der anschließende Abgleich ist durch Unsicherheiten bei der Schreibweise stochastisch. Die Angaben von eigentlich registrierten Personen einer Studienpopulation können daher in Registern mitunter auch gar nicht bzw. falsch identifiziert werden. Dies kann zu einer Untererfassung der Krebsinzidenz führen, die aber vermutlich exponierte und nicht exponierte Personen gleichermaßen betrifft und daher keine Verzerrung verursachen sollte. Während in der EPI-CT-Studie, der australischen Studie und der RIC-Studie stochastisches Record-Linkage notwendig war, nutzten die finnischen Studien die eindeutige nationale Identifikationsnummer.

In Kohortenstudien wie der EPI-CT-Studie, der australischen Studie und der RIC-Studie lassen sich Inzidenzraten berechnen. Dafür muss die aus den Krebsregistern erhobene Anzahl inzidenter Fälle an der gesamten Zeitperiode relativiert werden, über die hinweg Fälle gezählt wurden. Diese Zeitperiode wird als Summe der personenweisen Nachbeobachtungszeiten berechnet und „Personenjahre“ genannt. Eine exakte Berechnung der Personenjahre setzt voraus, dass das Ende der Nachbeobachtungszeit für alle Mitglieder einer Kohorte bekannt ist, für Verstorbene also der Todeszeitpunkt und für Lebende das Ausscheiden aus der Kohorte z. B. durch Umzug. In der EPI-CT-Studie fehlten Informationen zu Vitalstatus und Todeszeitpunkt in Frankreich und Deutschland. Daher wurden ersatzweise repräsentative Angaben für die verbleibende Lebenserwartung aus Sterbetafeln der Allgemeinbevölkerung herangezogen. Dadurch ergeben sich Unsicherheiten, vor allem auch, da bei Personen mit CT-Untersuchung im Kindes- und Jugendalter von einer höheren Mortalität als bei der Allgemeinbevölkerung auszugehen ist. Über das nationale Sterberegister konnte die Mortalität in der australischen

Studie vollständig erfasst werden. Die RIC-Studie verwendete die Angaben des Krankenversorgungsverbunds sowie in Ontario die Krankenversicherungsdaten, um die Mortalität zu erheben.

Die Codierung von Krebserkrankungen nach statistischen Klassifikationen von Krankheitsbildern wie ICD (International Classification of Diseases), ICD-O (International Classification of Diseases for Oncology) oder ICC (International Classification of Childhood Cancer) ist Veränderungen unterworfen, die das sich entwickelnde medizinische Wissen über diese Erkrankungen widerspiegeln. In den letzten Jahren betraf dies vor allem Leukämien und Lymphome mit ihrer Einteilung in Subgruppen. Daher können sich in unterschiedlichen Regionen oder in unterschiedlichen Zeitperioden durchgeführte Studien hinsichtlich der Definition von Gruppen von Krebserkrankungen unterscheiden, was ihre Vergleichbarkeit zum Teil mindert.

Verändert sich die Diagnostik von Krebserkrankungen, etwa durch neue technische Bildgebungsmöglichkeiten oder die Einführung von Screeningprogrammen, kann dies einen Zeittrend der registrierten Häufigkeit von Krebserkrankungen bewirken. Auch sich über Jahre hinweg verändernde Risikofaktoren für die Krebsentstehung – etwa chemische Noxen oder Umweltexpositionen – können Zeittrends hervorrufen. Wenn parallel dazu, aber kausal unabhängig Organdosen bei CT-Untersuchungen sinken, kann die zeitliche Kopplung zu einem statistischen Zusammenhang von Organdosis und Krebsinzidenz führen. Eine Möglichkeit, die Verfälschung von Studienergebnissen durch solche nicht kausalen Zusammenhänge in Studien zu vermeiden, ist, für das Kalenderjahr einer Diagnose zu adjustieren bzw. zu stratifizieren. Diese Methode wurde in der australischen Studie und der EPI-CT-Studie angewendet. In den finnischen Studien wurde dagegen nur nach Alter, aber nicht nach Geburtsjahr gematcht. In der RIC-Studie wurde in der Dosis-Wirkungs-Analyse für das Kalenderjahr der Geburt adjustiert.

Bei Hirntumoren ergibt sich eine Heterogenität der Studien aus der Entscheidung, ob nur maligne oder auch gutartige Hirntumoren als Gesundheitsendpunkt betrachtet werden. Die finnischen Studien schlossen gutartige Hirntumoren ein, die EPI-CT- und die australische Studie nicht. Unterschiede in der Endpunkt-Definition erschweren die Vergleichbarkeit und Kombinierbarkeit der Ergebnisse einzelner Studien.

3.1.5.4 Confounding

Ein Confounder im Kontext der betrachteten Fragestellung ist eine Eigenschaft, die systematisch sowohl mit der Höhe der Strahlenexposition aus CT-Untersuchungen als auch mit dem Risiko für eine Krebserkrankung assoziiert ist. Bei einem kausal auf das Krebsrisiko wirkenden Confounder kann sich ein statistischer Zusammenhang zwischen einer CT-Exposition und der Krebserkrankung auch dann ergeben, wenn die CT-Exposition selbst keinen kausalen Einfluss auf das Krebsrisiko hat. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Stärke des Zusammenhangs zwischen Confounder und CT-Exposition hoch und der Confounder zugleich ein starker Risikofaktor für eine Krebserkrankung ist. Um für eine Assoziation zwischen CT-Exposition und Krebsrisiko in der Studienpopulation verantwortlich zu sein, muss eine positive bzw. hohe Ausprägung des Confounders darüber hinaus eine hohe Prävalenz besitzen.

Reverse Causation

Verzerrungen durch Reverse Causation (siehe Begriffserklärungen) können entstehen, wenn die CT-Exposition die Folge von frühen Symptomen einer noch nicht diagnostizierten Krebserkrankung ist, etwa weil sie nach Auftreten klinischer Symptome zur Krebsdiagnostik eingesetzt wird. Aus der Literatur bekannte analoge Beispiele betreffen etwa den Zusammenhang zwischen Strahlenexposition durch früher zur Bildgebung der Schilddrüse eingesetztes ¹³¹I und dem Auftreten von Schilddrüsenkrebs (Boice 2015, Dickman et al. 2003). Eine analoge Situation liegt für die Fragestellung des Zusammenhangs zwischen der Exposition durch das früher

im Rahmen von Hirnangiografien eingesetzte Kontrastmittel Thorotrast und dem Auftreten von Gehirntumoren vor (Boice 2015, Travis et al. 2003).

Eine Methode zur Verhinderung von Reverse Causation ist die Erhebung von Information, warum die Strahlenanwendung erfolgte. Mit Informationen zur Indikation lassen sich etwa Personen ausschließen, bei denen CT-Diagnostik eingesetzt wurde, um bei Vorliegen einschlägiger Symptome dem Verdacht eines Gehirntumors nachzugehen. Dies war jedoch bei den betrachteten Hirntumor-Studien nicht möglich. Stattdessen wurde versucht, durch Ausschluss-Zeiträume (Abschn. 3.1.5.5) sicherzustellen, dass während des Follow-up aufgetretene Tumoren nicht bereits vor der CT-Untersuchung vorhanden und damit der eigentliche Grund für die Durchführung der CT-Untersuchung waren.

Da die CT-Bildgebung bei Kindern zur Diagnosestellung bei Verdacht auf Leukämie oder Lymphome kaum eingesetzt wird, ist für diese Gesundheitsendpunkte von vornherein von einer untergeordneten Rolle von Reverse Causation in der betrachteten Fragestellung auszugehen. Zudem konnten in der RIC-Studie die Indikationen für fast alle radiologischen Untersuchungen ausgewertet werden. Dadurch ließen sich solche Untersuchungen ausschließen, die aufgrund eines möglichen Verdachts auf eine Krebserkrankung durchgeführt wurden.

Confounding by Indication

Im Kontext der untersuchten Fragestellung ist Confounding by Indication (siehe Begriffserklärungen) die Situation, dass eine Erkrankung im Sinne einer kausal verantwortlichen Drittvariable sowohl eine CT-Diagnostik wahrscheinlich macht als auch davon kausal unabhängig ein Risikofaktor für eine Krebserkrankung ist (Meulepas et al. 2016, Journy et al. 2016a). Eine Übersicht zu diesem Thema im Kontext der Exposition durch niedrige Strahldosen liefert Little et al. (2022b). Relevant sind hier Organtransplantationen und TPS wie Fanconi-Anämie oder Down-Syndrom (siehe Abschnitt 3.3.3). So haben Personen mit Down-Syndrom ein stark erhöhtes Risiko für eine Leukämieerkrankung (Hasle et al. 2000). Eine Diskussion der vorliegenden Evidenz für die Häufigkeit von CT-Untersuchungen bei Personen mit Down-Syndrom sowie der Prävalenz dieser Erkrankung liefern Meulepas et al. (2016) bzw. Schubauer-Berigan et al. (2020).

Confounding by Indication kann grundsätzlich die korrekte Schätzung des tatsächlichen Zusammenhangs zwischen CT-Exposition mit dem Risiko für solide Tumoren und dem Risiko für Leukämien oder Lymphome beeinträchtigen. Zur Kontrolle von Confounding by Indication ist es notwendig, zuverlässige Angaben zur Tumorprädisposition zu erheben, was jedoch in großen Kohorten schwierig ist.

In den finnischen Studien konnten Angaben zu den in Abschnitt 3.1.3 aufgeführten TPS erhoben und damit Personen ausgeschlossen werden. In die EPI-CT Studie einfließende Kohorten besaßen nur zu einem kleinen Teil Informationen zu TPS. Daher wurde hier der mögliche Einfluss von Confounding by Indication durch eine vertiefte Analyse gut dokumentierter Teilgruppen einiger Kohorten (Frankreich, Deutschland, UK) analysiert (Journy et al. 2016a, Journy et al. 2016b, Berrington de Gonzalez et al. 2016, Krille et al. 2015). In den untersuchten Teilkohorten führte der Ausschluss von Personen, bei denen TPS oder frühere Krebserkrankungen in den Akten gefunden wurden, zu einem kleineren Risikokoeffizienten pro Dosis. Änderungen der Schlussfolgerungen der Studien zur Frage, ob es überhaupt eine dosisabhängige Risikosteigerung gibt, ergaben sich jedoch nicht. Die Untersuchungen zeigen, dass fehlende klinische Informationen in rein registerbasierten Studien Verzerrungen in der geschätzten Dosis-Wirkungs-Beziehung bewirken können.

In der australischen Studie lagen keine Informationen zu TPS vor.

In der RIC-Studie konnte der Anteil von Kindern mit Down-Syndrom direkt geschätzt werden, hier betrug dieser Anteil mit 4 124 von gut 3,7 Millionen Kindern etwa 0,1 %. Zudem wurden in der RIC-Studie die Auswertungen stratifiziert nach Down-Syndrom Diagnose durchgeführt. Hinzu kam eine Sensitivitäts-Analyse ohne Kinder mit Down-Syndrom mit zur primären Analyse konsistenten Ergebnissen.

Eine Alternative ist die Abschätzung der Auswirkungen von Confounding by Indication auf Basis statistischer Überlegungen, die die Stärke des jeweiligen Zusammenhangs vom Confounder mit CT-Exposition und Krebserkrankung sowie die Prävalenz des Confounders berücksichtigen (Meulepas et al. 2016, Meulepas et al. 2018, Journy et al. 2016a, Hauptmann et al. 2020). Dabei zeigt sich, dass der Einfluss von TPS, vor allem durch ihre Seltenheit, letztlich vernachlässigt werden kann.

3.1.5.5 Exclusion Period

Die Verwendung eines Ausschluss-Zeitraums (*Exclusion Period*) dient dem Ziel, Reverse Causation zu verhindern. Dazu wird ein Zeitfenster unmittelbar nach der CT-Untersuchung festgelegt, innerhalb dessen auftretende Krebserkrankungen nicht als Gesundheitsereignis gezählt werden, weil sie vermutlich zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits vorhanden waren. Mitglieder der Studienpopulation, bei denen Krebserkrankungen vor der CT-Untersuchung diagnostiziert wurden oder innerhalb der Exclusion Period auftreten, werden typischerweise von der Auswertung ausgeschlossen. Studien können sich dabei darin unterscheiden, ob sie dieses Vorgehen auch für Systemerkrankungen oder benigne Tumoren wie z. B. Meningeome anwenden.

Für die konkrete Wahl einer auszuschließenden Zeitperiode haben sich Konventionen etabliert. Diese orientieren sich an dem Verständnis, wann sich eine strahleninduzierte Erkrankung frühestens bis zur klinischen Sichtbarkeit mit zum Studienzeitpunkt aktuellen diagnostischen Methoden entwickelt haben kann. So ist etwa für Erkrankungen des blutbildenden Systems bekannt, dass sie sich schneller entwickeln können als solide Tumoren. Grundsätzlich können auch nach Ende der Exclusion Period auftretende Krebserkrankungen ihren Anfang bereits vor der CT-Exposition gehabt haben, falls diese Periode nicht adäquat gewählt wurde. Zugleich sollte sie so gewählt werden, dass es nicht zur Untererfassung tatsächlich strahleninduzierter Krebserkrankungen kommt. Ausgehend von rein empirischen Studien wie auch mechanistischen Modellierungen kann man von Zeiträumen von einigen Monaten bis wenigen Jahren für hämato-onkologische Erkrankungen bzw. einigen Jahren für solide Tumoren ausgehen, die von Tumorentstehung bis zu einer klinischen Sichtbarkeit vergehen (Little et al. 2024b, Richardson und Ashmore 2005). Die Unsicherheit dieser Modelle ist jedoch groß, auch weichen die Schätzungen zwischen einzelnen Krebsentitäten z. T. um mehr als zehn Jahre voneinander ab.

In der EPI-CT-Studie und der finnischen Studie betrug die Exclusion Period zwei Jahre für hämato-onkologische Erkrankungen, in der RIC-Studie sechs Monate. Bei der Untersuchung von Hirntumoren betrug die Exclusion Period in der EPI-CT Studie und der finnischen Studie fünf Jahre, in der australischen Studie zwei Jahre. Eine Methode, die Wahl einer auszuschließenden Zeitperiode zu unterstützen, besteht in Sensitivitätsanalysen, was in der EPI-CT-Studie, der australischen Studie und der RIC-Studie umgesetzt wurde.

3.1.5.6 Latenzperiode

Wenn der Dosis-Wirkungs-Zusammenhang geschätzt wird, ist bei der Berechnung der kumulativen Strahlendosis die Anwendung einer Latenzperiode in Form eines Zeitversatzes (auch als „Time Lag“ bezeichnet) eine Methode, der niedrigen Geschwindigkeit der Entwicklung strahleninduzierter Krebserkrankungen Rechnung zu tragen. Hier wird davon ausgegangen, dass das momentane Risiko für das Auftreten eines Gesundheitsereignisses von

der kumulativen Strahlendosis abhängt, die zu Beginn der Krankheitsentstehung vorlag. Wenn die Diagnose tatsächlich gestellt wird, ist die kumulative Strahlendosis möglicherweise höher. Die kumulative Strahlendosis zum späteren Diagnosezeitpunkt der Krebserkrankung wird als irrelevant betrachtet, weil sie sich auch auf eine Zeitperiode nach Krankheitsentstehung bezieht.

Die Latenzperiode muss nicht zwingend mit dem auszuschließenden Zeitfenster (Abschnitt 3.1.5.5) übereinstimmen; in den primären Analysen der betrachteten Studien war dies aber der Fall.

Die konkrete Wahl der Latenzperiode folgt denselben Konventionen wie sie für das auszuschließende Zeitfenster in Abschnitt 3.1.5.5 skizziert wurden. Wie stark die Studienergebnisse von der im Detail willkürlichen Wahl einer Latenzperiode abhängen, kann ebenfalls durch Sensitivitätsanalysen beleuchtet werden. Dies wurde in der australischen Studie, der EPI-CT Studie und der RIC-Studie umgesetzt. Dabei ergaben sich keine anderen Schlussfolgerungen im Vergleich zur primären Analyse hinsichtlich der Frage, ob überhaupt ein Dosis-Wirkungs-Zusammenhang besteht.

3.1.5.7 Statistische Auswertung

Unsicherheiten in den eingesetzten Regressionsmodellen der betrachteten Studien ergeben sich daraus, dass in den Risikomodellen Annahmen über die Form des Dosis-Wirkungs-Zusammenhangs gemacht werden müssen. In der australischen (Smoll et al. 2023) und in den finnischen Studien (Abuhamed et al. 2025, Nikkilä et al. 2018) wurde dafür eine log-lineare Beziehung als parametrische Standardform in der Poisson-Regression (Australien) bzw. der bedingten logistischen Regression (Finnland) vorausgesetzt. Dagegen verwendeten die EPI-CT-Studie sowie die RIC-Studie ein Modell mit linearer Beziehung zwischen dem zusätzlichen relativen Risiko und der Dosis. Die unterschiedlichen Modelle schränken die Vergleichbarkeit der Schätzer des ERR pro Dosiseinheit ein, jedoch ist der Unterschied im log-linearen vs. linearen Verlauf im unteren Dosisbereich gering. Die Ergebnisse der Studien zeigen bzgl. einer Unterteilung in Dosiskategorien, dass die Daten im Rahmen der vorhandenen Unsicherheiten konsistent mit einem linearen Dosis-Wirkungs-Verlauf im Bereich der Organdosis ab ca. 50 mGy für Hirntumoren bzw. 25 mGy für Leukämien und Lymphome sind.

3.1.5.8 Messunsicherheit

Gewöhnliche Regressionsmodelle, die das Auftreten von Gesundheitsereignissen nach Strahlenexposition modellieren, basieren auf der Annahme, dass die zur Vorhersage des Gesundheitsereignisses verwendete Information, z. B. Dosiserfassung, ohne Messunsicherheit und methodische Fehler erfasst wurde. Da die statistischen Zusammenhänge für dieses Thema komplex sind, können sie hier nur oberflächlich wiedergegeben werden. Eine vertiefte Darstellung findet sich etwa bei Carroll et al. (2006) und United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2012).

Statistische Methoden und deren Verständnis für komplexe Dosisberechnungsprogramme wie in diesen und anderen Kohortenstudien mit wiederholten oder täglichen Expositionen sind in der Entwicklung (Bellamy et al. 2024, Little et al. 2024a, Zhang et al. 2017, Kwon et al. 2016). In den für diese Empfehlung betrachteten Studien beruht die Anzahl der durchgeführten CT-Untersuchungen je teilnehmender Person vollständig auf elektronisch dokumentierten Daten. Fehlerträchtige retrospektive Selbstberichte der Studienteilnehmenden wurden nicht verwendet. Dadurch beschränkt sich der Messfehler auf die genaue Höhe der Exposition je Untersuchung.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten des Umgangs mit Messfehlern, die in der erfassten Exposition die Risikoschätzungen oder die Schätzungen der Unsicherheit verzerren können:

Die australische Studie, die finnischen Studien und die RIC-Studie ignorieren diese Verzerrungsmöglichkeit. In der EPI-CT Studie wurde eine eigene Methode zur Berücksichtigung verschiedener Messfehler entwickelt (Simon et al. 2014b), aber nicht in der Dosis-Wirkungs-Analyse verwendet. Eine eingehende Analyse möglicher Auswirkungen auf die Risikoschätzer steht damit noch aus.

3.1.6 Zusammenfassung

Die beiden großen Kohortenstudien aus Europa, EPI-CT (Hauptmann et al. 2023, Bosch de Basea Gomez et al. 2023) und Australien (Smoll et al. 2023), zeigen für maligne Hirntumoren und hämato-onkologische Erkrankungen sehr konsistente und überzeugende Dosis-Wirkungs-Beziehungen. Für hämato-onkologische Erkrankungen sind die Ergebnisse der RIC-Studie auf Basis einer Geburtskohorte sehr ähnlich zu jenen der EPI-CT Studie. Es wäre unplausibel, dass diese Ergebnisse vollständig auf systematischen Verzerrungen und Scheinzusammenhängen beruhen, die durch methodische Limitationen entstehen. Dies gilt umso mehr, als die Designs der Studien voneinander abweichen, und damit unterschiedliche methodische Ansätze zu einer konvergierenden Evidenz geführt haben. Gleichwohl bleibt es unerklärt, dass in der EPI-CT-Studie sowie in der RIC-Studie nicht wie erwartet ein höheres Risiko pro Dosis für eine Exposition im frühen im Vergleich zum späteren Kindesalter gefunden wurde. Konträre Ergebnisse zeigten die EPI-CT-Studie und RIC-Studie für das Hodgkin Lymphom (kein dosisabhängiges Risiko in RIC, jedoch in EPI-CT) und das Non-Hodgkin Lymphom (kein dosisabhängiges Risiko in EPI-CT, jedoch in RIC). Bei der weiteren Analyse dieser Unterschiede ist zu berücksichtigen, dass die Nachbeobachtungszeit der RIC-Studie mit dem 21. Lebensjahr endete, während Teilnehmer der EPI-CT Studie z.T. bis zum 41. Lebensjahr nachverfolgt wurden.

Die finnischen Studien (Abuhamed et al. 2025, Nikkilä et al. 2018) sind aufgrund der sehr geringen Anzahl exponierter Fälle nur wenig informativ, mit extrem breiten KI für die geschätzten Risiken einschließlich negativer Schätzungen.

Die EPI-CT-Studie und die australische Kohorte ignorierten diagnostizierte Endpunkte während einer Ausschlussperiode von mehreren Jahren nach der ersten CT-Untersuchung, um Reverse Causation zu vermeiden. Ebenso ignorierten beide Studien CT-Untersuchungen innerhalb der letzten Jahre vor dem Ende des Follow-up, da angenommen wurde, dass diese das Risiko nicht so schnell beeinflussen können. In allen Fällen waren die Ergebnisse robust bezüglich Variationen von Exclusion Period (Abschn. 3.1.5.5) und Latenzzeit (Abschn. 3.1.5.6). Dies gilt auch für die RIC-Studie. Da das Follow-up der Studien relativ kurz war (Median < 15 Jahre bzw. Follow-up nur bis zum 21. Lebensjahr in der RIC-Studie), bleibt vorläufig unklar, wie lange nach Exposition die Risiken erhöht bleiben.

Verglichen mit den Ergebnissen der Studie unter den Überlebenden der Atombomben von Hiroshima und Nagasaki (LSS) sind die geschätzten Strahlenrisiken pro Doseinheit in den hier betrachteten CT-Studien aus Australien, Finnland, Europa und den USA / Kanada höher. Für die LSS wird in der Publikation von Bosch de Basea Gomez et al. 2023) für Leukämie ohne chronische lymphatische Leukämie (CLL) ein speziell anhand der LSS-Daten berechnetes ERR pro 100 mGy von 0,77 (95 % KI: 0,31-1,20) angegeben, bei Exposition vor dem 20. Lebensjahr. Hierbei ist relevant, dass das Mortalitäts-Follow-up der LSS 1950 begann. Früher auftretende krebserkrankte Todesfälle sind daher in der LSS nicht berücksichtigt. Inzidente Leukämieerkrankungen wurden ebenfalls erst ab 1950 erhoben. Da insbesondere Leukämien bereits nach wenigen Jahren auftreten können, ist davon auszugehen, dass sie in der LSS untererfasst sind. Für Hirntumoren berechneten Pearce et al. 2012b anhand der LSS-Daten ein ERR pro 100 mGy von 0,61 (95 % KI: 0,01-6,39) bei einem Alter bei Exposition von unter 20 Jahren und einem Follow-up von weniger als 20 Jahren. Unter Einbeziehung der weiten KI sind die Schätzungen allerdings konsistent mit den CT-Studien.

Aufgrund der empirischen Evidenz ist davon auszugehen, dass pro 10 000 CT-Untersuchungen des Kopfes bei Kindern und Jugendlichen in den folgenden 5 bis 15 Jahren ca. ein zusätzlicher maligner Hirntumor aufgrund der Strahlenexposition erzeugt wird (Hauptmann et al. 2023). Pro 10 000 CT-Untersuchung mit ca. 15 mGy Knochenmarksdosis sind ebenfalls eine bis zehn hämato-onkologische Erkrankungen innerhalb von etwa zehn Jahren nach Untersuchung aufgrund der Strahlenexposition zu erwarten (Bosch de Basea Gomez et al. 2023, Smith-Bindman et al. 2025a). Für Leukämie wurde in einer Erfassung aus 185 Ländern von 2022 eine altersstandardisierte Inzidenzrate (age-standardized rate, ASR) pro 100 000 mit 5,3 bei 487 294 Fällen insgesamt angegeben, wobei die ASR bei 3,1 für Kinder von 0 bis 19 Jahren lag (77 681 Fälle) (Daltveit et al. 2025). Die globale ASR der Hirntumor-Inzidenz wird für das Jahr 2019 wird mit 4,8 pro 100 000 bei Männern gegenüber 3,6 pro 100 000 bei Frauen (347 992 Fälle insgesamt) angegeben, wobei bei den 0 bis 14-Jährigen die ASR bei 2,2 (Jungen) und bei 1,9 (Mädchen) liegt (Ilic und Ilic 2023).

3.2 Trend bei der Anwendung von CT in Bezug zu Alter und Geschlecht

3.2.1 Indikation von CT-Anwendungen

Die pädiatrische CT erfordert die Berücksichtigung der kindlichen Besonderheiten in Anatomie, Kreislauf, Metabolismus und Reifungsgrad der Organe, einschließlich der sich mit dem Alter ändernden Strahlensensitivität. Die Berücksichtigung dieser Aspekte wird von allen namhaften wissenschaftlichen Gesellschaften unterstützt – ein Überblick findet sich in Frush (2011). Generell ist festzuhalten, dass sich das Indikationsspektrum zwischen den verschiedenen Bildgebungsmodalitäten durch den technischen Fortschritt verschiebt. So stehen der CT mit MRT und Sonografie Verfahren ohne ionisierende Strahlung gegenüber. Letztlich bleibt aber die Entscheidung zur CT individuell und muss die diagnostische Sicherheit, Verfügbarkeit und den Zustand der zu untersuchenden Personen berücksichtigen. Eine Ausnahme davon bildet das minimale Schädel-Hirntrauma (SHT), welches zu häufigen Schädel-CT-Untersuchungen ohne klinische Relevanz führt, und von denen die entsprechenden Leitlinien und Diagnosepfade abraten (s. u.).

In der Literatur finden sich praxisrelevante Empfehlungen zum Einsatz von CT-Untersuchungen bei Kindern, u. a. vom „American College of Radiology“ (ACR), ESPR, aber auch in der „Orientierungshilfe Radiologie“ der Österreichischen Gesellschaft für Radiologie und Nuklearmedizin (<https://www.oerg.at>), die ein interaktives Webportal zur Verfügung stellt (<https://www.orientierungshilfe.at>) bzw. in der „Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren“, die als Empfehlung auf der Webseite der Strahlenschutzkommission (<https://www.ssk.de>) zu finden ist.

Für verschiedene Indikationen sind Empfehlungen und sogenannte „Clinical Decision Rules“ entwickelt worden – insbesondere sind das Pediatric Emergency Care Applied Research Network (PECARN – pecarn.org) und das National Institute for Health and Care Excellence (NICE – <https://www.nice.org.uk/>) zu nennen.

- Trauma, insbesondere Polytrauma und SHT:
Empfehlungen sind zu finden in Ryan et al. (2020), Osmond et al. (2010), NICE (2023) und Radiopaedia (2020). Die Indikation zur Schädel-CT bei Kindesmisshandlung ist streng. Das ACR hat hier eine Empfehlung, die sowohl das Alter als auch den klinischen Zustand des Kindes berücksichtigt (Wootton-Gorges et al. 2017). Nach der S2k-Leitlinie Schädel-Hirn-Trauma im Kindes- und Jugendalter der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF 2022) sind obligate CT-Indikationen bei Koma/Bewusstlosigkeit, anhaltender Bewusstseinstörung, fokal

neurologischer Störung infolge des Traumas, (Verdacht auf) Impressionsfraktur, Schädelbasisfraktur und offener Schädelverletzung gegeben, wobei die Untersuchung nach dem ALARA-Prinzip mit alters- und gewichtsadaptierten Protokollen erfolgen soll.

- Thorax:

Atemwegsfehlbildungen (Kulkarni et al. 2016), interstitielle Lungenerkrankungen, postoperative Komplikationen, onkologische Erkrankungen (Lungenrundherde, Thoraxwand und mediastinale Tumoren), Herz-CT, CT-Angiografie (CTA) der großen mediastinalen Gefäße, inklusive Darstellung der Koronararterienabgänge oder von Koronarfisteln (Raimondi und Warin-Fresse 2016), postoperative Komplikationen nach Herz-/Gefäßchirurgie (Francone et al. 2022).

- Abdomen:

Trauma (Verletzungen der parenchymatösen bzw. Hohlorgane bei schwerem Bauchtrauma), bei folgenden Krankheitsbildern, falls Sonografie, Projektionsradiografie oder MRT nicht diagnostisch sind: z. B. akutes Abdomen, Perforationsverdacht, Hämaturie, Abklärung abdomineller und pelviner Tumoren.

- Muskulo-Skelettales System:

Trauma (gelenksnahe/gelenksbeteiligte Frakturen, wenn von therapeutischer Konsequenz), entzündliche Prozesse, wenn Sonografie und MRT nicht diagnostisch oder kontraindiziert sind, Planung orthopädischer Operationen bei Fehlbildungen (ACR 2019).

Die PiDRL (European Diagnostic Reference Levels für Pediatric Imaging) Arbeitsgruppe, welche von der European Society of Radiology (ESR) koordiniert wird, hat eine europaweite Umfrage bezüglich der klinischen Anwendungen von CT-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen durchgeführt (European Commission 2018). Von 33 kinderradiologischen Zentren haben 17 Zentren geantwortet (Rücklaufquote 51,5 %). Die Umfrage ergab die in Abbildung 1 gezeigten Häufigkeiten bezüglich der CT-Anwendungen bei Kindern.

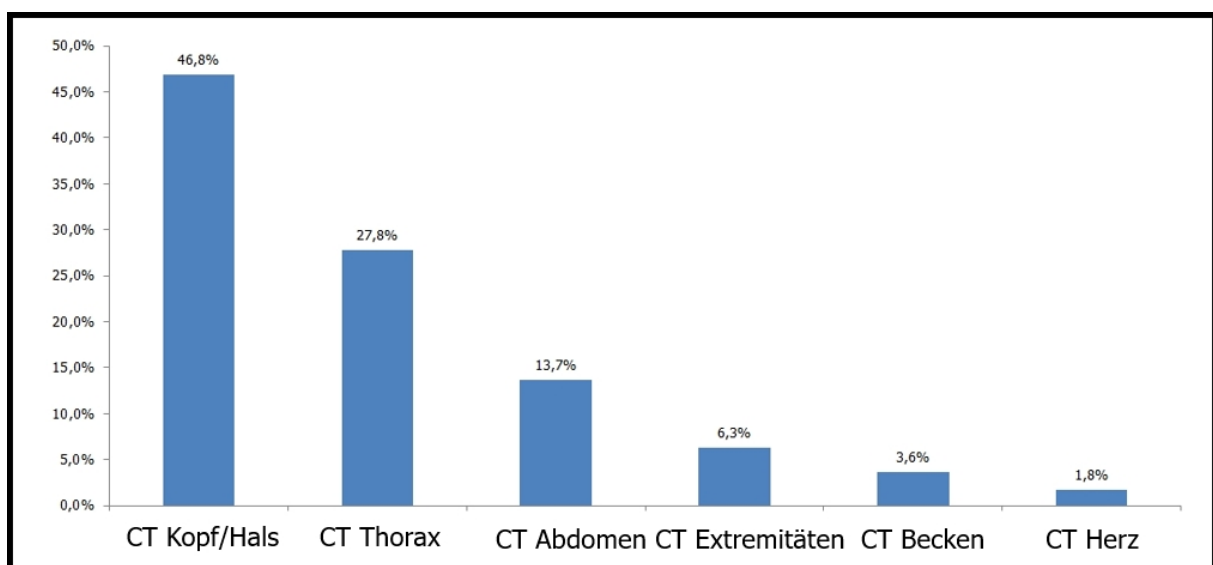


Abbildung 1: Häufigkeit von CT-Anwendungen bei Kindern (Autor: Herr Prof. Erich Sorantin, Klinische Abteilung für Kinderradiologie, Graz (Österreich) mit Daten aus European Commission 2018)

In Deutschland sind Angaben zur Indikation von CT-Untersuchungen häufig Gegenstand von Leitlinien der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften

(AWMF). Die Leitlinie zum SHT im Kindes- und Jugendalter ist ein gutes Beispiel, wie sich der Stellenwert der verschiedenen Bildgebungsmodalitäten im Laufe der Zeit verändert hat. So empfiehlt die AWMF-Leitlinie aus dem Jahre 2004 „Vorgehen bei leichtem Schädel-Hirn-Trauma“, dass sich die Notwendigkeit bildgebender Verfahren aus dem Auftreten neurologischer Symptome und/oder äußerlicher Verletzungen ergibt. Dabei empfiehlt die Leitlinie zunächst eine sonografische Untersuchung, dann eine Röntgenuntersuchung (Schädel in drei Ebenen) oder eine CT-Untersuchung des Kopfes (AWMF-Leitlinien-Register Nr. 064/015, Jahr 2004). In der Aktualisierung aus dem Jahr 2011 „Das Schädel-Hirn-Trauma im Kindesalter“ (AWMF-Leitlinien-Register Nr. 024/018, S2k, Jahr 2011) stellt die cCT den Goldstandard bei schädelhirnverletzten Kindern und Jugendlichen dar, wenn spezifische Symptome, ein Verdacht auf eine Fraktur oder ein Nachweis spezieller Begleiterkrankungen, z. B. Intoxikation mit Alkohol oder Drogen, oder eine Gerinnungsstörung vorliegen. Das Röntgen spielt keine Rolle mehr; die MRT wird nicht als Alternative empfohlen. Nach der aktuellen Leitlinie aus dem Jahr 2022 „Das Schädel-Hirn-Trauma im Kindes- und Jugendalter“ (AWMF 2022) ist eine CT-Untersuchung des Kopfes bei den folgenden Indikationen obligat: Koma/Bewusstlosigkeit, anhaltende Bewusstseinsstörung, fokale neurologische Störungen infolge des Traumas, (Verdacht auf) Impressionsfraktur, Schädelbasisfraktur und offene Schädelverletzung. Daneben werden zahlreiche fakultative Indikationen aufgeführt, bei denen als Alternative die MRT vorzuziehen ist, sofern hierdurch kein wesentlicher Zeitverlust entsteht (starker Konsens im Rahmen der Leitlinie). Die Aktualisierung dieser Leitlinie hat dazu geführt, dass die Anzahl von CT-Untersuchungen beim SHT im Kindes- und Jugendalter zugunsten der MRT deutlich zurückgegangen ist (siehe 3.2.2).

Im Folgenden werden einige weitere wichtige bundesdeutsche Leitlinien erwähnt, in denen die CT einen hohen Stellenwert einnimmt.

Die S2k-Leitlinie „Polytraumaversorgung im Kindesalter“ (AWMF 2020) nennt als Voraussetzung für die bildgebende Diagnostik mittels CT die Verdachtsdiagnose Polytrauma, sofern sie auch nach der primären Untersuchung weiterhin aufrechterhalten wird. Die Durchführung der CT soll bei polytraumatisierten Kindern im Team indiziert und zeitnah mit altersspezifischen Untersuchungsprotokollen erfolgen.

Die S1-Leitlinie „Trauma des muskuloskelettalen Systems im Kindes- und Jugendalter – Bildgebende Diagnostik“ (AWMF 2019) sieht die CT unter Einsatz alters- und gewichtsadaptierter Protokolle bei komplexen Extremitäten-, Becken- und Wirbelsäulenverletzungen und ggf. präoperativ indiziert. Die Untersuchungsprotokolle sollten für die jeweiligen Gegebenheiten in den radiologischen Abteilungen mit Fachpersonal mit Expertise in Applikation und Medizinphysik gemeinsam etabliert und in SOPs festgehalten werden.

Die Leitlinien der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie (GPOH) sehen bei einigen onkologischen Erkrankungen die CT als bildgebendes Verfahren der Wahl zum initialen Staging bei Tumorerkrankungen und zur Verlaufskontrolle vor. Aufgrund der höheren Sensitivität der CT in der Detektion pulmonaler Rundherde verglichen mit Röntgenuntersuchungen des Thorax (Peuchot und Libshitz 1987) wird die CT-Untersuchung der Lunge zur Detektion pulmonaler Metastasen in der Regel als Goldstandard empfohlen (z. B. AWMF 2016b, AWMF 2021c, AWMF 2021b, AWMF 2023, AWMF 2016a). Auch die MRT der Lunge erreicht nicht die Sensitivität der Lungen-CT, so dass die CT für den Nachweis von Lungenmetastasen nicht (vollständig) ersetzt werden kann. Aufgrund technischer Optimierungen wird die MR-Lungenbildgebung jedoch zunehmend sensitiv für pulmonale Rundherde (Renz et al. 2022; Yang et al. 2022). Für die Verlaufskontrollen (Follow-up) werden am Thorax Röntgen- und CT-Untersuchungen teils alternierend nach den o.g. Leitlinien eingesetzt. Künftig sollte für Verlaufskontrollen die MRT des Thorax zunehmend als alternative Methode ohne ionisierende Strahlung in den Leitlinien berücksichtigt werden.

Nach aktuellen Konsensusempfehlungen und Leitlinien stellt die Echokardiografie zwar weiterhin die Basisdiagnostik bei Personen mit angeborenen Herzfehlern dar; bei nicht vollständig beurteilbaren Pathologien ist die MRT als ergänzende Methodik sinnvoll (Achenbach et al. 2012; Gohmann et al. 2022). Die CT des Herzens mit aktueller Technik (niedriger Strahlenexposition und kurzer Scanzeit) kann als Ersatz für die invasive Herzkatheteruntersuchung und als Alternative zur MRT dienen, so z. B. bei Kontraindikationen – wie nicht bedingt MR-tauglichen Schrittmachern – oder wenn die länger dauernde MRT-Untersuchung ansonsten nur in Narkose durchgeführt werden könnte. Die Vorteile der CT sind jeweils gegenüber den Risiken der Strahlenexposition abzuwägen (Achenbach et al. 2012; Gohmann et al. 2022; Francone et al. 2022).

3.2.2 Häufigkeit von CT-Anwendungen

In der Nationalen Kohorte (NAKO) sind retrospektiv per Selbstauskunft Daten zur radiologischen Bildgebung erfasst worden. Diese liegen für ca. 8 000 Personen und nur für Erwachsene (Alter ab 20 Jahre) als Selbstauskünfte vor (Zeeb et al. 2024). Auch weitere bisher publizierte Studien zur Häufigkeit von CT-Untersuchungen bei Kindern und der damit verbundenen Strahlenexposition liefern entweder nur Daten zur Häufigkeit der CT-Untersuchungen (Galanski et al. 2006) oder zur Dosisverteilung (Wollschläger et al. 2023).

Um auch eine entsprechende zeitliche Entwicklung zu veranschaulichen, wurden daher Daten aus der fallpauschalenbezogenen Krankenhausstatistik (Diagnosis Related Group; DRG-Statistik) sowie aus den Grunddaten der Krankenhäuser des Statistischen Bundesamtes für den Zeitraum 2005 bis 2021 herangezogen und aufgearbeitet. Für die stationären CT-Untersuchungen in Deutschland lassen sich anhand der Operationen- und Prozedurenschlüssel (OPS-Codes) für Kinder im Alter von unter 1 bis 20 Jahren folgende Trends ablesen:

- Die absolute Anzahl aller CT-Untersuchungen bei Kindern und Erwachsenen (nativ und mit Kontrastmittel) ist von ca. 3 Mio. im Jahr 2005 auf 6,8 Mio. im Jahr 2021 gestiegen. Die Zahl der CT-Untersuchungen von Kindern hat sich bei ca. 70 000 Untersuchungen pro Jahr einpendelt (OPS-Codes 3-20, 3-22, 3-24).
- Während die Zahl der CT-Untersuchungen pro 1 000 Personen der Bevölkerung von 36 im Jahr 2005 auf 81,6 im Jahr 2021 angestiegen ist, blieb die Zahl der CT-Untersuchungen pro 1 000 Kindern mit 5,26 bis 5,64 relativ konstant.
- Speziell bei der Untersuchungsart „natives CT des Schädels“ sind die Untersuchungszahlen bei Kindern von 32 000 (2005) auf 20 500 (2021) zurückgegangen (ca. -40 %) (OPS-Code 3-200).
- Im Gegensatz dazu sind die Zahlen bei Kontrastmittel-gestützten CT-Untersuchungen bei Kindern im gleichen Zeitraum von insgesamt knapp 18 000 Untersuchungen im Jahr 2005 auf knapp 27 000 Untersuchungen im Jahr 2021 (ca. +50 %) angestiegen (OPS-Codes 3-22). Die Ursache für diesen Anstieg ist nicht definitiv zu erklären.
- Insbesondere das Herz-CT bei Kindern und Jugendlichen hat prozentual einen starken Anstieg erfahren, auch wenn die absoluten Zahlen bei 350 Untersuchungen pro Jahr noch vergleichsweise gering sind. Eine in diesem Zusammenhang vermutete Reduktion der Anzahl der Herzkatheteruntersuchungen konnte nicht bestätigt werden. Die Indikationen der Herz-CT-Untersuchungen sind insbesondere die Planung von interventionellen und operativen Eingriffen.
- Die selten indizierten Single Photon Emission Computed Tomography/Positronen-Emissions-Tomographie CT-Untersuchungen (SPECT/PET-CT) (OPS-Codes 3-72 und 3-73) bei Kindern zeigen einen leichten Anstieg in den absoluten Zahlen von 765 im Jahr

2010 auf 1 074 im Jahr 2021. Der prozentuale Anteil dagegen ist rückläufig (von 3,1 % auf 1,9 %).

Zieht man die Zahlen aus dem kassenärztlichen ambulanten Bereich über den Zeitraum 2018 bis 2022 in Deutschland mit hinzu, so bleiben auch dort sowohl die Gesamtzahl von CT-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen mit ca. 40 000 Untersuchungen pro Jahr sowie der relative Anteil von unter 1 % relativ stabil. Die Gesamtzahl der CT-Untersuchungen in diesem Bereich stieg von 4,75 Mio. (2018) auf 5,6 Mio. (2022), während die Anzahl der CT-Untersuchungen bei Kindern im Alter von 0 bis 19 Jahren im Beobachtungszeitraum leicht variierte (2018 [41 800] 2019 [41 200], 2020 [37 500], 2021 [38 000] und 2022 [40 800], Quelle: BfS persönliche Mitteilung). Der rückläufige Trend speziell bei Schädel-CT wurde auch in den USA im Zeitraum 1997 bis 2014 beobachtet (Seifi et al. 2022). Mit 181 000 Schädel-CT-Untersuchungen im Jahr 2014 war dies ein Rückgang auf 30 % der Zahlen aus dem Jahr 1997 (527 000).

Bereits Pokora et al. (2016) haben in der KiCT-Studie einen ähnlichen Trend für den Zeitraum 2006 bis 2012 gezeigt. Aus den hochgerechneten Abrechnungsdaten der Krankenkasse AOK wurde eine Abnahme der CT-Untersuchungszahlen um ca. 30 % beobachtet. Vergleicht man aus dieser Publikation die Untersuchungszahlen pro 1 000 Kinder (zu finden in Abbildung 1 der Publikation), so ist dies gleichbedeutend mit einer Abnahme von 8,15 pro 1 000 Kinder in 2006 auf 6,15 pro 1 000 Kinder in 2012. Dies stimmt in etwa mit unseren Auswertungen überein, bei der von 2010 bis 2015 im Mittel 5,35 Untersuchungen pro 1 000 Kinder ermittelt wurden (siehe Abbildung 2).

In einer vergleichbaren Studie in den Niederlanden (Meulepas et al. 2017) wurde dagegen ein Anstieg der CT-Untersuchungen von Kindern von 7 700 im Jahr 1990 auf 13 300 (2000) und 26 000 (2012) beobachtet. Jedoch schwächte sich dieser Trend seit 2007 deutlich ab und lag 2012 mit 6,7 CT-Untersuchung pro 1 000 Kindern in einem ähnlichen Verhältnis wie in Deutschland (5,2 im Jahr 2013). Die Anzahl der CT-Untersuchungen bei Kindern erhöhte sich auch in einer Studie in Italien von 9 000 (2004) auf 14 400 (2014) und dabei auch die Untersuchungszahl pro 1 000 Kindern von 6,3 auf 8,5 (Pola et al. 2018). Pearce et al. 2012a) fanden in Großbritannien nahezu eine Verdopplung der Untersuchungszahlen von 24 900 (1993) auf 48 300 (2002), allerdings zeigten sich dort die größten Steigerungsraten bei den Jugendlichen im Alter 15 Jahre und darüber. Die Rate der CT-Untersuchungen pro 1 000 Kindern stieg in diesem Zeitintervall von 2,24 (1993) auf 3,54 (2002). Alle genannten Publikationen beziehen sich dabei auf Zeiträume, die in der Mehrzahl vor 2010 lagen.

Eine Substudie der EPI-CT-Studie in Spanien (Bosch de Basea et al. 2016) berichtet von einer statistisch nicht signifikanten Änderung der Anzahl der CT-Untersuchungen pro 1 000 Kindern von 15,2 (2005) auf 18 (2013).

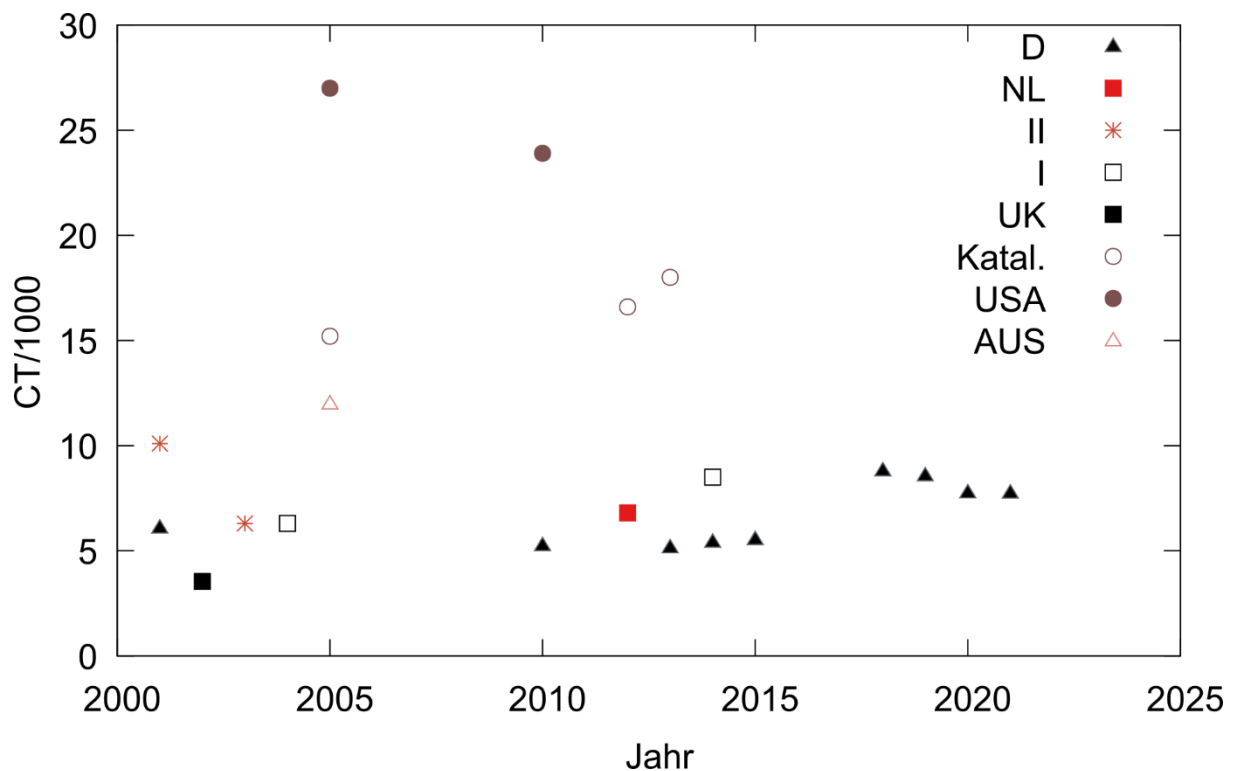


Abbildung 2: Die Graphik zeigt die Anzahl der CT-Untersuchungen pro 1000 Kinder aus verschiedenen internationalen Publikationen (s. u.) für die Jahre 2001 bis 2021 im Vergleich zur Analyse in Deutschland (D). Zum Vergleich: die Gesamtrate der CT-Untersuchungen in Deutschland pro 1000 Einwohner hat sich von 36,1 im Jahr 2005 auf 81,6 im Jahr 2021 mehr als verdoppelt.

Der Sprung in den Daten für Deutschland von 2015 auf 2018 rührt daher, dass für die Jahre 2018 bis 2021 auch die Zahlen aus dem ambulanten Bereich vorlagen. Für die Jahre 2005 bis 2015 ist dies nicht der Fall.

Im Folgenden sind die Publikationen aufgeführt, aus denen die Daten für die Abbildung entnommen wurden: Niederlande (NL): Meulepas et al. 2017, Israel (IL): Chodick et al. 2006, Italien (I): Pola et al. 2018, United Kingdom (UK): (Pearce et al. 2012a), Katalonien (Katal.): Bosch de Basea et al. 2016, USA: Miglioretti et al. 2013, Australien (AUS): Brady et al. 2016

Für die Einordnung der Zahlen aus den DRG-Statistiken (Zeitraum 2005 bis 2021), die die Daten anhand der OPS-Codes abbilden, sind folgende methodische Limitationen zu berücksichtigen. Eine mögliche Verzerrung mit einer Über- oder Unterschätzung der Anzahl der CT-Untersuchungen ist nicht auszuschließen (Dreger et al. 2015, Icks et al. 2017), da mehrere OPS-Codes für eine Untersuchung angegeben werden können (z. B. ohne (nativ) und mit Kontrastmittel) oder mehrere aufeinanderfolgende Körperbereiche (z. B. Thorax plus Abdomen plus Becken). Die Umwandlung der Abrechnungscodes in messbare, empirisch überprüfbare Variablen kann die Datenstruktur beeinflussen (Konrad et al. 2019), so dass je nach Interpretation der Abrechnungscodes die Anzahl der CT-Untersuchungen höher oder niedriger ausfallen können. Für eine Reduzierung der Verzerrung der Abschätzung der CT-Häufigkeiten ist das Vorliegen des jeweiligen Datums der abgerechneten Untersuchung für die jeweilige Person notwendig. Dies ermöglicht z. B. eine CT-Untersuchung des Thorax, die gegebenenfalls

mit zwei Abrechnungs-codes gekennzeichnet ist, z. B. mit CT Thorax und CT Abdomen mit demselben Datum, als eine CT-Untersuchung abzubilden und nicht fälschlich als zwei Untersuchungen. In der vorliegenden Auswertung wurden lediglich die einzelnen Abrechnungs-codes für die Darstellung der Häufigkeit herangezogen, da in den DRG-Statistiken keine Tages- und Monatsangaben für die jeweiligen individuell durchgeführten CT-Untersuchungen vorliegen.

Trotzdem sind die DRG-Statistiken und Krankenkassendaten im Allgemeinen ein Ansatzpunkt, den Verlauf der Zahl durchgeführter CT-Untersuchungen zu beschreiben. So nutzt das BfS ebenfalls Krankenkassendaten bei Erwachsenen für die Beobachtungen der medizinischen Strahlenexposition im zeitlichen Verlauf (Nekolla et al. 2017). Ferner bieten Krankenkassendaten den Vorteil, dass ein sogenannter recall bias (eine Verzerrung der geschätzten Exposition, in diesem Fall CT-Untersuchung, ausgelöst durch unterschiedliche Erinnerungsfähigkeit der Person in Selbstangaben) weniger ausgeprägt ist verglichen zu Selbstauskünften aus einer Fragebogen-Erhebung (Dreger et al. 2015; Garcia et al. 2023).

Mit der DRG-Statistik werden nur CTs erfasst, die bei stationär im Krankenhaus liegenden Patienten durchgeführt werden, aber nicht diejenigen, die im ambulanten Setting in Praxen oder im Krankenhaus durchgeführt werden. Das erklärt eventuell die geringere Anzahl an CT-Untersuchungen von Kindern in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern. Jedoch liegen vom BfS auch Daten aus dem kassenärztlichen ambulanten Bereich vor, die eine nahezu gleichbleibende Anzahl von ca. 41 800 (2018) bis 40 800 (2022) Untersuchungen für Kinder im Alter von null bis 19 Jahren zeigen. Über das statistische Bundesamt kann zudem die Anzahl an CT-Geräten in Krankenhäusern abgefragt werden. Diese haben sich von 1 241 im Jahr 2005 auf ca. 1 600 im Jahr 2022 erhöht (Quelle: Statistisches Bundesamt, Grunddaten der Krankenhäuser, Fachserie 12/6/1/1 (Destatis) und GBE Bund (GBE)). Nimmt man noch die Zahlen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) mit hinzu, so ist von ca. 2 560 CT-Geräten im Jahr 2008 und 3 050 Geräten im Jahr 2021 auszugehen. Diese Angaben decken sich in etwa mit den Angaben der in COCIR (European Coordination Committee of the Radiological Electromedical and Healthcare IT Industry) organisierten Gerätehersteller zur Gesamtzahl von 3 150 installierten CT-Geräten im Jahr 2023 in Deutschland (COCIR 2023).

3.2.3 Dosis bei CT-Anwendungen

Verschiedene Dosisgrößen können für eine Abschätzung der Patientenexposition, der Kollektivdosis und des Risikos herangezogen werden:

- $CTDI_{vol}$: Computed Tomography Dose Index (CTDI) als mittlere Dosis im untersuchten Volumen ist eine Messgröße in der Dosimetrie und Grundlage für die Berechnung der Strahlenexposition, ermittelt auf Basis zweier Plexiglasphantome unterschiedlicher Formate; erlaubt den Dosisvergleich zwischen unterschiedlichen Protokollen und ermöglicht es dem Untersuchenden, die Dosisexposition am Scanner direkt zu kontrollieren.
- SSDE: skaliert den $CTDI_{vol}$ auf die reale Patientengröße; hilfreich um die Dosiswerte der unterschiedlichen Patientengruppen (Alter/Gewicht) zu vergleichen. Unterschiede sind dann allein durch die Untersuchungstechnik bestimmt.
- Dosislängenprodukt DLP: eine Dosisgröße, die aus dem $CTDI_{vol}$ und der Untersuchungslänge L berechnet werden kann ($DLP = CTDI_{vol} * L$) und die ein Maß für die gesamte Exposition einer Untersuchungsserie darstellt.
- Organäquivalentdosis: diese spiegelt das Risiko für das betreffende Organ wider, das von der Strahlung getroffen wurde, z. B. können für CT-Untersuchungen die Organdosis für das Gehirn (CT Schädel) und das rote Knochenmark (CT Wirbelsäule) entscheidend

sein. Im Fall von Röntgenstrahlen ist die Organäquivalentdosis gleich der Organdosis, die meist in der Epidemiologie verwendet wird.

- Effektive Dosis: Eine Abschätzung erfolgt in der Regel anhand von altersabhängigen Konversionsfaktoren (k-Faktoren) zur Umrechnung des DLP in eine effektive Dosis ($E = k \cdot \text{DLP}$).

Für die beiden letztgenannten Dosisgrößen Organdosis und effektive Dosis, die direkt mit dem Risiko der Strahlenexposition verknüpft sind, gibt es leider aktuell noch keine Möglichkeit, diese Werte an den CT-Geräten anzeigen zu lassen. Zukünftig ist es denkbar, dass durch KI-basierte Autokonturierung und schnelle Algorithmen zur personalisierten Dosisabschätzung auch diese Größen direkt an der Bedienkonsole und im strukturierten Dosisbericht (RDSR: Radiation Dose Structured Report) angegeben werden können.

In der Publikation von Romanyukha et al. (2016) wird auf das Konzept der effektiven Dosis und die auf deren (vereinfachende) Anwendung als Risikovergleich verbundene Kritik eingegangen. Für Kinder liegen keine speziellen Gewebewichtungs-Faktoren vor, so dass bedingt durch das erhöhte Strahlenrisiko für bestimmte Tumoren eine Risikobewertung im Vergleich zu Erwachsenen schwierig ist. Eine Studie von Kopp et al. (2020) sieht daher ebenfalls die Notwendigkeit, zukünftig durch eine automatische individualisierte Dosisabschätzung zur Organ-Äquivalentdosis und zur effektiven Dosis die Unsicherheiten für LAR (Lifetime Attributable Risk) und ERR in Bezug auf Alter und Geschlecht zu minimieren.

Die Verwendung altersspezifischer Konversionsfaktoren (k-Faktoren) zur Umrechnung des DLP in eine effektive Dosis führt zu Unsicherheiten bei der Bestimmung der effektiven Dosis für untergewichtige bis normalgewichtige Personen und bei Kindern (hier wird die effektive Dosis tendenziell, bis zum Dreifachen, unterschätzt). Umgekehrt wird bei übergewichtigen Personen die mittels altersspezifischer k-Faktoren bestimmte effektive Dosis eher überschätzt. Da die Verwendung altersspezifischer k-Faktoren zu starken Unsicherheiten bei der Bestimmung der effektiven Dosis für untergewichtige bis normalgewichtige Personen führt, wurden in einer großen multizentrischen Studie basierend auf Dosis-Registerdaten k-Faktoren bestimmt, die nach Alter, Körperdurchmesser und Gerätehersteller stratifiziert wurden (Chu et al. 2023). Ein Ergebnis dieser an den Universitäten von Kalifornien und Florida durchgeführten Studie war, dass die aus über 120 000 Patientendaten ermittelten Werte für die k-Faktoren generell höher lagen als in vorangegangenen Studien.

Für die Einschätzung der Strahlenexposition liegen durch die EPI-CT Studie und die Studie von Wollschläger et al. (2023) ausreichend Daten vor. In beiden Publikationen wurde ein Rückgang der Organdosen (EPI-CT: in den Zeiträumen vor 1991, zwischen 1991 und 2001 und nach 2001) bzw. technischen Dosisparameter (Wollschläger et al. 2023; abhängig von der Altersgruppe CTDI_{vol} zwischen 5 und 40 % und DLP zwischen 4 % und 47 % im Vergleich des Zeitraums von 1980 bis 2010 mit dem Zeitraum 2016 bis 2018) beschrieben. Damit kann ein negativer zeitlicher Trend in der mittleren/medianen Dosis für pädiatrische CT-Untersuchungen und die über die Zeit immer effizientere Scannertechnologie als gegeben angesehen werden. Dies wird auch gestützt durch die Untersuchung von Hauptmann et al. (2023), die eine Abnahme der mittleren Hirndosis von 52 mGy im Jahr 1992 auf 38 mGy im Jahr 2011 zeigt. Wie wichtig die Organdosen zur Bestimmung des Risikos im Kinder- und Jugendalter ist, wird in den Publikationen von Bosch de Basea Gomez et al. (2023) für die Dosis des roten Knochenmarks (8 mGy für eine typische CT-Untersuchung) und von Little et al. (2023) deutlich.

Eine Abnahme der (Organ-) Dosiswerte bei CT-Untersuchungen des Kopfes und der Lunge wurden auch in den beiden Publikationen von Lee et al. (Lee et al. 2019, Lee et al. 2024) gefunden. Eingeschränkt auf Lungenuntersuchungen fanden Esser et al. (2018) ebenfalls eine

Abnahme der Strahlenexposition (im Median pro Jahr um durchschnittlich 12 %) im Zeitraum 2007 bis 2014.

Die oben genannten Trends spiegeln sich auch in der Entwicklung der diagnostischen Referenzwerte (DRW) wider. Die Werte für den $CTDI_{vol}$ sind vom erstmaligen Bekanntmachungsjahr 2010 bis zu der aktuellen Bekanntmachung 2022 um bis zu 50 % abgesenkt worden (siehe Tabelle 2). Gleiches trifft auch auf die ermittelte effektive Dosis zu.

Tabelle 2: *Entwicklung der Diagnostischen Referenzwerte (DRW) für CT-Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen (zusammengestellt aus BfS 2022). Um konform mit den Vorgaben der ICRP zu bleiben, wurde im Jahr 2022 der Median verwendet, während zuvor der Mittelwert herangezogen wurde. Dies schränkt die direkte Vergleichbarkeit der zeitlichen Entwicklung etwas ein.*

Untersuchung (CT)	Alter (Jahre)	DRW ($CTDI_{vol}$ in mGy)		
		2010	2016	2022
Hirnschädel	< 1 Jahr	33	30	25
	1 - < 5	40	35	35
	5 - < 10	50	50	40
	10 - < 15	60	55	45
Thorax	Neugeborene	1,5	1,0	1,0
	< 1	2,0	1,7	1,5
	1 - < 5	3,5	2,6	2,0
	5 - < 10	5,0	4,0	3,0
	10 - < 15	8,0	6,5	5,0
Abdomen	6 - < 10	8,0	5,0	4,0
	10 - < 15	13,0	7,0	7,0

Die Anzahl der vorliegenden DRW für das Kindes- und Jugendalter ist sehr beschränkt, so dass eine Vielzahl an möglichen CT-Untersuchungen hierdurch nicht erfasst und überprüft werden können bzw. über diese Untersuchungen auch kaum Aussagen zur Dosisexposition vorliegen. Daher wurden aus der Arbeitsgruppe der SSK in zwei kinderradiologischen Einrichtungen (Landeskrankenhaus Universitätsklinikum Graz, Österreich; Medizinische Hochschule Hannover, Deutschland) Dosiswerte für alle CT-Untersuchungen (Graz) bzw. hochspezialisierte CT-Untersuchungen (Hannover) erfasst und über die Zeit ausgewertet.

Die Grazer Analyse (Sorantin et al. in Vorbereitung) von 2008 bis 2020 ergibt, dass bedingt durch den technologischen Fortschritt (iterative Bildrekonstruktion, neue Faltungskerne) eine deutliche Reduktion des DLP erreicht werden kann. Unter Verwendung von Konversionsfaktoren wurden Effektivdosen berechnet. Diese konnten für Untersuchungen mit höherer Dosisexposition (Mehrorganuntersuchungen wie Polytrauma-CT, CT-Angiografien) über die Jahre in allen Altersgruppen deutlich gesenkt werden, wobei der Effekt bei den Säuglingen und Jugendlichen besonders stark war.

Die in Hannover durchgeführte Analyse spiegelt in besonderem Maß die schnelle Weiterentwicklung der Gerätetechnik und den damit verbundenen möglichen Rückgang der Dosisexposition speziell bei Neugeborenen wider (Renz et al. 2025). Es wurden konsekutive CT-Untersuchungen des Herzens von 59 Kindern ≤ 1 Lebensjahr an einem modernen Photon-Counting-CT analysiert. Mit dieser neuen Technik konnten Dosiswerte ($CTDI_{vol}$: Mittelwert

0,14 mGy, Standardabweichung 0,05 mGy, Median 0,14 mGy, Spanne 0,07-0,33 mGy) deutlich unter den DRW des Thorax-CT von Neugeborenen (CTDI_{vol} 1 mGy von 0 bis <3 Monaten, 1,5 mGy von drei bis zwölf Monaten) erreicht werden. Bei dieser Altersgruppe liegen Schilddrüse, Wirbelsäule/Rippen und Brustdrüse als strahlensensible Organe im Untersuchungsfeld.

Diese beiden Untersuchungen zeigen, dass in spezialisierten Abteilungen der Kinder- und Jugendradiologie die Innovationen in der Gerätetechnik gepaart mit individuell angepasster Untersuchungstechnik bei Kindern zu einer deutlichen Dosisreduktion führen können.

Um zukünftig eine stetige Überwachung der Dosiswerte und eine einfache Anpassung der DRW durch das BfS an die sich weiterentwickelnde Gerätetechnologie zu gewährleisten, sind nachfolgende Maßnahmen unbedingt wünschenswert:

- Implementation eines nationalen Dosisregisters (vergleichbar mit dem Dose Index Registry in den USA (NRDR)). Hier hat das BfS bereits eine entsprechende Machbarkeitsstudie in Auftrag gegeben. Mit dem Ergebnis kann bis Ende 2027 gerechnet werden. Bis dahin ist eine Verwendung von Dosisdaten aus Dosismanagement-Systemen zur Erstellung und Anpassung von DRW sinnvoll.
- Indikationsbasiert alters- und gewichtsbezogene DRW (vgl. Paulo et al. 2020, Tsapaki et al. 2021, SSK 2025b)
- Liste von Indikationen für CT-Untersuchungen von Kindern (vgl. SSK 2022, Tab. 1a und Tab. 1b)
- Nationale Protokollempfehlungen (ebenfalls indikationsbasiert) für CT-Untersuchungen von Kindern. Ein entsprechender Ansatz wurde in den USA mit der Initiative Image Gently (<http://www.imagegently.org/>) gestartet und intensiv beworben. Jedoch sind seit 2014 keine weiteren Aktualisierungen mehr vorgenommen worden, so dass hier ein großer Handlungsbedarf z. B. für Fachgesellschaften gesehen wird.
- Vereinheitlichung der Namenskonventionen für die Untersuchungsprotokolle (z. B. basierend auf RadLex, LOINC) bzw. das Mapping von Protokollklassen oder Körperregionen speziell für die steigende Anzahl kombinierter Untersuchungsregionen (wie Hals-Thorax, Thorax-Abdomen-Becken etc.).

3.3 Beurteilung risikobehafteter Gruppen

3.3.1 Kinder und Jugendliche im Vergleich zu Erwachsenen

Kinder und Jugendliche unterscheiden sich aufgrund schneller Zellteilung, Wachstumsprozessen und hormoneller Veränderungen während der Pubertät deutlich von Erwachsenen im durch ionisierende Strahlung bedingten Krebsrisiko. Wesentliche Evidenz zum direkten Vergleich des strahlenbedingten Krebsrisikos zwischen Kindern und Erwachsenen stammt aus der Life Span Study der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki (UNSCEAR 2013, Little et al. 2022a). Durch die gleichzeitige akute Exposition der Bevölkerung sind in dieser Studie allerdings das Alter bei Exposition und die Geburtskohorte untrennbar verknüpft.

Für die Gruppe der Leukämien ohne Chronisch Lymphatische Leukämie (CLL) und Adulte T-Zell-Leukämie (ATL) ergab sich in der LSS etwa 5 Jahre nach Exposition mit einer Knochenmarksdosis von 1 Gy für ein Alter bei Exposition von 10 Jahren ein zusätzliches relatives Inzidenzrisiko von ca. 50 (Hsu et al. 2013). Für ein Alter bei Exposition von 30 betrug das zusätzliche relative Risiko dagegen ca. 20. Auch das zusätzliche absolute Risiko sank mit steigendem Alter bei Exposition bis ca. 10 Jahre nach der Exposition. Für Subgruppen von Leukämien und für Lymphome war das Ergebnismuster komplexer (Little et al. 2022a, Hsu et al. 2013).

Als Gesamtgruppe betrachtet liegt sowohl für die Inzidenz als auch für die Mortalität klare Evidenz vor, dass das zusätzliche relative Risiko für eine gegebene Dosis mit steigendem Alter bei Exposition ca. 20-30 % pro Dekade abnimmt (Little et al. 2022a, UNSCEAR 2013). Das Ergebnismuster für das zusätzliche absolute Risiko ist ähnlich. Allerdings zeigen Analysen für einzelne Krebsentitäten, dass eine differenzierte Betrachtung notwendig ist. Für Schilddrüsenkrebs, Speicheldrüsenkrebs, weiblichen Brustkrebs, Gebärmutterkrebs (Endometriumkarzinom), nichtmelanozytären Hautkrebs und Gehirntumoren liegt Evidenz für die dargestellte Altersabhängigkeit vor. Dabei erweist sich spezifisch der Zeitraum der Pubertät als strahlensensible Periode für Brustkrebs und Gebärmutterkrebs. Dagegen zeigt das strahlenbedingte Risiko für Lungenkrebs oder Darmkrebs in der LSS keine solch Abhängigkeit vom Alter bei Exposition (Little et al. 2022a).

Für das weibliche Brustkrebsrisiko nach Strahlenexposition wurde auch in anderen Studien gezeigt, dass die Pubertät eine Entwicklungsphase mit höheren Strahlenrisiken ist (Ronckers et al. 2005, Cooke et al. 2013). Für andere Krebserkrankungen existiert bisher jedoch keine ausreichende Evidenz, dass die Pubertät eine spezifisch vulnerable Phase hinsichtlich der Strahlensensitivität darstellt. Dennoch sollte aufgrund der erhöhten Zellteilung und hormonellen Veränderungen in dieser Entwicklungsphase vorsorglich von einer gesteigerten Empfindlichkeit ausgegangen werden.

Mehrere epidemiologische Studien zeigen, dass eine CT-Exposition in der Kindheit das Risiko für hämato-onkologische Erkrankungen und Hirntumoren erhöhen kann. Details zu diesen Studien erläutert Abschnitt 3.1. Daher bleibt es essenziell, CT-Untersuchungen insbesondere bei Kindern kritisch zu hinterfragen und Alternativen gründlich zu prüfen. Die Prinzipien der Dosisreduktion gelten für alle Altersgruppen, jedoch mit altersgerechten Anpassungen. Während bei kleinen Kindern besonders auf die Minimierung der Strahlendosis jeder einzelnen CT-Untersuchung zu achten ist, liegt der Fokus bei Jugendlichen zusätzlich auf der Reduktion unnötiger Strahlenexposition durch mehrfache CT-Untersuchungen (Kalra et al. 2004). Technische Optimierungen der CT-Geräte und die Anpassung der Untersuchungsparameter an Größe und Gewicht der Kinder sowie Beschränkung der untersuchten Körperregionen ermöglichen eine deutliche Dosisreduktionen bei gleichbleibender diagnostischer Qualität (Kalra et al. 2011). Entsprechend der Empfehlungen der SSK (SSK 2022) sollte bei häufigem diagnostischem Einsatz ionisierender Strahlung (wie bei Personen mit onkologischen Erkrankungen) insbesondere bei Kindern der Einsatz von Verfahren ohne ionisierende Strahlung wie MRT und Sonografie bevorzugt werden.

Zu den Effekten eines höheren zusätzlichen relativen oder absoluten Strahlenrisikos in der Kindheit für eine Reihe von Krebserkrankungen kommt hinzu, dass Kinder aufgrund ihrer längeren Lebenserwartung nach einer Strahlenexposition mehr Zeit haben, um potenzielle Schäden wie strahleninduzierte Krebserkrankungen zu entwickeln.

Langzeitstudien und Krebsregister sind entscheidend, um das langfristige Krebsrisiko nach CT-Exposition bei Kindern genauer zu bestimmen und entsprechende Vorsorgemaßnahmen weiter zu verbessern (Brenner und Hall 2007). Betroffene Kinder und Jugendliche, die in einem jungen Alter hohen Strahlenexpositionen ausgesetzt waren, sollten langfristig überwacht werden, um potenziell strahleninduzierte Krebserkrankungen frühzeitig erkennen zu können (kinderkrebsinfo 2016).

Abschließend ist es entscheidend, Eltern, Sorgeberechtigte und medizinisches Personal umfassend über die potenziellen Risiken ionisierender Strahlung und verfügbare Alternativen der Bildgebung ohne ionisierende Strahlung aufzuklären, um unnötige CT-Untersuchungen zu vermeiden. Der diagnostische Nutzen sollte stets sorgfältig gegen das Risiko abgewogen und in verständlicher Form kommuniziert werden.

Nachfolgend wird auf verschiedene Gruppen eingegangen, die aufgrund ihres Alters und ihrer Stoffwechselaktivität bzw. genetisch bedingter Strahlensensibilität als besonders empfänglich für die negativen Auswirkungen ionisierender Strahlen eingeschätzt werden. Zu dieser Thematik liegt nur wenig gesichertes Datenmaterial vor. So erfassen beispielsweise die Krebsregister nicht, ob bei der betroffenen Person eine ehemalige Frühgeburtlichkeit vorliegt. Auch hat sich die Überlebenswahrscheinlichkeit extrem Frühgeborener erst in den letzten Jahrzehnten deutlich erhöht, so dass hier keine Langzeit-Follow-up-Studien vorliegen können. Erkenntnisse über die exakte Empfindlichkeit bei TPS sind noch sehr begrenzt; hinzu kommen bei diesen seltenen Erkrankungen die sehr geringen Fallzahlen.

3.3.2 Feten, Neugeborene und Säuglinge in Bezug zu Gewicht und Schwangerschaftswoche

Auch wenn die Auswertungen in Kapitel 3.1.4 keine höheren Risiken für jüngere im Vergleich zu älteren Kindern zeigten, wird vielfach angenommen, dass Feten und sehr junge Kinder eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit hinsichtlich Krebsinduktion zeigen. Neben einer insgesamt längeren Restlebenserwartung und damit einer höheren Wahrscheinlichkeit einen Tumor zu entwickeln, liegt ein Grund darin, dass ihr Körper aufgrund des geringen Alters eine aktive Zellproliferation sowie eine hohe Anzahl undifferenzierter Zellen aufweist. Daher werden diese im Folgenden genauer betrachtet.

3.3.2.1 Feten

Die pränatale Entwicklung des Menschen ist durch erhöhte Zellteilungsraten und Zellspezialisierung (Differenzierung) sowie Zellwanderungsprozesse (Migration) gekennzeichnet. Diese Prozesse können durch ionisierende Strahlung beeinträchtigt werden, was zur Annahme einer vergleichsweise hohen Strahlenempfindlichkeit des Embryos beziehungsweise Fetus während seiner gesamten intrauterinen Entwicklung führt (Fiebich et al. 2021). Die Wahrscheinlichkeit und Art der Folgen einer Strahlenexposition unterscheiden sich je nach Art und Intensität der Strahlung sowie dem Stadium der pränatalen Entwicklung zum Zeitpunkt der Exposition. Die Entwicklung des Fetus im Mutterleib wird häufig in drei Hauptentwicklungsstadien unterteilt: Präimplantationsphase (erste bis zweite Woche nach der Empfängnis, postkonzeptionell (p. c.)), Organbildungsphase (dritte bis achte Woche p. c.) und Fetalphase (ab neunte Woche p. c.).

Detaillierte Beschreibungen zu Effekten einer In-utero-Strahlenexposition wurden schon in der Vergangenheit von der Strahlenschutzkommission, ICRP und UNSCEAR bereitgestellt (UNSCEAR 1986, SSK 1989, ICRP 2000, ICRP 2003, Streffer et al. 2003, SSK 2025a).

Die quantitative Bewertung des Risikos einer malignen Erkrankung nach einer Exposition in utero wurde bislang von zwei Kohorten abgeleitet: Personen, die in utero als Folge der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki exponiert wurden und solche, deren Mütter sich während der Schwangerschaft einer Röntgen-Untersuchung des Bauchraumes oder des Beckens unterzogen hatten (Oxford Survey of Childhood Cancers (OSCC) Studie). Für eine aktuelle Zusammenfassung dieser Daten wird auf die Empfehlung „Effekte nach pränataler Strahlenexposition“ der SSK verwiesen (SSK 2025a). Demnach führen unterschiedliche Auswertungen und Annahmen bezüglich der mit den Röntgenaufnahmen verbundenen Dosen der OSCC zu Schätzungen der ERR pro Dosis für Krebserkrankungen im Alter bis 15 Jahren im Bereich von 13 Gy^{-1} bis 61 Gy^{-1} , wobei das EAR bei 1% bis 6 % pro Gy für Mortalität bzw. etwa halb so großen Werten für Inzidenz liegt. Für infolge der Atombombenexplosionen in utero exponierte Personen sind die geschätzten ERR-Werte deutlich geringer, was mit der verspätet begonnenen Analyse der Krebsmortalität unter den Atombombenopfern erklärbar ist. Die SSK wies in ihrer Empfehlung von 2025 darauf hin, dass die Risikoschätzer aus der OSCC vergleichbar sind mit Risikoprojektionen für das ERR nach CT-Untersuchungen im Kindes-

und Jugendalter, und schließt daraus, dass das Krebsrisiko von der späten Schwangerschaft über die Geburt hinaus in die frühe Kindheit gleichbleibt und erst mit zunehmendem Expositionsalter abnimmt (SSK 2025a). Auch die in Kapitel 3 dargestellten Risikoschätzer für Krebsinduktion nach CT-Untersuchungen im Kindesalter von ca. 2 pro 100 mGy sind – unter Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung – mit den OSCC-Daten in der Größenordnung vergleichbar.

Sowohl die OSCC als auch die Studie der in utero exponierten Atombombenüberlebenden haben Limitierungen, die eine Verbreiterung der Datenlage wünschenswert machen. Eine relativ aktuelle Recherche nach Studien zu Krebsrisiken infolge einer frühen diagnostischen Exposition gegenüber ionisierender Strahlung in den Datenbanken PubMed, Scopus, Web of Science, Global Health und EMBASE zwischen 2000 und 2019 kam auf Basis von 8 Studien (7 Fall-Kontroll-Studien und 1 Kohortenstudie) zu dem Ergebnis, dass bei pränataler Exposition im Zuge einer Röntgenaufnahme oder CT-Untersuchung kein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für alle Krebsarten, Leukämie und Hirntumoren nachgewiesen werden kann (Abalo et al. 2021), insbesondere auch nicht bei den inkludierten zwei CT-Studien (Bailey et al. 2010, Tettamanti et al. 2017). Dabei ist anzumerken, dass hier der Expositionsstatus der Mutter durch Fragebögen oder Interviews ermittelt wurde. Da die Dosen für den Fetus hierbei nicht geschätzt wurden, konnten in keiner der beiden Studien Dosis-Wirkungs-Analysen durchgeführt werden. Der Unterschied zwischen dem in der Metaanalyse von Abalo et al. 2021) geschätzten nicht erhöhten Krebsrisiko im Zusammenhang mit pränataler Bestrahlung (ja/nein) und dem aus früheren Studien geschätzten dosisabhängigen Risiko lässt sich durch die der Metaanalyse zugrunde liegende geringe Zahl von Fällen mit substantieller Exposition begründen. Diese wiederum beruht auf dem Rückgang der Röntgenfrequenz während der Schwangerschaft aufgrund der Umstellung auf nichtionisierende Verfahren wie Sonographie oder MRT, sowie auf der Verringerung der Dosis pro Aufnahme aufgrund der Festlegung und Verbesserung der Strahlenschutzvorschriften für Patienten.

3.3.2.2 Dosis beim Fetus

In einer (der ersten) retrospektiven Studie mit 50 schwangeren Personen wurden die Dosen für den Fetus nach radiologischer Untersuchung des Beckens bzw. Unterleibs bestimmt (Osei und Faulkner 1999). Das Ergebnis zeigte je nach Untersuchungsart erhebliche Variationen von weniger als 0,01 mGy bis 117 mGy (Gestationsalter: 2 – 24 Wochen). Die höchste mittlere fetale Dosis wurde infolge der CT des Beckens mit 89 mGy ermittelt. Die Mehrheit der Ungeborenen (etwa 68 %) befand sich in einer Schwangerschaftsphase von weniger als acht Wochen, 18 % zwischen acht und 15 Wochen.

Osei et al. haben 2003 das Programm FetDose zur Abschätzung der Strahlendosis für den Fetus beschrieben, welches die absorbierte Dosis und das Risiko für den Fetus aus konventionellen Röntgen- und Durchleuchtungsverfahren errechnet, die an schwangeren Patientinnen durchgeführt werden. Dieses kann auch zur Bestimmung der Dosis für den Fetus durch berufliche Exposition der schwangeren Arbeitnehmerin in der Radiologie benutzt werden (Osei et al. 2003). Die für die Berechnung der fetalen Dosis verwendeten normalisierten Uterusdosen stammen aus NRPB SR262 (Hart et al. 1991) und NRPB-SR250 (Jones und Shrimpton 1993). Mit Hilfe dieses Programms wurden die Expositionsdaten von 367 Feten und 414 Untersuchungen (aus fünf Einrichtungen in fünf Ländern) bestimmt (Osei et al. 2003, Osei und Darko 2013). Die Strahlendosen, denen die 367 Feten ausgesetzt waren, reichten von weniger als 0,001 mGy bei der Röntgenuntersuchung des Brustkorbs der schwangeren Mutter bis zu 21,9 mGy bei der CT-Untersuchung der Lendenwirbelsäule. Einige der Frauen wurden mehrfach untersucht (zwei bis vier verschiedene Untersuchungen an derselben Patientin), andere wurden wiederholt untersucht (zwei bis drei wiederholte Untersuchungen an derselben

Patientin), was zu erhöhten fetalen Dosen beitrug. Etwa 78 % (285) der untersuchten Feten erhielten Dosen von weniger als 1 mGy und etwa 4 % (16) von ihnen erhielten Strahlendosen von mehr als 10 mGy.

Eine weitere Bewertung der fetalen Strahlendosen und der Strahlendosen der schwangeren Person während CT-Untersuchungen lieferten Untersuchungen zu Strahlendosen während der CT-Pelvimetrie (Mokubangele et al. 2022). Diese Studie aus Kamerun (2017 bis 2019) schloss 194 schwangere Personen ein. Die durchschnittliche effektive Dosis der schwangeren Personen betrug 0,78 mSv, die mittlere individuelle Dosis beim Ungeborenen 1,5 mGy (Bereich: 0,76 mGy bis 1,87 mGy).

Eine relativ aktuelle Studie auf Grundlage von CT-Daten von 44 schwangeren Personen (Gestationsalter von 8 bis 35 Wochen) bestätigte absorbierte Strahlendosen für Ungeborene im Bereich von 0,97 und 2,24 mGy mit einem Durchschnitt von $1,63 \pm 0,33$ mGy (Qu et al. 2023). Dabei zeigte die normalisierte fetale Organdosis eine signifikante Korrelation mit dem Gestationsalter, dem Bauchumfang der schwangeren Person und der Lage des Fetus. Die Analyse der CT-Strahlendosis unter Berücksichtigung der Größe der zu untersuchenden Person (SSDE) aus CT-Scan- und 18F-FDG SUV (standardized uptake value) -Aufnahme-Dosen aus jeweiligen Bildern von 9 schwangeren Personen ergab eine fetale Dosis (fetal self-dose) aus 18F-FDG-PET für das erste Trimester von 2,18 mGy (einzelner Datenpunkt), für das zweite Trimester von 0,74 mGy bis 1,82 mGy und für das dritte Trimester von 0,017 mGy bis 0,0017 mGy. Dies liefert schließlich eine kombinierte SSDE und fetale Dosis von 1,2 mGy bis 8,2 mGy (Burton et al. 2023).

Auch wenn die genannten Studien nicht direkt vergleichbar sind, deuten sie auf eine deutliche Abnahme der Dosis am Fetus über die letzten Jahrzehnte hin.

3.3.2.3 Früh- und Neugeborene in Bezug zu Gewicht und Schwangerschaftswoche

Die Auswirkungen einer Strahlenexposition dürfen bei Neugeborenen generell, aber insbesondere bei Frühgeborenen, nicht unterschätzt werden. Aufgrund deren geringer Körpergröße befinden sich meist alle Organe im Strahlungsbereich, wodurch eine höhere effektive Dosis als bei Kindern und Erwachsenen auftritt.

Röntgenuntersuchungen sind insbesondere auf Neugeborenen-Intensivstationen für Diagnose, Behandlung und Statusüberwachung unverzichtbar geworden. CT-Scans können auch bei dieser Altersgruppe, aufgrund genauerer Diagnose, zu einer potenziell lebensrettenden und die Lebensqualität verbessernden Behandlung führen. Größere Daten zur Dosiserfassung bei CT-Untersuchungen von Neugeborenen liegen nicht vor, sodass man sich bezüglich Aussagen zur Dosisexposition in dieser Altersgruppe nur auf Röntgenuntersuchungen (vor allem des Thorax) beziehen kann.

Eine normale Schwangerschaft dauert zwischen 38 und 42 Wochen, von Frühgeburt wird bei weniger als 37 vollendeten Schwangerschaftswochen gesprochen, von extrem Frühgeborenen bei < 28 Schwangerschaftswochen. Ein zum errechneten Termin geborenes Kind, das weniger als 2 500 g wiegt, wird als Säugling/Neugeborenes mit niedrigem Geburtsgewicht (LBW, low birth weight) bezeichnet, unter 1 000 g als Neugeborenes mit extrem niedrigem Geburtsgewicht (VLBW, very low birth weight). Unter der Annahme, dass Feten ein höheres Risiko für Krebsinduktion zeigen könnten als Kinder, könnten extrem Frühgeborene und Neugeborene unter 1 000 g aufgrund der Unreife des fetalen Gewebes strahlenempfindlicher sein als Reifgeborene. Wie in Kapitel 3.3.2.2 ausgeführt, wird diese Annahme durch die vorliegenden Daten nicht unbedingt gestützt. Trotz der Unsicherheit hinsichtlich des genauen Risikograds, besteht jedoch Einigkeit darüber, dass alle möglichen Maßnahmen ergriffen werden sollten, um die Strahlenexposition bei der medizinischen Bildgebung für diese Neugeborenen zu

minimieren, sofern dadurch die diagnostische Genauigkeit und die Verfahrenssicherheit nicht beeinträchtigt werden (Toscan et al. 2024).

Im Jahr 2020 kamen weltweit schätzungsweise 13,4 Millionen Säuglinge zu früh (d. h. vor vollendeter 37. Schwangerschaftswoche) zur Welt (Ohuma et al. 2023). Frühgeborene sind anfälliger für unmittelbare und langfristige Morbidität und Mortalität als termingerecht geborene Neugeborene, wobei Komplikationen infolge der Frühgeburtlichkeit dabei die häufigste Todesursache bei Kindern unter fünf Jahren darstellen (Perin et al. 2022). Je kürzer die Schwangerschaftsdauer und je geringer das Geburtsgewicht sind, um so engmaschiger ist eine klinische Überwachung erforderlich. Röntgenuntersuchungen sind dabei für die Diagnose und Beurteilung dieser kranken Neugeborenen von entscheidender Bedeutung (Gislason-Lee 2021). Dies betrifft insbesondere Röntgenaufnahmen des Thorax, seltener des Abdomens, sowie Kontrastmitteluntersuchungen des Magen-Darm- oder des Uro-Genital-Traktes. Bei Verläufen mit Komplikationen kann auch die CT zum Einsatz kommen.

In einer retrospektiven Kohortenstudie wurde die medizinische Strahlenexposition von Frühgeborenen und termingerecht geborenen Kindern im Zeitraum von 2008 bis 2015 daraufhin geprüft, ob die effektive Dosis den Wert von 1 mSv überschritt (Hogan et al. 2018). Eingeschlossen wurden 2 047 Frühgeborene und 20 049 Reifgeborene. Es wurde gezeigt, dass für sehr früh und extrem Frühgeborene die Chance, den Wert von 1 mSv zu überschreiten, signifikant erhöht war (OR 1,85 [95 % KI: 1,03–3,32] bzw. 2,53 [95 % KI: 1,53–4,21]), während dies bei spät Frühgeborenen nicht der Fall war (OR 1,14 [95 % KI: 0,73–1,78]). Diese Überschreitung war bei 69 % der termingerecht Geborenen und 55 % der Frühgeborenen auf eine einzige CT-Untersuchung ($p < 0,001$) zurückzuführen. Der Anteil der Frühgeborenen mit mindestens einer Röntgenaufnahme von Thorax, Abdomen oder Hals war ungefähr doppelt so hoch wie der Anteil der termingerecht Geborenen. Auch noch im ersten Jahr nach Entlassung aus der Neonatologie waren deutlich mehr Frühgeborene einer Dosis von >1 mSv ausgesetzt (3,7 % vs. 1,7 %; $p < 0,001$) (Hogan et al. 2018). Kritisch anzumerken ist, dass anstelle der Summation der tatsächlich gemessenen Dosis einzelner Röntgenuntersuchungen, veröffentlichte Durchschnittswerte (Osei und Faulkner 1999) mit der Anzahl der einzelnen Aufnahme pro Patienten multipliziert wurden. Dies kann Unsicherheiten in den Angaben zu den tatsächlichen Organdosen bedingen. Ähnliche Beobachtungen wurden für 206 Frühgeborene mit sehr niedrigem Geburtsgewicht gemacht, wobei die effektive Dosis mithilfe eines Voxelbasierten Modells mit Dimensionen eines 8 Wochen alten Säuglings (Höhe 57 cm, Gewicht 4,2 kg) kalkuliert wurde (Ebenebe et al. 2019). Die mediane kumulative effektive Dosis in den Geburtsgewichtgruppen < 750 g und > 750 g bei Röntgenuntersuchungen betrug 210,6 μ Sv (68,4 μ Sv bis 882,6 μ Sv) beziehungsweise 43,5 μ Sv (3,6 μ Sv bis 537,6 μ Sv) (p -Wert $< 0,001$). Die mittlere effektive Dosis pro Bild lag bei 10,4 μ Sv (Bereich: 1,7 μ Sv bis 48,5 μ Sv) für Röntgenaufnahmen des Thorax, bei 12,5 μ Sv (Bereich: 2,8 μ Sv bis 38,7 μ Sv) für Röntgenaufnahmen des Abdomens und bei 18,6 μ Sv (Bereich: 3,8 μ Sv bis 48,0 μ Sv) für die Kombinationsaufnahme von Thorax und Abdomen. Bei Säuglingen mit einem Geburtsgewicht ≤ 750 g war die mediane kumulative effektive Dosis 3,5-mal höher als bei Säuglingen mit einem Geburtsgewicht von 751 g bis 1 000 g und sogar siebenmal höher als bei Säuglingen mit einem Geburtsgewicht von 1 251 g bis 1 500 g (Ebenebe et al. 2019). Dies zeigt insgesamt die Notwendigkeit effektiver Dosisüberwachungsprotokolle bei sehr unreifen Frühgeborenen, da ein sehr geringes Geburtsgewicht und somit das Vorhandensein von Komorbiditäten mit einer deutlich erhöhten Strahlenexposition einhergeht (Su et al. 2023, Ebenebe et al. 2019, Park et al. 2018).

In einer aktuelleren (retrospektiven) Studie wurde die Strahlenexposition und das damit einhergehende vorhergesagte Risiko von strahleninduzierter Krebsmortalität in Stichproben von Neu- und Frühgeborenen untersucht (Weiß et al. 2025). Von den 3 843 Neugeborenen

(Alter $241,1 \pm 35,45$ Tage) erhielten 1 307 (34 %) mindestens eine Röntgenuntersuchung, mit einer gemittelten Anzahl der Röntgenuntersuchungen pro Säugling von 3,19 (kumulative effektive Dosis von $23,7 \mu\text{Sv}$). Die Effektivdosis wurde aus dem Flächendosisprodukt nach der Methode von Elbakri (Elbakri 2014) unter Nutzung von Konversionsfaktoren abgeschätzt, die durch Spannung, Gewichtsklasse (500-6.000 g), Filter (3 mm Al, 0,1 mm Cu) und Art der Aufnahme (anterior-posterior, Thorax/Abdomen) determiniert wurden. Die Anzahl der Röntgenuntersuchungen wies eine negative Korrelation zum Geburtsgewicht auf. Es konnte eine Korrelation zwischen der Unreife des Frühgeborenen, der Anzahl der Röntgenuntersuchungen und der Strahlenexposition bestätigt werden. Die höchste Strahlenexposition trat dabei bei kombinierten Thorax-/Abdomenuntersuchungen auf, insbesondere bei Neugeborenen < 500 g (Weiß et al. 2025).

Bislang gibt es keine weiterführenden Beobachtungen zur Abschätzung des potenziellen Risikos strahleninduzierter Krebserkrankungen für Frühgeborene. In den Krebsregistern werden Daten zur Schwangerschaftsanamnese bislang nicht erfasst. Lediglich im Studienprotokoll der Therapieoptimierungsstudien der Akuten Lymphatischen Leukämie werden Daten zur Schwangerschaftsdauer erhoben. In der Studie zum Internationalen kooperativen Behandlungsprotokoll für Kinder und Jugendliche mit akuter lymphoblastischer Leukämie (AIEOP-BFM ALL 2009) von 2010 bis 2015 wurden insgesamt 284 ehemals Frühgeborene (< 37 Schwangerschaftswochen) eingeschlossen. Von den 2 217 in dieser Studie erfassten Personen mit ALL aus Deutschland waren 185 ehemals Frühgeborene, entsprechend 8,5 %. Extrem Frühgeborene (< 32 Schwangerschaftswochen) waren mit 1,2 % ($n = 26$) vertreten. Nach Angaben des Instituts für Qualitätssicherung und Transparenz im Gesundheitswesen (IQTIG) lag in dem Zeitraum der Anteil von Frühgeborenen in Deutschland bei 7,9 % und der Frühgeborenen < 32 Schwangerschaftswochen bei 1,0 %. Ein strenger Zusammenhang zwischen Frühgeburtslichkeit beziehungsweise extremer Frühgeburtslichkeit und der Häufigkeit von ALL im Kindesalter kann somit nicht bestätigt werden (persönliche Auskunft Prof. Martin Schrappe, Kiel, Leiter der Therapieoptimierungsstudie AIEOP-BFM-ALL 2017 nach EudraCT Kodierung: AIEOP-BFM 2017 2016-001935-12). Angaben zu durchgeführten Untersuchungen mit ionisierender Strahlung vor einer Malignomerkrankung werden in den Studienprotokollen der GPOH nicht erfasst.

3.3.3 Kinder mit Keimbahnmutation/TPS

Für Menschen mit verschiedenen Keimbahnmutationen/TPS kann von einer erhöhten Strahlenempfindlichkeit ausgegangen werden. Früherkennungsuntersuchungen bei Menschen mit TPS sollen an entsprechend ausgestatteten Zentren mit Expertise in der Bildgebung von Kindern und Jugendlichen und möglichst ohne Einsatz von ionisierender Strahlung erfolgen.

Krebs ist bei Kindern und Jugendlichen relativ selten (Ronckers et al. 2025). Bestimmte Tumorerhäufungen in Familien bzw. Mehrfacherkrankungen einer Person (Beidseitigkeit, Multifokalität, mehrere Arten), bestimmte klinische Zeichen (z. B. Café-au-lait-Flecken bei Neurofibromatose Typ I, Makroglossie bei Beckwith-Wiedemann-Syndrom), aber auch spezielle Entitäten (z. B. pleuropulmonales Blastom bei DICER1-Syndrom, Nebennierenkarzinom bei Li-Fraumeni-Syndrom) oder auch ein früheres Erkrankungsalter an einer bestimmten Tumorart legen den Verdacht auf eine genetisch determinierte Tumorerkrankung nahe (Jongmans et al. 2016). Für Krebserkrankungen bei Kindern und Jugendlichen werden in den letzten Jahren mehr und mehr genetische Risikofaktoren identifiziert, was für Früherkennung, generelle Diagnostik und Therapie genutzt werden kann (Ronckers et al. 2025).

Mehr als 50 verschiedene seltene Erkrankungen sind als TPS beschrieben. Diese wurden von der „American Association for Cancer Research“ (AACR) in neun Hauptgruppen unterteilt (Brodeur et al. 2017, Tabelle 3).

Tabelle 3: Die neun Hauptgruppen an TPS (nach der „American Association for Cancer Research“ (AACR))

Tumorprädispositionsgruppe	Spezifische Syndrome/Erbliche Erkrankung
Li-Fraumeni-Syndrom	Li-Fraumeni-Syndrom
Neurofibromatosen	Neurofibromatose Typ I und II, Schwannomatose
Hochwuchssyndrome und Wilms Tumor	Beckwith-Wiedemann-Syndrom/Hemihypertrophie, WAGR-Syndrom (Wilms-Tumor, Aniridie, Anomalien des Urogenitalsystems, geistige Retardierung), Denys-Drash- und Frasier-Syndrom, Perlman-Syndrom, Bohring-Opitz-Syndrom, Mulibrey-Nanismus, Simpson-Golabi-Behmel-Syndrom
Neurale Tumorsyndrome	Hereditäres Retinoblastom und Neuroblastom, Gorlin-Syndrom, Rhabdoid-TPS
Gastrointestinale Krebs syndrome	Familiäre adenomatöse Polyposis, Familiäre juvenile Polyposis, Peutz-Jeghers-Syndrom, Lynch-Syndrom
Neuroendokrine Syndrome	Multiple endokrine Neoplasiesyndrome, von Hippel-Lindau-Erkrankung, Hereditäres Paragangliom-Phäochromozytom-Syndrom, Familiäres medulläres Schilddrüsenkarzinom, Nebenschilddrüsenkarzinom-Syndrom
Leukämie-Prädispositionssyndrome	GATA2-Defizienz, Familiäre Thrombozytenkrankheit mit Prädisposition zu akuter myeloischer Leukämie, Trisomien 21
DNA-Instabilitätssyndrome	Bloom-Syndrom, Rothmund-Thomson-Syndrom, Ataxia teleangiectatica, Fanconi-Anämie
Sonstige Syndrome	DICER1-Syndrom, Costello-Syndrom, Weaver-Syndrom, Sotos-Syndrom, Rubinstein-Taybi-Syndrom, Schinzel-Giedion-Syndrom, Noonan-Syndrom, Tuberöse Sklerose Complex (TSC)

Beispielhaft werden nachfolgend die Leukämie-Prädispositionssyndrome näher betrachtet. (Hereditäre) Leukämie-Prädispositionssyndrome können basierend auf klinischen Merkmalen, biologischen Funktionen und betroffenen Signalwegen in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden, wobei einzelne Syndrome auch in andere TPS-Gruppen eingeordnet werden können (Saida 2017):

- Genetische Instabilität/DNA-Reparatur-Syndrome (beispielsweise das durch eine p53 Tumorsuppressorgen-Mutation verursachte Li-Fraumeni-Syndrom (LFI), das durch biallelische (homozygote) Veränderungen in den Mismatch-Reparatur-Genen veränderte konstitutionelle Mismatch-Repair-Defizienz-Syndrom (CMMRD), das durch WRN mutierte Werner-Syndrom sowie die sogenannten Chromosomenabbruch-Syndrome (Bloom-Syndrom, Fanconi-Anämie, Ataxia teleangiectatica / Louis-Bar-Syndrom, Nijmegen-Breakage-Syndrom)
- RAS-Signalweg-Dysfunktion (z. B. das durch Veränderungen im PTPN11-Gen verursachte Noonan-Syndrom, das ähnliche Casitas B-Lineage Lymphoma-Syndrom (CBL) sowie die Neurofibromatose Typ I (NFI, von Recklinghausen Krankheit)
- Knochenmarkversagen (z. B. die familiäre aplastische Anämie mit SRP72-Mutation, das durch die HAX 1-Mutation bedingte Kostman-Syndrom und die Thrombozytopenie mit ANKRD26-Mutation)

- Telomeropathien und Immunschwächesyndrome (z. B. die Mutationen im DKC1 oder TERT und TERC Gen verursachte Dyskeratosis congenita (Zinsser-Engman-Cole-Syndrom) oder Mutationen im sogenannten Wiskott-Aldrich-Syndrom-Gen (WAS))
- Anomalien in (hämatopoetischen) Transkriptionsfaktoren (z. B. Mutationen im RUNX1, GATA2, PAX5, SH2B3 oder ETV6-Gen)
- rein familiäre Leukämien (z. B. Keimbahnmutationen im GAT2, CEBPA, DDX41 oder RUNX1-Gen)
- Aneuploidien (z. B. Trisomie 21).

Eines der häufigsten genetischen Syndrome und einer der stärksten etablierten Risikofaktoren für (akute) Leukämie im Kindesalter ist das aus einer teilweisen oder vollständigen Trisomie des Chromosoms 21 verursachte Down-Syndrom (Shimada 2021). Die Häufigkeit von Down-Syndrom wird mit 1 in 800 Geburten beziffert, wobei die Zahl der in Deutschland lebenden Menschen mit Trisomie 21 auf ca. 50 000 und in den USA auf ca. 200 000 geschätzt wird (Avet-Loiseau et al. 1995, Bull 2020, Hoppen 2021). Für die Abbildung der transienten Myelopoese (TAM) als angenommener Vorläufer der myeloischen Leukämie im Zusammenhang mit Down-Syndrom ist zusätzlich zur Trisomie eine bestimmte genetische Mutation im Transkriptionsfaktor GATA1 nötig, wobei es in den fetalen Stamm- und/oder Vorläuferzellen ausschließlich zur Expression einer kürzeren Isoform, bekannt als GATA1s kommt (Wechsler et al. 2002). Ungefähr 10 % der Neugeborenen mit Down-Syndrom weisen eine transiente myeloproliferative Störung auf, von denen etwa 20 % bis 30 % nach dem Rückgang der TAM eine (akute myeloische) Leukämie entwickeln (Shimada 2021). Personen mit Down-Syndrom weisen ein geschätzt zehn- bis 20-fach höheres Risiko einer akuten Leukämie auf, wobei ein kumulatives Risiko an einer Leukämie zu erkranken bei Personen mit Down-Syndrom bis zum Alter von fünf Jahren mit 2,1 % und bis zum Alter von 30 Jahren mit 2,7 % bestimmt wurde (Roizen und Patterson 2003). Aufgrund von Komorbiditäten (z. B. angeborene Herzfehler, Anomalien des Nervensystems, des Bewegungsapparates) kann davon ausgegangen werden, dass bildgebende Verfahren gehäuft zum Einsatz kommen (AWMF 2025). Eine Analyse der Daten aus über vier Millionen Krankenakten von Kindern in sechs US-Gesundheitssystemen (1996 bis 2016, Teilkohorte der in Abschn. 3.1 beschriebenen RIC-Studie), von denen bei 3095 Down-Syndrom diagnostiziert wurde, ergab, dass Down-Syndrom-Kinder fast zehnmal so viele medizinische Bildgebungsuntersuchungen durchliefen wie andere Kinder (Marlow et al. 2023, AWMF 2025). Dabei wurden bei Down-Syndrom-Kindern im Alter von unter einem Jahr 9,5-mal (95 %-KI: 8,2–10,9) häufiger bildgebende Verfahren mit ionisierender Strahlung durchgeführt, im Alter zwischen einem und 18 Jahren 2,3-mal (95 %-KI: 2,0–2,5). Dabei war die ermittelte mittlere kumulative Knochenmarksdosis aus der Bildgebung (über einen Zeitraum von durchschnittlich 4,2 Jahren) bei Kindern mit Down-Syndrom doppelt so hoch wie bei anderen Kindern (4,7 mGy vs. 1,9 mGy) (Marlow et al. 2023). Daher ist ein Einsatz von Bildgebung mit ionisierender Strahlung bei diesen Kindern kritisch zu hinterfragen und die rechtfertigende Indikation besonders streng zu stellen.

Es ist allgemein akzeptiert, dass ein frühes Erkennen eines Tumors zu einem verbesserten klinischen Outcome, bei Kindern oft auch verbunden mit Heilung, führen kann. Deshalb wurden für TPS klinische Früherkennungs-Protokolle mit klinischen, biochemischen und bildgebenden Verfahren implementiert und evaluiert. Für das Li-Fraumeni-Syndrom konnte gezeigt werden, dass die Teilnahme an diesen Vorsorgen zu einem Fünf-Jahres-Überleben von 89 % im Vergleich zu 60 % in der nicht überwachten Gruppe führte (Villani et al. 2011). Generell hat sich bei 4 % der Personen mit einem Li-Fraumeni-Syndrom schon im ersten Lebensjahr ein Tumor entwickelt. Bis zum fünften Lebensjahr erhöht sich der Wert auf 22 % und bis zum 18. Lebensjahr auf 41 %. Es ist davon auszugehen, dass durch negative Umwelteinflüsse, aber auch

durch ionisierende Strahlung dieses Risiko eher noch erhöht wird. Für TPS ist in einigen Fällen eine besonders hohe Strahlenkanzerogenität bekannt. So entwickeln Personen mit Li-Fraumeni-Syndrom in 30 % der Fälle nach einer Strahlentherapie ein Malignom in der ehemals bestrahlten Region (Bougeard et al. 2015). Vergleichbares wurde bei Kindern mit hereditärem Retinoblastom und Neurofibromatose berichtet (Kleinerman 2009). Insgesamt sind Daten zu sekundären malignen Neoplasien, z. B. bei Personen mit Li-Fraumeni-Syndrom und vererbtem TP53-bedingtem Krebsyndrom nach wie vor rar, da es selten lange Nachbeobachtungen vor dem Auftreten sekundärer maligner Neoplasien gibt und die Prognose eher schlecht ist (Hendrickson et al. 2020). Es kann aber angenommen werden, dass einige TPS durch eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit gekennzeichnet sind, obwohl die Stärke der Korrelation zwischen Strahlenempfindlichkeit und Krebsprädisposition noch zu klären ist.

Eine erhöhte Strahlenempfindlichkeit konnte für Lymphozyten beim Nijmegen Breakage Syndrome verifiziert werden, ebenso Keimbahnveränderungen mit Funktionsverlust im Nibrin-Gen, einem Protein, das an der Reparatur von Doppelstrangbrüchen (DSBs) beteiligt ist (Walsh et al. 2017). Erhöhte Strahlenempfindlichkeit ist z. B. auch für die Ataxia teleangiectatica, das Rothmund-Thomson Syndrom u. a. seltene TPS beschrieben. Für Hoch-Dosis-Untersuchungen mit ionisierender Strahlung sind negative Strahleneffekte bezüglich Krebsinduktion generell bestätigt. Für Niedrig-Dosis-Untersuchungen gibt es nach einem systematischen Review unzureichend Evidenz, dass Leukämien, Lymphome, Hirn- und Schilddrüsen-Malignome bei Menschen mit TPS häufiger entstehen (Canet et al. 2022).

Unter Nutzung von PubMed, Scopus, Web of Science und EMBASE wurden epidemiologische Studien zum Krebsrisiko bei Menschen < 25 Jahre mit TPS ausgewertet, bei denen Untersuchungen mit niedriger (< 100 mGy) bis moderater Dosis (< 500 mGy) durchgeführt wurden. Aus der primären Literatursuche im Jahr 2020 von 16 315 Artikeln blieben schließlich nur 15 Publikationen für die Analyse, wobei zwei Beiträge dieselbe Studienpopulation beschrieben. Letztlich blieben acht Kohortenstudien und sechs Fall-Kontroll-Studien. In zehn Studien wurden die Effekte der diagnostischen Maßnahmen bewertet – CT in vier Studien, Thorax-Röntgen in sechs Studien. Allerdings waren auch diese Studien sehr heterogen, vor allem auch bezüglich der angegebenen Dosiswerte. Bezogen auf die Krebsarten fanden Canet et al. (2022) keine Evidenz bezüglich eines erhöhten Risikos (ERR) für Leukämie nach niedrig- bis moderater Dosisexposition (also Röntgen- und CT-Untersuchungen) bei Kindern mit entsprechendem TPS. Aufgrund der geringen Fallzahlen kann das Autorenteam aber einen Effekt nicht ausschließen und schlussfolgert, dass es keine ausreichende Evidenz bezüglich eines erhöhten Risikos für strahleninduzierte Leukämien bei TPS gibt. Vergleichbares wird für Lymphome und ZNS-Malignome beschrieben. Für Retinoblastom und für Schilddrüsenkarzinom wurde keine ausreichende Evidenz berichtet. Beim Mammakarzinom gibt es nach dem Review allerdings Studien, die für Träger der BRCA 1 oder 2 Mutation ein höheres Brustkrebsrisiko nach Niedrig-Dosis-Untersuchungen angeben, allerdings ist dieser Befund nicht konsistent. So wurde in Studien von Andrieu et al. (2006), Gronwald et al. (2008), Pijpe et al. (2012) und Lecarpentier et al. (2011) ein erhöhtes Risiko schon bei extrem niedriger Dosis (typischerweise äquivalent zu wenigen Tagen natürlicher Strahlenexposition) beschrieben, während John et al. (2013) das nicht bestätigen. Das mehrheitlich beschriebene höhere Risiko nimmt mit der Anzahl der Untersuchungen mit ionisierender Strahlung zu und ist am höchsten einzustufen, je geringer das Alter bei der Anwendung ist. Andere große Übersichtsarbeiten zum Zusammenhang zwischen CT-Exposition und Malignomerkrankung bei Kindern erfassen zwar auch TPS, allerdings nur in ihrer Gesamtzahl – auf die Heterogenität dieser seltenen Erkrankungen wurde bereits verwiesen (Journy et al. 2016a, Berrington de Gonzalez et al. 2016).

Eine Literaturrecherche bezüglich des Zusammenhangs zwischen Strahlenexposition durch CT-Scans und dem Risiko für Leukämie und Hirntumoren durch TPS – in Kombination mit

Expertenmeinungen – lässt mutmaßen, dass ein strahlenbedingtes relatives Risiko für Leukämie nicht wesentlich durch Down-Syndrom, Noonan-Syndrom und andere TPS verfälscht wird (Meulepas et al. 2016, Smith-Bindman et al. 2025a). Ähnliche Schlussfolgerungen ergaben sich für den tuberösen Sklerosekomplex, die von-Hippel-Lindau-Krankheit, die Neurofibromatose Typ 1 und andere TPS in Bezug auf Hirntumoren. Anzumerken ist hierbei, dass diese Schlussfolgerungen nur für Personen mit Down-Syndrom auf empirischer Evidenz beruht, die hier die RIC-Studie (Smith-Bindman et al. 2025a, Marlow et al. 2023) liefert. Sonst basieren die Schlussfolgerungen auf Annahmen über die CT-Nutzung bei Personen mit TPS, da derzeit abgesehen von der RIC-Studie keine robusten empirischen Daten vorliegen.

Alternativ zum Einsatz von bildgebenden Verfahren mit ionisierender Strahlung spielt im Konzept der Früherkennung bei den TPS neben der Sonografie insbesondere die Ganzkörper-MRT zunehmend eine wichtige Rolle (Greer et al. 2017). Die S1-Leitlinie der Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie zur Ganzkörper (GK)-MRT (AWMF 2021a) sieht die TPS als relevante Indikation für diese Methode. Für verschiedene TPS gibt es mittlerweile auch Protokollempfehlungen bezüglich des Untersuchungsumfangs und der Frequenz der Ganzkörper-MRT (z. B. Li-Fraumeni-Syndrom jährliche GK-MRT, NF I Baseline-Scan zwischen 16 und 20 Jahren, Hereditäres Retinoblastom jährlich ab 8 Jahre). Beim Li-Fraumeni-Syndrom schreibt das Toronto-Protokoll neben jährlicher GK-MRT eine MRT des ZNS jährlich und Ultraschalluntersuchungen von Abdomen und Becken alle drei bis vier Monate vor (Kratz et al. 2017). Beim CMMRD-Syndrom (konstitutionelles Mismatch-Repair-Defizienz-Syndrom), das aufgrund wiederkehrender und unterschiedlicher maligner Tumoren eine sehr schlechte Prognose hat (mittlere Überlebenszeit < 30 Monate nach Diagnose), wird die jährliche GK-MRT ab einem Alter von sechs Jahren empfohlen, dazu Schädel-MRT, Abdomensonografie halbjährlich, Endoskopie jährlich (Tabori et al. 2017).

Auch bei der GK-MRT sind bestimmte Risiko- und Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen (z. B. Feldstärke, Hochfrequenzfelder, Kontrastmittel), ebenso die Möglichkeit zu falsch positiven Befunden, die dann mit dezidierten Lokal-MRT-Untersuchungen beziehungsweise durch Kombination der MRT mit funktionellen Methoden wie der Positronen-Emissions-Tomografie (PET-MRT) zu verifizieren sind. Nicht zuletzt aufgrund der sehr niedrigen Inzidenz dieser Erkrankungen und Syndrome soll die Diagnostik an entsprechend personell und technisch ausgestatteten Zentren für seltene Erkrankungen erfolgen. Risiken durch Sedierung beziehungsweise Narkose für die MRT-Untersuchungen sind ebenfalls zu berücksichtigen und gegenüber dem Strahlenrisiko abzuwägen. Prinzipiell gilt für Kinder mit TPS, dass Screening- bzw. Früherkennungsuntersuchungen jahrelang erforderlich sind, aufgrund dieser Frequenz möglichst ohne ionisierende Strahlung.

Literatur

- Abalo et al. 2021 Abalo KD, Rage E, Leuraud K, Richardson DB, Le Pointe HD, Laurier D, Bernier MO. Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol*. 2021 Jan;51(1):45-56, doi: 10.1007/s00247-020-04803-0, Epub 20200910
- Abuhamed et al. 2025 Abuhamed J, Nikkilä A, Raitanen J, Lohi O, Auvinen A. Risk of childhood brain tumors after exposure to CT radiation: A nationwide population-based case-control study in Finland. *Int J Cancer*. 2025 Jun 1;156(11):2148-57, doi: 10.1002/ijc.35318, Epub 20241229
- Achenbach et al. 2012 Achenbach S, Barkhausen J, Beer M, Beerbaum P, Dill T, Eichhorn J, Fratz S, Gutberlet M, Hoffmann M, Huber A, Hunold P, Klein C, Krombach G, Kreitner KF, Kühne T, Lotz J, Maintz D, Mahrholdt H, Merkle N, Messroghli D, Miller S, Paetsch I, Radke P, Steen H, Thiele H, Sarikouch S, Fischbach R. [Consensus recommendations of the German Radiology Society (DRG), the German Cardiac Society (DGK) and the German Society for Pediatric Cardiology (DGPK) on the use of cardiac imaging with computed tomography and magnetic resonance imaging]. *Rofo*. 2012 Apr;184(4):345-68, doi: 10.1055/s-0031-1299400, Epub 20120317
- ACR 2019 American College of Radiology (ACR). ACR–ASER–SCBT–MR–SPR PRACTICE PARAMETER FOR THE PERFORMANCE OF PEDIATRIC COMPUTED TOMOGRAPHY (CT). <https://gravitas.acr.org/PPTS/GetDocumentView?docId=77>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- Andrieu et al. 2006 Andrieu N, Easton DF, Chang-Claude J, Rookus MA, Brohet R, Cardis E, Antoniou AC, Wagner T, Simard J, Evans G, Peock S, Fricker JP, Nogues C, Van't Veer L, Van Leeuwen FE, Goldgar DE. Effect of chest X-rays on the risk of breast cancer among BRCA1/2 mutation carriers in the international BRCA1/2 carrier cohort study: a report from the EMBRACE, GENEPSO, GEO-HEBON, and IBCCS Collaborators' Group. *J Clin Oncol*. 2006 Jul 20;24(21):3361-6, doi: 10.1200/jco.2005.03.3126, Epub 20060626
- Avet-Loiseau et al. 1995 Avet-Loiseau H, Mechinaud F, Harousseau JL. Clonal hematologic disorders in Down syndrome. A review. *J Pediatr Hematol Oncol*. 1995 Feb;17(1):19-24, doi: 10.1097/00043426-199502000-00003

- AWMF 2016a Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Hepatoblastom. Version: 7.0, Stand: 02.06.2016, gültig bis: 01.06.2021 (in Überarbeitung).
<https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/025-011>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2016b Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Nephroblastom (Wilms-Tumor). Version: 8.0, Stand: 14.06.2016, gültig bis: 13.06.2021 (in Überarbeitung). <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/025-004>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2019 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Trauma des muskuloskelettalen Systems im Kindes- und Jugendalter – Bildgebende Diagnostik. Version: 1.0, Stand: 01.06.2019, gültig bis: 31.05.2024 (in Überarbeitung). <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/064-019>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2020 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S2k-Leitlinie Polytraumaversorgung im Kindesalter. Version 2.1, Stand: 31.10.2020, gültig bis 30.10.2025. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/006-120>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2021a Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Ganzkörper-magnetresonanztomografie im Kindes- und Jugendalter. Version 2.0. Stand: 31.10.2021. Gültig bis: 31.10.2024 (in Überarbeitung). <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/064-018>, zuletzt aufgerufen am 28.04.2025
- AWMF 2021b Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Ewing-Sarkom des Kinder- und Jugendalters. Version: 8.0, Stand: 31.12.2021, gültig bis: 31.12.2026. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/025-006>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2021c Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Osteosarkome. Stand: 30.06.2021, gültig bis: 29.06.2026. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/025-005>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2022 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S2k-Leitlinie Schädel-Hirn-Trauma im Kindes- und Jugendalter. Version 3.2, Stand: 14.02.2022, red. überarbeitet am 01.03.2023, gültig bis 13.02.2027. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/024-018>, zuletzt aufgerufen am 02.12.2024

- AWMF 2023 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S1-Leitlinie Rhabdomyosarkome. Version: 8.0, Stand: 31.07.2023, gültig bis: 30.07.2028. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/025-007>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- AWMF 2025 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S2k-Leitlinie Down-Syndrom im Kindes- und Jugendalter. In Überarbeitung. Geplante Fertigstellung: 31.03.2025. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/027-051>, zuletzt aufgerufen am 28.04.2025
- Badampudi et al. 2015 Badampudi D, Wohlin C, Petersen K Hrsg. 19th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. 2015
- Bellamy et al. 2024 Bellamy MB, Bernstein JL, Cullings HM, French B, Grogan HA, Held KD, Little MP, Tekwe CD. Recommendations on statistical approaches to account for dose uncertainties in radiation epidemiologic risk models. *Int J Radiat Biol.* 2024;100(10):1393-404, doi: 10.1080/09553002.2024.2381482, Epub 20240726
- Berrington de Gonzalez et al. 2009 Berrington de Gonzalez A, Mahesh M, Kim KP, Bhargavan M, Lewis R, Mettler F, Land C. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Arch Intern Med.* 2009 Dec 14;169(22):2071-7, doi: 10.1001/archinternmed.2009.440, Epub 2009/12/17
- Berrington de Gonzalez et al. 2016 Berrington de Gonzalez A, Salotti JA, McHugh K, Little MP, Harbron RW, Lee C, Ntowe E, Braganza MZ, Parker L, Rajaraman P, Stiller C, Stewart DR, Craft AW, Pearce MS. Relationship between paediatric CT scans and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: assessment of the impact of underlying conditions. *Br J Cancer.* 2016 Feb 16;114(4):388-94, doi: 10.1038/bjc.2015.415
- BfS 2022 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenanwendungen. Vom 17. November 2022. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion/drw-roentgen.pdf?__blob=publicationFile&v=13, zuletzt aufgerufen am 22.01.2025
- BfS 2025 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). CT-Untersuchungen vor der Schwangerschaft: Negative Auswirkungen auf Verlauf der Schwangerschaft und Gesundheit des Kindes? <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/medizin/stellungnahmen/auswirkungen-ct-schwangerschaft.html>, zuletzt aufgerufen am 28.10.2025

- Bochtler et al. 2018 Bochtler T, Haag GM, Schott S, Kloor M, Krämer A, Müller-Tidow C. Hematological Malignancies in Adults With a Family Predisposition. *Dtsch Arztebl Int.* 2018 Dec 14;115(50):848-54, doi: 10.3238/arztebl.2018.0848, Epub 2019/02/07
- Boice 2015 Boice JD, Jr. Radiation epidemiology and recent paediatric computed tomography studies. *Ann ICRP.* 2015 Jun;44(1 Suppl):236-48, doi: 10.1177/0146645315575877, Epub 20150324
- Bosch de Basea Gomez et al. 2023 Bosch de Basea Gomez M, Thierry-Chef I, Harbron R, Hauptmann M, Byrnes G, Bernier MO, Le Cornet L, Dabin J, Ferro G, Istad TS, Jahnen A, Lee C, Maccia C, Malchair F, Olerud H, Simon SL, Figuerola J, Peiro A, Engels H, Johansen C, Blettner M, Kaijser M, Kjaerheim K, Berrington de Gonzalez A, Journy N, Meulepas JM, Moissonnier M, Nordenskjöld A, Pokora R, Ronckers C, Schuz J, Kesminiene A, Cardis E. Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults. *Nat Med.* 2023 Dec;29(12):3111-9, doi: 10.1038/s41591-023-02620-0, Epub 2023/11/10
- Bosch de Basea et al. 2015 Bosch de Basea M, Pearce MS, Kesminiene A, Bernier MO, Dabin J, Engels H, Hauptmann M, Krille L, Meulepas JM, Struelens L, Baatout S, Kaijser M, Maccia C, Jahnen A, Thierry-Chef I, Blettner M, Johansen C, Kjaerheim K, Nordenskjöld A, Olerud H, Salotti JA, Andersen TV, Vrijheid M, Cardis E. EPI-CT: design, challenges and epidemiological methods of an international study on cancer risk after paediatric and young adult CT. *J Radiol Prot.* 2015 Sep;35(3):611-28, doi: 10.1088/0952-4746/35/3/611, Epub 20150730
- Bosch de Basea et al. 2016 Bosch de Basea M, , Salotti JA, , Pearce MS, , Muchart J, , Riera L, , Barber I, , Pedraza S, , Pardina M, , Capdevila A, , Espinosa A, , Cardis E, . 2016. Trends and patterns in the use of computed tomography in children and young adults in Catalonia — results from the EPI-CT study. In: Springer Verlag. S. 119-29
- Bougeard et al. 2015 Bougeard G, Renaux-Petel M, Flaman JM, Charbonnier C, Fermey P, Belotti M, Gauthier-Villars M, Stoppa-Lyonnet D, Consolino E, Brugières L, Caron O, Benusiglio PR, Bressac-de Paillerets B, Bonadona V, Bonaïti-Pellié C, Tinat J, Baert-Desurmont S, Frebourg T. Revisiting Li-Fraumeni Syndrome From TP53 Mutation Carriers. *J Clin Oncol.* 2015 Jul 20;33(21):2345-52, doi: 10.1200/jco.2014.59.5728, Epub 20150526
- Brady et al. 2016 Brady Z, Forsythe AV, Mathews JD. The changing use of pediatric CT in Australia. *Pediatr Radiol.* 2016 Jul;46(8):1199-208, doi: 10.1007/s00247-016-3563-5, Epub 20160307

- Brenner et al. 2001 Brenner D, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol.* 2001 Feb;176(2):289-96, doi: 10.2214/ajr.176.2.1760289, Epub 2001/02/13
- Brenner und Hall 2007 Brenner DJ, Hall EJ. 2007. Computed Tomography - An Increasing Source of Radiation Exposure. In. S. 2277-84
- Brodeur et al. 2017 Brodeur GM, Nichols KE, Plon SE, Schiffman JD, Malkin D. Pediatric Cancer Predisposition and Surveillance: An Overview, and a Tribute to Alfred G. Knudson Jr. *Clin Cancer Res.* 2017 Jun 1;23(11):e1-e5, doi: 10.1158/1078-0432.Ccr-17-0702
- Bull 2020 Bull MJ. Down Syndrome. *N Engl J Med.* 2020 Jun 11;382(24):2344-52, doi: 10.1056/NEJMra1706537
- Burton et al. 2023 Burton CS, Frey K, Fahey F, Kaminski MS, Brown RKJ, Pohlen JM, Shulkin BL. Fetal Dose from PET and CT in Pregnant Patients. *J Nucl Med.* 2023 Feb;64(2):312-9, doi: 10.2967/jnumed.122.263959, Epub 20220908
- Canet et al. 2022 Canet M, Harbron R, Thierry-Chef I, Cardis E. Cancer Effects of Low to Moderate Doses of Ionizing Radiation in Young People with Cancer-Predisposing Conditions: A Systematic Review. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2022 Oct 4;31(10):1871-89, doi: 10.1158/1055-9965.Epi-22-0393
- Cao et al. 2022 Cao C-F, Ma K-L, Shan H, Liu T-F, Zhao S-Q, Wan Y, Jun Z, Wang H-Q. CT Scans and Cancer Risks: A Systematic Review and Dose-response Meta-analysis. *BMC Cancer.* 2022 2022/11/30;22(1):1238, doi: 10.1186/s12885-022-10310-2
- Carroll et al. 2006 Carroll RJ, Ruppert D, Stefanski LA, Crainiceanu CM. Measurement Error in Nonlinear Models: A Modern Perspective. Chapman and Hall/CRC, 2006, ISBN 9781420010138
- Chodick et al. 2006 Chodick G, Ronckers C, Ron E, Shalev V. The utilization of pediatric computed tomography in a large Israeli Health Maintenance Organization. *Pediatr Radiol.* 2006 Jun;36(6):485-90, doi: 10.1007/s00247-005-0091-0, Epub 20060322
- Chu et al. 2023 Chu PW, Kofler C, Mahendra M, Wang Y, Chu CA, Stewart C, Delman BN, Haas B, Lee C, Bolch WE, Smith-Bindman R. Dose length product to effective dose coefficients in children. *Pediatr Radiol.* 2023 Jul;53(8):1659-68, doi: 10.1007/s00247-023-05638-1, Epub 20230316
- COCIR 2023 European Coordination Committee of the Radiological, Electromedical and Healthcare Information Technology (IT) - Industry (COCIR). COCIR Medical Imaging Equipment Age Profile & Density - 2023 Edition. <https://www.cocir.org/publication/cocir-medical-imaging-equipment-age-profile-density-2023-edition-2/>, zuletzt aufgerufen am 28.04.2026

- Cooke et al. 2013 Cooke R, Jones ME, Cunningham D, Falk SJ, Gilson D, Hancock BW, Harris SJ, Horwich A, Hoskin PJ, Illidge T, Linch DC, Lister TA, Lucraft HH, Radford JA, Stevens AM, Syndikus I, Williams MV, Swerdlow AJ. Breast cancer risk following Hodgkin lymphoma radiotherapy in relation to menstrual and reproductive factors. *Br J Cancer*. 2013 Jun 11;108(11):2399-406, doi: 10.1038/bjc.2013.219, Epub 20130507
- Cooper 2000 Cooper GM. *The Development and Causes of Cancer. The Cell: A Molecular Approach*. 2nd edition. Sinauer Associates, Sunderland (MA), 2000
- Council 2006 Council NR. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*. The National Academies Press, Washington, DC, 2006 422°Seiten, ISBN 978-0-309-09156-5
- Daltveit et al. 2025 Daltveit DS, Morgan E, Colombet M, Steliarova-Foucher E, Bendahhou K, Marcos-Gragera R, Rongshou Z, Smith A, Wei H, Soerjomataram I. Global patterns of leukemia by subtype, age, and sex in 185 countries in 2022. *Leukemia*. 2025 Feb;39(2):412-9, doi: 10.1038/s41375-024-02452-y, Epub 20241120
- Destatis Destatis. Fachserie. 12, Gesundheit. 6, Krankenhäuser. 1.1, Grunddaten der Krankenhäuser.
[https://www .statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000124](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000124), zuletzt aufgerufen am 11.04.2025
- Dickman et al. 2003 Dickman PW, Holm L-E, Lundell G, Boice Jr. JD, Hall P. Thyroid cancer risk after thyroid examination with 131I: A population-based cohort study in Sweden. *International Journal of Cancer*. 2003;106(4):580-7, doi: <https://doi.org/10.1002/ijc.11258>
- Dreger et al. 2015 Dreger S, Poettgen S, Samkange-Zeeb F, Merzenich H, Ningo A, Breckow J, Zeeb H. Retrospective assessment of self-reported exposure to medical ionizing radiation: results of a feasibility study conducted in Germany. *BMC Res Notes*. 2015 Jul 10;8:300, doi: 10.1186/s13104-015-1268-8, Epub 20150710
- Ebenebe et al. 2019 Ebenebe CU, Barreau C, Waschkewitz J, Schlattl H, Pinnschmidt HO, Deindl P, Singer D, Herrmann J. Radiation exposure by digital radiographic imaging in very low birth weight infants. *J Perinatol*. 2019 Jan;39(1):115-9, doi: 10.1038/s41372-018-0276-7, Epub 20181120
- Elbakri 2014 Elbakri IA. Estimation of dose-area product-to-effective dose conversion factors for neonatal radiography using PCXMC. *Radiat Prot Dosimetry*. 2014 Jan;158(1):43-50, doi: 10.1093/rpd/nct192, Epub 20130728

- Erdmann et al. 2019 Erdmann F, Ghantous A, Schüz J. Environmental Agents and Childhood Cancer☆. In: Nriagu J, Hrsg. Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition) Elsevier, Oxford, 2019, Seiten 347-59, ISBN 978-0-444-63952-3
- ESPR ESPR. CT & Dose. <https://www.espr.org/taskforces/ct-dose/>, zuletzt aufgerufen am 25.04.2025
- Esser et al. 2018 Esser M, Hess S, Teufel M, Kraus MS, Schneeweiß S, Gatidis S, Schaefer JF, Tsiflikas I. Radiation Dose Optimization in Pediatric Chest CT: Major Indicators of Dose Exposure in 1695 CT Scans over Seven Years. *Rofo*. 2018 Dec;190(12):1131-40, doi: 10.1055/a-0628-7222, Epub 2018/10/12
- European Commission 2018 European Commission. European Guidelines on Diagnostic Reference Levels for Paediatric Imaging. Radiation Protection 185. Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-89876-1
- Farkas et al. 1992 Farkas LG, Posnick JC, Hreczko TM. Anthropometric growth study of the head. *Cleft Palate Craniofac J*. 1992 Jul;29(4):303-8, doi: 10.1597/1545-1569_1992_029_0303_agsoth_2.3.co_2, Epub 1992/07/01
- Fiebich et al. 2021 Fiebich M, Block A, Borowski M, Geworski L, Happel C, Kamp A, Lenzen H, Mahnken AH, Müller WU, Östreicher G, Rudolf F, Stamm G, Starck P, Steiniger B, Wicke JH, Wolf U, Wucherer M, Zankl M, Zink K, Zweig C. Prenatal radiation exposure in diagnostic and interventional radiology. *Röfo*. 2021 Jul;193(7):778-86, doi: 10.1055/a-1313-7527, Epub 2020/12/16
- Francone et al. 2022 Francone M, Gimelli A, Budde RPJ, Caro-Dominguez P, Einstein AJ, Gutberlet M, Maurovich-Horvat P, Miller O, Nagy E, Natale L, Peebles C, Petersen SE, Semple T, Valverde I, Voges I, Secinaro A, Di Salvo G. Radiation safety for cardiovascular computed tomography imaging in paediatric cardiology: a joint expert consensus document of the EACVI, ESCR, AEPC, and ESPR. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*. 2022;23(8):e279-e89, doi: 10.1093/ehjci/jeac048
- Frush 2011 Frush DP. The role of CT in professionalism: accreditation, certification and the welfare of our children. *Pediatr Radiol*. 2011 Sep;41 Suppl 2:571-5, doi: 10.1007/s00247-011-2100-9, Epub 2011/08/17
- Galanski et al. 2006 Galanski M, Nagel HD, Stamm G. 2006. Pädiatrische CT-Expositionspraxis in der Bundesrepublik Deutschland. http://sasrad.de/data/documents/Report_Paed-CT-Umfrage_2005_06.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.04.2026

- Garcia et al. 2023 Garcia TB, Kliemt R, Claus F, Neumann A, Soltmann B, Baum F, Schwarz J, Swart E, Schmitt J, Pfennig A, Häckl D, Weinhold I. Agreement between self-reports and statutory health insurance claims data on healthcare utilization in patients with mental disorders. BMC Health Serv Res. 2023 Nov 11;23(1):1243, doi: 10.1186/s12913-023-10175-6, Epub 20231111
- GBE Gesundheitsberichterstattung (GBE). Die umfangreichste Datensammlung über unser Gesundheitswesen. <https://www.gbe-bund.de/gbe/>, zuletzt aufgerufen am 11.04.2025
- Gislason-Lee 2021 Gislason-Lee AJ. Patient X-ray exposure and ALARA in the neonatal intensive care unit: Global patterns. Pediatr Neonatol. 2021 Jan;62(1):3-10, doi: 10.1016/j.pedneo.2020.10.009, Epub 20201118
- Glutig et al. 2021 Glutig K, Pfeil A, Renz DM. Bildgebung bei Tumorprädispositionssyndromen. Der Radiologe. 2021 2021/07/01;61(7):658-66, doi: 10.1007/s00117-021-00861-z
- Gohmann et al. 2022 Gohmann RF, Sieren MM, Gutberlet M. [Computed tomography and magnetic resonance imaging in cardiac diagnostics-how to choose the right modality : A guide based on the new guidelines of the European Society of Cardiology (ESC)]. Radiologie (Heidelb). 2022 Nov;62(11):902-11, doi: 10.1007/s00117-022-01066-8, Epub 20221012
- Greer et al. 2017 Greer MC, Voss SD, States LJ. Pediatric Cancer Predisposition Imaging: Focus on Whole-Body MRI. Clin Cancer Res. 2017 Jun 1;23(11):e6-e13, doi: 10.1158/1078-0432.Ccr-17-0515

Gröbner et al. 2018

Gröbner SN, Worst BC, Weischenfeldt J, Buchhalter I, Kleinheinz K, Rudneva VA, Johann PD, Balasubramanian GP, Segura-Wang M, Brabetz S, Bender S, Hutter B, Sturm D, Pfaff E, Hübschmann D, Zipprich G, Heinold M, Eils J, Lawerenz C, Erkek S, Lambo S, Waszak S, Blattmann C, Borkhardt A, Kühlen M, Eggert A, Fulda S, Gessler M, Wegert J, Kappler R, Baumhoer D, Burdach S, Kirschner-Schwabe R, Kontny U, Kulozik AE, Lohmann D, Hettmer S, Eckert C, Bielack S, Nathrath M, Niemeyer C, Richter GH, Schulte J, Siebert R, Westermann F, Molenaar JJ, Vassal G, Witt H, Lichter P, Weber U, Eils R, Korshunov A, Witt O, Pfister S, Reifenberger G, Felsberg J, von Kalle C, Schmidt M, Bartholomä C, Taylor M, Pfister S, Jones D, Lichter P, Jäger N, Buchhalter I, Korbel J, Stütz A, Rausch T, Radlwimmer B, Yaspo M-L, Lehrach H, Warnatz H-J, Landgraf P, Borkhardt A, Brors B, Zapatka M, Eils R, Eils R, Eils J, Lawerenz C, Siebert R, Wagner S, Haake A, Richter J, Richter G, Eils R, Lawerenz C, Eils J, Kerssemakers J, Jaeger-Schmidt C, Scholz I, Bergmann AK, Borst C, Burkhardt B, Claviez A, Dreyling M, Eberth S, Einsele H, Frickhofen N, Haas S, Hansmann M-L, Karsch D, Kneba M, Lisfeld J, Mantovani-Löffler L, Rohde M, Ott G, Stadler C, Staib P, Stilgenbauer S, Trümper L, Zenz T, Hansmann M-L, Kube D, Küppers R, Weniger M, Hummel M, Klapper W, Kostezka U, Lenze D, Möller P, Rosenwald A, Ott G, Szczepanowski M, Ammerpohl O, Aukema SM, Binder V, Borkhardt A, Haake A, Hoell JI, Leich E, Lichter P, López C, Nagel I, Pischimariov J, Radlwimmer B, Richter J, Rosenstiel P, Rosenwald A, Schilhabel M, Schreiber S, Vater I, Wagener R, Siebert R, Bernhart SH, Binder H, Brors B, Doose G, Eils R, Hoffmann S, Hopp L, Hübschmann D, Kleinheinz K, Kretzmer H, Kreuz M, Korbel J, Langenberger D, Loeffler M, Rosolowski M, Schlesner M, Stadler PF, Sungalee S, Burkhardt B, Kratz CP, Witt O, van Tilburg CM, Kramm CM, Fleischhack G, Dirksen U, Rutkowski S, Frühwald M, von Hoff K, Wolf S, Klingebiel T, Koscielniak E, Landgraf P, Koster J, Resnick AC, Zhang J, Liu Y, Zhou X, Waanders AJ, Zwijsen DA, Raman P, Brors B, Weber UD, Northcott PA, Pajtler KW, Kool M, Piro RM, Korbel JO, Schlesner M, Eils R, Jones DTW, Lichter P, Chavez L, Zapatka M, Pfister SM, Project IP-S, Project IM-S. The landscape of genomic alterations across childhood cancers. *Nature*. 2018 2018/03/01;555(7696):321-7, doi: 10.1038/nature25480

Gronwald et al. 2008

Gronwald J, Pijpe A, Byrski T, Huzarski T, Stawicka M, Cybulski C, van Leeuwen F, Lubiński J, Narod SA. Early radiation exposures and BRCA1-associated breast cancer in young women from Poland. *Breast Cancer Research and Treatment*. 2008 2008/12/01;112(3):581-4, doi: 10.1007/s10549-008-9892-9

- Han et al. 2025 Han S, Soh J, Nah S, Han K, Jung JH, Park J, Hwang Y, Lee C, Hong JY. Pediatric computed tomography scan and subsequent risk of malignancy: a nationwide population-based cohort study in Korea using National Cancer Institute dosimetry system for computed tomography (NCICT). *BMC Med.* 2025 Jul 1;23(1):355, doi: 10.1186/s12916-025-04235-3, Epub 20250701
- Hart et al. 1991 Hart D, Jones D, Wall B. 1991. Normalized organ doses for medical x-ray examinations calculated using Monte Carlo techniques. In. National Radiological Protection Board, Harwell (United Kingdom)
- Hasle et al. 2000 Hasle H, Clemmensen IH, Mikkelsen M. Risks of leukaemia and solid tumours in individuals with Down's syndrome. *Lancet.* 2000 Jan 15;355(9199):165-9, doi: 10.1016/S0140-6736(99)05264-2, Epub 2000/02/16
- Hauptmann et al. 2020 Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E, Cullings HM, Kendall G, Laurier D, Linet MS, Little MP, Lubin JH, Preston DL, Richardson DB, Stram DO, Thierry-Chef I, Schubauer-Berigan MK, Gilbert ES, Berrington de Gonzalez A. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *J Natl Cancer Inst Monogr.* 2020 Jul 1;2020(56):188-200, doi: 10.1093/jncimonographs/lgaa010
- Hauptmann et al. 2023 Hauptmann M, Byrnes G, Cardis E, Bernier MO, Blettner M, Dabin J, Engels H, Istad TS, Johansen C, Kaijser M, Kjaerheim K, Journy N, Meulepas JM, Moissonnier M, Ronckers C, Thierry-Chef I, Le Cornet L, Jahn A, Pokora R, Bosch de Basea M, Figuerola J, Maccia C, Nordenskjöld A, Harbron RW, Lee C, Simon SL, Berrington de Gonzalez A, Schüz J, Kesminiene A. Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study. *Lancet Oncol.* 2023 Jan;24(1):45-53, doi: 10.1016/s1470-2045(22)00655-6, Epub 20221206
- Hendrickson et al. 2020 Hendrickson PG, Luo Y, Kohlmann W, Schiffman J, Maese L, Bishop AJ, Lloyd S, Kokeny KE, Hitchcock YJ, Poppe MM, Gaffney DK, Tao R. Radiation therapy and secondary malignancy in Li-Fraumeni syndrome: A hereditary cancer registry study. *Cancer Med.* 2020 Nov;9(21):7954-63, doi: 10.1002/cam4.3427, Epub 20200915
- Hill 1965 Hill AB. The environment and disease: association or causation? *Proc R Soc Med.* 1965 May;58(5):295-300, doi: 10.1177/003591576505800503
- Hogan et al. 2018 Hogan AH, Bellin E, Douglas L, Levin TL, Esteban-Cruciani N. Radiation Exposure of Premature Infants Beyond the Perinatal Period. *Hosp Pediatr.* 2018 Nov;8(11):672-8, doi: 10.1542/hpeds.2018-0008, Epub 20181009

- Hoppen 2021 Hoppen T. Bestandsaufnahme gut 150 Jahre nach der Erstbeschreibung. *Pädiatrie*. 2021;33(1):40-5, doi: 10.1007/s15014-020-3657-2
- Hsu et al. 2013 Hsu WL, Preston DL, Soda M, Sugiyama H, Funamoto S, Kodama K, Kimura A, Kamada N, Dohy H, Tomonaga M, Iwanaga M, Miyazaki Y, Cullings HM, Suyama A, Ozasa K, Shore RE, Mabuchi K. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. *Radiat Res*. 2013 Mar;179(3):361-82, doi: 10.1667/rr2892.1, Epub 2013/02/13
- Huang et al. 2014 Huang WY, Muo CH, Lin CY, Jen YM, Yang MH, Lin JC, Sung FC, Kao CH. Paediatric head CT scan and subsequent risk of malignancy and benign brain tumour: a nation-wide population-based cohort study. *Brit J Cancer*. 2014 2014/04/01;110(9):2354-60, doi: 10.1038/bjc.2014.103
- IAEA 2023 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) Attribution of Radiation Health Effects and Inference of Radiation Risks: Considerations for Application of the IAEA Safety Standards. Vienna, 2023
- IARC 2000 IARC. Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. World Health Organization International agency for Research on cancer, 2000, ISBN 978-92-832-1275-1
- Icks et al. 2017 Icks A, Dittrich A, Brüne M, Kuss O, Hoyer A, Haastert B, Begun A, Andrich S, Hoffmann J, Kalthéuner M, Chernyak N. Agreement found between self-reported and health insurance data on physician visits comparing different recall lengths. *J Clin Epidemiol*. 2017 Feb;82:167-72, doi: 10.1016/j.jclinepi.2016.10.009, Epub 20161105
- ICRP 2000 ICRP. 2000. Pregnancy and Medical Radiation. ICRP Publication 84. In. Ann. ICRP
- ICRP 2003 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). ICRP Publication 90. Ann ICRP 33(1-2), Pergamon, Oxford, 2003, ISBN 008044265X
- Ilic und Ilic 2023 Ilic I, Ilic M. International patterns and trends in the brain cancer incidence and mortality: An observational study based on the global burden of disease. *Heliyon*. 2023 Jul;9(7):e18222, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18222, Epub 20230713

- Jassim et al. 2023 Jassim A, Rahrman EP, Simons BD, Gilbertson RJ. Cancers make their own luck: theories of cancer origins. *Nat Rev Cancer*. 2023 Oct;23(10):710-24, doi: 10.1038/s41568-023-00602-5, Epub 20230724
- John et al. 2013 John EM, McGuire V, Thomas D, Haile R, Ozcelik H, Milne RL, Felberg A, West DW, Miron A, Knight JA, Terry MB, Daly M, Buys SS, Andrulis IL, Hopper JL, Southey MC, Giles GG, Apicella C, Thorne H, Whittemore AS. Diagnostic chest X-rays and breast cancer risk before age 50 years for BRCA1 and BRCA2 mutation carriers. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 2013 Sep;22(9):1547-56, doi: 10.1158/1055-9965.Epi-13-0189, Epub 20130712
- Jones und Shrimpton 1993 Jones D, Shrimpton P. 1993. Normalized organ doses for X-ray CT calculated using monte Carlo techniques. In. National Radiological Protection Board
- Jongmans et al. 2016 Jongmans MC, Loeffen JL, Waanders E, Hoogerbrugge PM, Ligtenberg MJ, Kuiper RP, Hoogerbrugge N. Recognition of genetic predisposition in pediatric cancer patients: An easy-to-use selection tool. *Eur J Med Genet*. 2016 Mar;59(3):116-25, doi: 10.1016/j.ejmg.2016.01.008, Epub 20160126
- Journey et al. 2016a Journey N, Roué T, Cardis E, Le Pointe HD, Brisse H, Chateil JF, Laurier D, Bernier MO. Childhood CT scans and cancer risk: impact of predisposing factors for cancer on the risk estimates. *J Radiol Prot*. 2016a Mar;36(1):N1-7, doi: 10.1088/0952-4746/36/1/n1, Epub 20160215
- Journey et al. 2016b Journey NM, McHugh K, Harbron RW, Pearce MS, Berrington de González A. 2016b. Medical conditions associated with the use of CT in children and young adults, Great Britain, 1995-2008. In. S. 10-2
- Kalra et al. 2004 Kalra MK, Maher MM, Toth TL, Hamberg LM, Blake MA, Shepard JA, Saini S. Strategies for CT radiation dose optimization. *Radiology*. 2004 Mar;230(3):619-28, doi: 10.1148/radiol.2303021726, Epub 20040122
- Kalra et al. 2011 Kalra MK, Singh S, Thrall JH, Mahesh M. Pointers for optimizing radiation dose in abdominal CT protocols. *J Am Coll Radiol*. 2011 Oct;8(10):731-4, doi: 10.1016/j.jacr.2011.06.026

- kinderkrebsinfo 2016 Informationsportal zu Krebserkrankungen bei Kindern und Jugendlichen (kinderkrebsinfo). Aktuelle Empfehlungen internationaler Arbeitsgruppen zur Langzeitnachsorge und Früherkennung von Zweitkrebserkrankungen.
https://www.gpoh.de/kinderkrebsinfo/content/patienten/nachsorge/spaetfolgen___langzeitnachsorge/spaetfolgen_der_krebstherapie/zweitkrebserkrankungen/nachsorgeempfehlungen/krebsfrueherkennung_in_der_nachsorge/index_ger.html, zuletzt aufgerufen am 28.04.2025
- Kleinerman 2009 Kleinerman RA. Radiation-sensitive genetically susceptible pediatric sub-populations. *Pediatric Radiology*. 2009 2009/02/01; 39(1):27-31, doi: 10.1007/s00247-008-1015-6
- Kojimahara et al. 2020 Kojimahara N, Yoshitake T, Ono K, Kai M, Bynes G, Schüz J, Cardis E, Kesminiene A. Computed tomography of the head and the risk of brain tumours during childhood and adolescence: results from a case-control study in Japan. *J Radiol Prot*. 2020 Aug 6, doi: 10.1088/1361-6498/abacff, Epub 20200806
- Konrad et al. 2019 Konrad R, Zhang W, Bjarndottir M, Proano R. Key considerations when using health insurance claims data in advanced data analyses: an experience report. *Health Syst (Basingstoke)*. 2019 Mar 1;9(4):317-25, doi: 10.1080/20476965.2019.1581433, Epub 2019/03/01
- Kopp et al. 2020 Kopp M, Loewe T, Wuest W, Brand M, Wetzl M, Nitsch W, Schmidt D, Beck M, Schmidt B, Uder M, May M. Individual Calculation of Effective Dose and Risk of Malignancy Based on Monte Carlo Simulations after Whole Body Computed Tomography. *Sci Rep-Uk*. 2020 2020/06/11;10(1):9475, doi: 10.1038/s41598-020-66366-2
- Kratz et al. 2017 Kratz CP, Achatz MI, Brugières L, Frebourg T, Garber JE, Greer MC, Hansford JR, Janeway KA, Kohlmann WK, McGee R, Mullighan CG, Onel K, Pajtler KW, Pfister SM, Savage SA, Schiffman JD, Schneider KA, Strong LC, Evans DGR, Wasserman JD, Villani A, Malkin D. Cancer Screening Recommendations for Individuals with Li-Fraumeni Syndrome. *Clin Cancer Res*. 2017 Jun 1;23(11):e38-e45, doi: 10.1158/1078-0432.Ccr-17-0408

- Krille et al. 2015 Krille L, Dreger S, Schindel R, Albrecht T, Asmussen M, Barkhausen J, Berthold JD, Chavan A, Claussen C, Forsting M, Gianicolo EAL, Jablonka K, Jahn A, Langer M, Laniado M, Lotz J, Mentzel HJ, Queißer-Wahrendorf A, Rompel O, Schlick I, Schneider K, Schumacher M, Seidenbusch M, Spix C, Spors B, Staatz G, Vogl T, Wagner J, Weisser G, Zeeb H, Blettner M. Risk of cancer incidence before the age of 15 years after exposure to ionising radiation from computed tomography: results from a German cohort study. *Radiat Environ Biophys.* 2015 Mar;54(1):1-12, doi: 10.1007/s00411-014-0580-3, Epub 2015/01/09
- Kulkarni et al. 2016 Kulkarni A, Hsu HH, Ou P, Kutty S. Computed Tomography in Congenital Heart Disease: Clinical Applications and Technical Considerations. *Echocardiography.* 2016;33(4):629-40, doi: <https://doi.org/10.1111/echo.13147>
- Kwan et al. 2022 Kwan ML, Miglioretti DL, Bowles EJA, Weinmann S, Greenlee RT, Stout NK, Rahm AK, Alber SA, Pequeno P, Moy LM, Stewart C, Fong C, Jenkins CL, Kohnhorst D, Luce C, Mor JM, Munneke JR, Prado Y, Buth G, Cheng SY, Deosaransingh KA, Francisco M, Lakoma M, Martinez YT, Theis MK, Marlow EC, Kushi LH, Duncan JR, Bolch WE, Pole JD, Smith-Bindman R. Quantifying cancer risk from exposures to medical imaging in the Risk of Pediatric and Adolescent Cancer Associated with Medical Imaging (RIC) Study: research methods and cohort profile. *Cancer Causes Control.* 2022 May;33(5):711-26, doi: 10.1007/s10552-022-01556-z, Epub 20220202
- Kwon et al. 2016 Kwon D, Hoffman FO, Moroz BE, Simon SL. Bayesian dose-response analysis for epidemiological studies with complex uncertainty in dose estimation. *Stat Med.* 2016 Feb 10;35(3):399-423, doi: 10.1002/sim.6635, Epub 20150913
- Lecarpentier et al. 2011 Lecarpentier J, Noguès C, Mouret-Fourme E, Stoppa-Lyonnet D, Lasset C, Caron O, Fricker JP, Gladieff L, Faivre L, Sobol H, Gesta P, Frenay M, Luporsi E, Coupier I, Lidereau R, Andrieu N. Variation in breast cancer risk with mutation position, smoking, alcohol, and chest X-ray history, in the French National BRCA1/2 carrier cohort (GENEPSO). *Breast Cancer Res Treat.* 2011 Dec;130(3):927-38, doi: 10.1007/s10549-011-1655-3, Epub 20110715
- Lee et al. 2015 Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *J Radiol Prot.* 2015 Dec;35(4):891-909, doi: 10.1088/0952-4746/35/4/891, Epub 20151126

- Lee et al. 2019 Lee C, Journy N, Moroz BE, Little M, Harbron R, McHugh K, Pearce M, Berrington de Gonzalez A. ORGAN DOSE ESTIMATION ACCOUNTING FOR UNCERTAINTY FOR PEDIATRIC AND YOUNG ADULT CT SCANS IN THE UNITED KINGDOM. *Radiat Prot Dosimetry*. 2019 Jul 1;184(1):44-53, doi: 10.1093/rpd/ncy184
- Lee et al. 2022 Lee C, Yeom YS, Folio L. CT organ dose calculator size adaptive for pediatric and adult patients. *Biomed Phys Eng Express*. 2022 Oct 19;8(6), doi: 10.1088/2057-1976/ac9845, Epub 20221019
- Lee et al. 2024 Lee C, Moroz B, Thome C, Gaudreau K, Emami P, Little MP. Reconstruction of organ doses for patients undergoing computed tomography examinations in Canada 1992–2019. *Radiation Protection Dosimetry*. 2024;200(4):379-86, doi: 10.1093/rpd/ncad315
- Lindor et al. 2008 Lindor NM, McMaster ML, Lindor CJ, Greene MH. Concise Handbook of Familial Cancer Susceptibility Syndromes - Second Edition. *JNCI Monographs*. 2008;2008(38):3-93, doi: 10.1093/jncimonographs/lgn001
- Little et al. 2022a Little MP, Brenner AV, Grant EJ, Sugiyama H, Preston DL, Sakata R, Cologne J, Velazquez-Kronen R, Utada M, Mabuchi K, Ozasa K, Olson JD, Dugan GO, Pazzaglia S, Cline JM, Applegate KE. Age effects on radiation response: summary of a recent symposium and future perspectives. *Int J Radiat Biol*. 2022a;98(11):1673-83, doi: 10.1080/09553002.2022.2063962, Epub 20220502
- Little et al. 2022b Little MP, Wakeford R, Bouffler SD, Abalo K, Hauptmann M, Hamada N, Kendall GM. Review of the risk of cancer following low and moderate doses of sparsely ionising radiation received in early life in groups with individually estimated doses. *Environ Int*. 2022b Jan 15;159:106983, doi: 10.1016/j.envint.2021.106983, Epub 2021/12/28
- Little et al. 2023 Little MP, Wakeford R, Zablotska LB, Borrego D, Griffin KT, Allodji RS, de Vathaire F, Lee C, Brenner AV, Miller JS, Campbell D, Pearce MS, Sadetzki S, Doody MM, Holmberg E, Lundell M, French B, Adams MJ, Berrington de González A, Linet MS. Radiation exposure and leukaemia risk among cohorts of persons exposed to low and moderate doses of external ionising radiation in childhood. *Br J Cancer*. 2023 Oct;129(7):1152-65, doi: 10.1038/s41416-023-02387-8, Epub 20230818

- Little et al. 2024a Little MP, Bazyka D, Berrington de Gonzalez A, Brenner AV, Chumak VV, Cullings HM, Daniels RD, French B, Grant E, Hamada N, Hauptmann M, Kendall GM, Laurier D, Lee C, Lee WJ, Linet MS, Mabuchi K, Morton LM, Muirhead CR, Preston DL, Rajaraman P, Richardson DB, Sakata R, Samet JM, Simon SL, Sugiyama H, Wakeford R, Zablotska LB. A Historical Survey of Key Epidemiological Studies of Ionizing Radiation Exposure. *Radiat Res.* 2024a Aug 1;202(2):432-87, doi: 10.1667/rade-24-00021.1
- Little et al. 2024b Little MP, Eidemüller M, Kaiser JC, Apostoaei AI. Minimum latency effects for cancer associated with exposures to radiation or other carcinogens. *Br J Cancer.* 2024b Mar;130(5):819-29, doi: 10.1038/s41416-023-02544-z, Epub 20240111
- Marlow et al. 2023 Marlow EC, Ducore JM, Kwan ML, Bowles EJA, Greenlee RT, Pole JD, Rahm AK, Stout NK, Weinmann S, Smith-Bindman R, Miglioretti DL. Medical imaging utilization and associated radiation exposure in children with down syndrome. *PLoS One.* 2023;18(9):e0289957, doi: 10.1371/journal.pone.0289957, Epub 20230906
- Mathews et al. 2013 Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, Giles GG, Wallace AB, Anderson PR, Guiver TA, McGale P, Cain TM, Dowty JG, Bickerstaffe AC, Darby SC. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ.* 2013 May 21;346:f2360, doi: 10.1136/bmj.f2360, Epub 2013/05/23
- Mese et al. 2024 Mese I, Altintas Mese C, Demirsoy U, Anik Y. Innovative advances in pediatric radiology: computed tomography reconstruction techniques, photon-counting detector computed tomography, and beyond. *Pediatr Radiol.* 2024 Jan;54(1):1-11, doi: 10.1007/s00247-023-05823-2, Epub 2023/12/02
- Meulepas et al. 2016 Meulepas JM, Ronckers CM, Merks J, Weijerman ME, Lubin JH, Hauptmann M. Confounding of the association between radiation exposure from CT scans and risk of leukemia and brain tumors by cancer susceptibility syndromes. *J Radiol Prot.* 2016 Dec;36(4):953-74, doi: 10.1088/0952-4746/36/4/953, Epub 20161128
- Meulepas et al. 2017 Meulepas JM, Smets AMJB, Nievelstein RAJ, Gradowska P, Verbeke J, Holscher HC, Rutten MJCM, Kieft M, Ronckers CM, Hauptmann M. Trends and patterns of computed tomography scan use among children in The Netherlands: 1990-2012. *European Radiology.* 2017;27:2426-33, doi: 10.1007/s00330-016-4566-1

- Meulepas et al. 2018 Meulepas JM, Hauptmann M, Lubin JH, Shuryak I, Brenner DJ. 2018. Is there Unmeasured Indication Bias in Radiation-Related Cancer Risk Estimates from Studies of Computed Tomography? In. S. 128-35
- Miglioretti et al. 2013 Miglioretti DL, Johnson E, Williams A, Greenlee RT, Weinmann S, Solberg LI, Feigelson HS, Roblin D, Flynn MJ, Vanneman N, Smith-Bindman R. The use of computed tomography in pediatrics and the associated radiation exposure and estimated cancer risk. *JAMA Pediatr.* 2013 Aug 1;167(8):700-7, doi: 10.1001/jamapediatrics.2013.311
- Mokubangele et al. 2022 Mokubangele C, Ebongue A, Bongue D, Ndontchueng M, Moifo B. Evaluation of the Fetal-Maternal Radiation Doses in CT-Pelvimetry and Estimation of the Fetal Radiation Risks in 03 Radiology Departments in Douala-Cameroon. *Open Journal of Radiology.* 2022 (12):113-24, doi: doi: 10.4236/ojrad.2022.123013
- Morgan et al. 2018 Morgan RL, Whaley P, Thayer KA, Schünemann HJ. Identifying the PECO: A framework for formulating good questions to explore the association of environmental and other exposures with health outcomes. *Environ Int.* 2018 Dec;121(Pt 1):1027-31, doi: 10.1016/j.envint.2018.07.015, Epub 20180827
- Nekolla** et al. 2017 Nekolla EA, Schegerer AA, Griebel J, Brix G. Häufigkeit und Dosis diagnostischer und interventioneller Röntgenanwendungen. *Der Radiologe.* 2017 2017/07/01;57(7):555-62, doi: <https://doi.org/10.1007/s00117-017-0242-y>
- NICE 2023 National Institute for Health and Care Excellence (NICE). Head injury: assessment and early management. <https://www.nice.org.uk/guidance/ng232/resources/head-injury-assessment-and-early-management-pdf-66143892774085>, zuletzt aufgerufen am 10.04.2025
- Nikkilä et al. 2018 Nikkilä A, Raitanen J, Lohi O, Auvinen A. Radiation exposure from computerized tomography and risk of childhood leukemia: Finnish register-based case-control study of childhood leukemia (FRECCLE). *Haematologica.* 2018 Nov;103(11):1873-80, doi: 10.3324/haematol.2018.187716, Epub 20180705
- NRDR NRDR. CT Standardized Dose Index Report. <https://nrdrsupport.acr.org/support/solutions/articles/11000044407>, zuletzt aufgerufen am 11.04.2025
- OECD OECD. OECD Data Explorer - Archive. [https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&df\[ds\]=DisseminateArchiveDMZ&df\[id\]=DF_HEALTH_REAC&df\[ag\]=OECD&dq=IPI NSCAN.NOMBRENB.DEU&pd=2008%2C2021&to\[TIME_PERIOD\]=false&vw=tb](https://data-explorer.oecd.org/vis?tenant=archive&df[ds]=DisseminateArchiveDMZ&df[id]=DF_HEALTH_REAC&df[ag]=OECD&dq=IPI NSCAN.NOMBRENB.DEU&pd=2008%2C2021&to[TIME_PERIOD]=false&vw=tb), zuletzt aufgerufen am 11.04.2025

- Ohuma et al. 2023 Ohuma EO, Moller AB, Bradley E, Chakwera S, Hussain-Alkhateeb L, Lewin A, Okwaraji YB, Mahanani WR, Johansson EW, Lavin T, Fernandez DE, Domínguez GG, de Costa A, Cresswell JA, Krasevec J, Lawn JE, Blencowe H, Requejo J, Moran AC. National, regional, and global estimates of preterm birth in 2020, with trends from 2010: a systematic analysis. *Lancet*. 2023 Oct 7;402(10409):1261-71, doi: 10.1016/s0140-6736(23)00878-4
- Osei und Faulkner 1999 Osei EK, Faulkner K. Fetal doses from radiological examinations. *Br J Radiol*. 1999 Aug;72(860):773-80, doi: 10.1259/bjr.72.860.10624343
- Osei et al. 2003 Osei EK, Darko JB, Faulkner K, Kotre CJ. Software for the estimation of foetal radiation dose to patients and staff in diagnostic radiology. *J Radiol Prot*. 2003 Jun;23(2):183-94, doi: 10.1088/0952-4746/23/2/305
- Osei und Darko 2013 Osei EK, Darko J. Foetal radiation dose and risk from diagnostic radiology procedures: a multinational study. *ISRN Radiol*. 2013;2013:318425, doi: 10.5402/2013/318425, Epub 20120925
- Osmond et al. 2010 Osmond MH, Klassen TP, Wells GA, Correll R, Jarvis A, Joubert G, Bailey B, Chauvin-Kimoff L, Pusic M, McConnell D, Nijssen-Jordan C, Silver N, Taylor B, Stiell IG. CATCH: a clinical decision rule for the use of computed tomography in children with minor head injury. *Cmaj*. 2010 Mar 9;182(4):341-8, doi: 10.1503/cmaj.091421, Epub 20100208
- Park et al. 2018 Park MJ, Kim SS, Park GY, Hong HS. Radiation exposure of very-low-birth-weight infants in neonatal intensive care units in Korea. *Radioprotection*. 2018;53(4):279-86
- Paulo et al. 2020 Paulo G, Damilakis J, Tsapaki V, Schegerer AA, Repussard J, Jaschke W, Frija G, Hierath M, Clark J, European Society of R. Diagnostic Reference Levels based on clinical indications in computed tomography: a literature review. *Insights into Imaging*. 2020 2020/08/17;11(1):96, doi: 10.1186/s13244-020-00899-y
- Pearce et al. 2012a Pearce MS, Salotti JA, Howe NL, McHugh K, Kim KP, Lee C, Craft AW, Berrington de González A, Parker L. CT Scans in Young People in Great Britain: Temporal and Descriptive Patterns, 1993-2002. *Radiol Res Pract*. 2012a;2012:594278, doi: 10.1155/2012/594278, Epub 20120626
- Pearce et al. 2012b Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, Howe NL, Ronckers CM, Rajaraman P, Sir Craft AW, Parker L, Berrington de Gonzalez A. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2012b Aug 4;380(9840):499-505, doi: 10.1016/S0140-6736(12)60815-0, Epub 2012/06/12

- Perin et al. 2022 Perin J, Mulick A, Yeung D, Villavicencio F, Lopez G, Strong KL, Prieto-Merino D, Cousens S, Black RE, Liu L. Global, regional, and national causes of under-5 mortality in 2000-19: an updated systematic analysis with implications for the Sustainable Development Goals. *Lancet Child Adolesc Health*. 2022 Feb;6(2):106-15, doi: 10.1016/s2352-4642(21)00311-4, Epub 20211117
- Peuchot und Libshitz 1987 Peuchot M, Libshitz HI. Pulmonary metastatic disease: radiologic-surgical correlation. *Radiology*. 1987 1987/09/01; 164(3):719-22, doi: 10.1148/radiology.164.3.3615867
- Pijpe et al. 2012 Pijpe A, Andrieu N, Easton DF, Kesminiene A, Cardis E, Noguès C, Gauthier-Villars M, Lasset C, Fricker J-P, Peock S, Frost D, Evans DG, Eeles RA, Paterson J, Manders P, van Asperen CJ, Ausems MGEM, Meijers-Heijboer H, Thierry-Chef I, Hauptmann M, Goldgar D, Rookus MA, van Leeuwen FE. Exposure to diagnostic radiation and risk of breast cancer among carriers of BRCA1/2 mutations: retrospective cohort study (GENE-RAD-RISK). *BMJ : British Medical Journal*. 2012;345:e5660, doi: 10.1136/bmj.e5660
- Pokora et al. 2016 Pokora R, Krille L, Dreger S, Lee C, Günster C, Zeeb H. 2016. Computed tomography in Germany - Results and insights from a cohort study and health insurance data (AOK). In. S. 721-8
- Pola et al. 2018 Pola A, Corbella D, Righini A, Torresin A, Colombo PE, Vismara L, Trombetta L, Maddalo M, Introini MV, Tinelli D, Strohmenger L, Garattini G, Munari A, Triulzi F. Computed tomography use in a large Italian region: trend analysis 2004-2014 of emergency and outpatient CT examinations in children and adults. *Eur Radiol*. 2018 Jun;28(6):2308-18, doi: 10.1007/s00330-017-5225-x, Epub 20180109
- Porter 2016 Porter CC. Germ line mutations associated with leukemias. *Hematology Am Soc Hematol Educ Program*. 2016 Dec 2;2016(1):302-8, doi: 10.1182/asheducation-2016.1.302, Epub 2016/12/04
- Qu et al. 2023 Qu S, Liu H, Xie T, Giger ML, Quan G, Zaidi H. Patient-specific fetal radiation dosimetry for pregnant patients undergoing abdominal and pelvic CT imaging. *Med Phys*. 2023 Jun;50(6):3801-15, doi: 10.1002/mp.16304, Epub 20230225
- Radiopaedia 2020 Radiopaedia (Radiopaedia). CHALICE rule. <https://radiopaedia.org/articles/chalice-rule>, zuletzt aufgerufen am 10.04.2025

- Raimondi und Warin-Fresse 2016 Raimondi F, Warin-Fresse K. Computed tomography imaging in children with congenital heart disease: Indications and radiation dose optimization. Arch Cardiovasc Dis. 2016 Feb;109(2):150-7, doi: 10.1016/j.acvd.2015.11.003, Epub 20160115
- Renz et al. 2025 Renz D, Werncke T, Sorantin E, Deng M, Gill S, Hauptmann M, Klein D, Stamm G, Wollschläger D, Mentzel H Hrsg. ROFO-FORTSCHR RONTG., 2025
- Renz et al. 2022 Renz DM, Herrmann K-H, Kraemer M, Boettcher J, Waginger M, Krueger P-C, Pfeil A, Streitparth F, Kentouche K, Gruhn B, Mainz JG, Stenzel M, Teichgraeber UK, Reichenbach JR, Mentzel H-J. Ultrashort echo time MRI of the lung in children and adolescents: comparison with non-enhanced computed tomography and standard post-contrast T1w MRI sequences. European Radiology. 2022 2022/03/01;32(3):1833-42, doi: 10.1007/s00330-021-08236-7
- Richardson und Ashmore 2005 Richardson DB, Ashmore JP. Investigating time patterns of variation in radiation cancer associations. Occup Environ Med. 2005 Aug;62(8):551-8, doi: 10.1136/oem.2004.017368
- RKI und GEKID 2023 Robert Koch-Institut (Hrsg) und die Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V. (Hrsg) (RKI, GEKID). Krebs in Deutschland für 2019/2020. https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/krebs_in_deutschland_2023.pdf, zuletzt aufgerufen am 06.03.2024
- Roizen und Patterson 2003 Roizen NJ, Patterson D. Down's syndrome. Lancet. 2003 Apr 12;361(9365):1281-9, doi: 10.1016/s0140-6736(03)12987-x
- Romanyukha et al. 2016 Romanyukha A, Folio L, Lamart S, Simon SL, Lee C. Body size-specific effective dose conversion coefficients for CT scans Radiat Prot Dosimetry. 2016 Dec;172(4):428-37, doi: 10.1093/rpd/ncv511, Epub 20160110
- Ronckers et al. 2005 Ronckers CM, Erdmann CA, Land CE. Radiation and breast cancer: a review of current evidence. Breast Cancer Res. 2005;7(1):21-32, doi: 10.1186/bcr970, Epub 20041123
- Ronckers et al. 2025 (Ronckers CM, Spix C, Grabow D, Erdmann F). German Childhood Cancer Registry - Annual Report 2022 (1980-2021). https://www.kinderkrebsregister.de/fileadmin/kliniken/dkkkr/pdf/jb/jb2022/JB_2022_final.pdf, zuletzt aufgerufen am 03.06.2025

- Ryan et al. 2020 Ryan ME, Pruthi S, Desai NK, Falcone RA, Jr., Glenn OA, Joseph MM, Maheshwari M, Marin JR, Mazzola C, Milla SS, Mirsky DM, Myseros JS, Niogi SN, Partap S, Radhakrishnan R, Robertson RL, Soares BP, Udayasankar UK, Whitehead MT, Wright JN, Karmazyn B. ACR Appropriateness Criteria® Head Trauma-Child. *J Am Coll Radiol*. 2020 May;17(5s):S125-s37, doi: 10.1016/j.jacr.2020.01.026
- Saida 2017 Saida S. Predispositions to Leukemia in Down Syndrome and Other Hereditary Disorders. *Curr Treat Options Oncol*. 2017 Jul;18(7):41, doi: 10.1007/s11864-017-0485-x
- Schubauer-Berigan et al. 2020 Schubauer-Berigan MK, Berrington de Gonzalez A, Cardis E, Laurier D, Lubin JH, Hauptmann M, Richardson DB. Evaluation of Confounding and Selection Bias in Epidemiological Studies of Populations Exposed to Low-Dose, High-Energy Photon Radiation. *J Natl Cancer Inst Monogr*. 2020 Jul 1;2020(56):133-53, doi: 10.1093/jncimonographs/lgaa008, Epub 2020/07/14
- Schüz und Erdmann 2016 Schüz J, Erdmann F. Environmental Exposure and Risk of Childhood Leukemia: An Overview. *Archives of Medical Research*. 2016 2016/11/01;47(8):607-14, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2016.11.017>
- Seifi et al. 2022 Seifi A, Jafari S, Mirmoeeni S, Azari Jafari A, Naderi N, Safdarpour A, Seifi S. Trends in Inpatient Utilization of Head Computerized Tomography Scans in the United States: A Brief Cross-Sectional Study. *Cureus*. 2022 Jun;14(6):e26018, doi: 10.7759/cureus.26018, Epub 20220616
- Shimada 2021 Shimada A. Profile of down syndrome-associated malignancies: Epidemiology, clinical features and therapeutic aspects. *Pediatric Hematology Oncology Journal*. 2021 2021/06/01;6(2):63-72, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phoj.2021.01.001>
- Simon et al. 2014a Simon SL, Hoffman FO, Hofer E. The Two-Dimensional Monte Carlo: A New Methodologic Paradigm for Dose Reconstruction for Epidemiological Studies. *Radiation Research*. 2014a;183(1): 27-41, 15
- Simon et al. 2014b Simon SL, Hoffman FO, Hofer E. 2014b. The Two-Dimensional Monte Carlo: A New Methodologic Paradigm for Dose Reconstruction for Epidemiological Studies. In. S. 27-41
- Smith-Bindman et al. 2025a Smith-Bindman R, Alber SA, Kwan ML, Pequeno P, Bolch WE, Bowles EJA, Greenlee RT, Stout NK, Weinmann S, Moy LM, Stewart C, Francisco M, Kofler C, Duncan JR, Ducore J, Mahendra M, Pole JD, Miglioretti DL. Medical Imaging and Pediatric and Adolescent Hematologic Cancer Risk. *N Engl J Med*. 2025a Sep 17, doi: 10.1056/NEJMoa2502098, Epub 20250917

- Smith-Bindman et al. 2025b Smith-Bindman R, Chu PW, Azman Firdaus H, Stewart C, Malekheadayat M, Alber S, Bolch WE, Mahendra M, Berrington de González A, Miglioretti DL. Projected Lifetime Cancer Risks From Current Computed Tomography Imaging. *JAMA Intern Med.* 2025b Apr 14, doi: 10.1001/jamainternmed.2025.0505, Epub 20250414
- Smoll et al. 2023 Smoll NR, Brady Z, Scurrah KJ, Lee C, Berrington de González A, Mathews JD. Computed tomography scan radiation and brain cancer incidence. *Neuro Oncol.* 2023 Jul 6;25(7):1368-76, doi: 10.1093/neuonc/noad012
- SSK 1989 Strahlenschutzkommission (SSK). Wirkungen nach pränataler Bestrahlung. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 2, Gustav-Fischer Verlag, Stuttgart, 1989, ISBN 3-437-11293-7
- SSK 2022 Strahlenschutzkommission. Bildgebende Diagnostik bei Kindern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 321. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 22./23. September 2022. <https://ssk.de/publikationen/2022/2022-09-22-empf-bildgebende-diagnostik-kind>
- SSK 2025a Strahlenschutzkommission. Effekte nach pränataler Strahlenexposition. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 339. Sitzung der SSK am 27./28. Oktober 2025. urn:nbn:de:101:1-2604211015530.984164391933
- SSK 2025b Strahlenschutzkommission. Orientierungswerte für die Patientenexposition bei röntgendiagnostischen Anwendungen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 337. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 29.04.2025. urn:nbn:de:101:1-2509101542331.194137005442. Bekanntmachung im BAnz AT 27.10.2025 B1
- Steliarova-Foucher et al. 2017 Steliarova-Foucher E, Colombet M, Ries LAG, Moreno F, Dolya A, Bray F, Hesselting P, Shin HY, Stiller CA. International incidence of childhood cancer, 2001-10: a population-based registry study. *Lancet Oncol.* 2017 Jun;18(6):719-31, doi: 10.1016/s1470-2045(17)30186-9, Epub 2017/04/16
- Stewart et al. 2025 Stewart C, Alber S, Mahendra M, Kofler C, Tran T, Domal S, Bowles EJA, Weinmann S, Greenlee RT, Stout NK, Pequeno P, Moy LM, Duncan JR, Pole JD, Bolch WE, Kwan ML, Miglioretti DL, Smith-Bindman R. Quantifying and Contextualizing Radiation Doses in Common Pediatric Medical Imaging Examinations. *J Pediatr Clin Pract.* 2025 Sep;17:200166, doi: 10.1016/j.jpdc.2025.200166, Epub 20250723

- Strauss et al. 2019 Strauss KJ, Somasundaram E, Sengupta D, Marin JR, Brady SL. Radiation Dose for Pediatric CT: Comparison of Pediatric versus Adult Imaging Facilities. *Radiology*. 2019 Apr;291(1):158-67, doi: 10.1148/radiol.2019181753, Epub 20190205
- Streffer et al. 2003 Streffer C, Shore R, Konermann G, Meadows A, Uma Devi P, Preston Withers J, Holm LE, Stather J, Mabuchi K, H R. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). A report of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 2003;33(1-2):5-206
- Su et al. 2023 Su YT, Chen YS, Yeh LR, Chen SW, Tsai YC, Wu CY, Yang YN, Tey SL, Lin CH. Unnecessary radiation exposure during diagnostic radiography in infants in a neonatal intensive care unit: a retrospective cohort study. *Eur J Pediatr*. 2023 Jan;182(1):343-52, doi: 10.1007/s00431-022-04695-2, Epub 20221110
- Tabori et al. 2017 Tabori U, Hansford JR, Achatz MI, Kratz CP, Plon SE, Frebourg T, Brugières L. Clinical Management and Tumor Surveillance Recommendations of Inherited Mismatch Repair Deficiency in Childhood. *Clin Cancer Res*. 2017 Jun 1;23(11):e32-e7, doi: 10.1158/1078-0432.Ccr-17-0574
- Thierry-Chef et al. 2021 Thierry-Chef I, Ferro G, Le Cornet L, Dabin J, Istad TS, Jahn A, Lee C, Maccia C, Malchair F, Olerud HM, Harbron RW, Figuerola J, Hermen J, Moissonnier M, Bernier MO, Bosch de Basea MB, Byrnes G, Cardis E, Hauptmann M, Journy N, Kesminiene A, Meulepas JM, Pokora R, Simon SL. Dose Estimation for the European Epidemiological Study on Pediatric Computed Tomography (EPI-CT). *Radiat Res*. 2021 Jul 1;196(1):74-99, doi: 10.1667/rade-20-00231.1
- Toscan et al. 2024 Toscan M, de Araujo BF, Martini JC, Ravazio R, de Souza VC. Our estimates of neonatal radiation exposure fall short of reality. *Eur J Pediatr*. 2024 Apr;183(4):1911-6, doi: 10.1007/s00431-024-05466-x, Epub 2024/02/09
- Travis et al. 2003 Travis LB, Hauptmann M, Gaul LK, Storm HH, Goldman MB, Nyberg U, Berger E, Janower ML, Hall P, Monson RR, Holm LE, Land CE, Schottenfeld D, Boice JD, Jr., Andersson M. Site-specific cancer incidence and mortality after cerebral angiography with radioactive thorotrast. *Radiat Res*. 2003 Dec;160(6):691-706, doi: 10.1667/r3095, Epub 2003/12/04
- Tsapaki et al. 2021 Tsapaki V, Damilakis J, Paulo G, Schegerer AA, Repussard J, Jaschke W, Frija G. CT diagnostic reference levels based on clinical indications: results of a large-scale European survey. *Eur Radiol*. 2021 Jul;31(7):4459-69, doi: 10.1007/s00330-020-07652-5, Epub 20210115

- UNSCEAR 1986 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Genetic and somatic effects of ionizing radiation , UNSCEAR 1986, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 1986, ISBN 92-1-142123-3
- UNSCEAR 2012 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2012 Report, Annex B. Uncertainties in Risk Estimates for Radiation-Induced Cancer. United Nations, New York, 2012, ISBN 978-92-1-142307-5
- UNSCEAR 2013 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report, Volume II: Scientific Annex B. Effects of radiation exposure of children. United Nations, New York, 2013, ISBN 978-92-1-142293-1
- UNSCEAR 2017 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2017 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Principles and Criteria for Ensuring the Quality of the Committee's Reviews of Epidemiological Studies of Radiation Exposure. United Nations, Vienna, 2017, ISBN 978-92-1-142322-8
- Villani et al. 2011 Villani A, Tabori U, Schiffman J, Shlien A, Beyene J, Druker H, Novokmet A, Finlay J, Malkin D. Biochemical and imaging surveillance in germline TP53 mutation carriers with Li-Fraumeni syndrome: a prospective observational study. *Lancet Oncol.* 2011 Jun;12(6):559-67, doi: 10.1016/s1470-2045(11)70119-x, Epub 20110519
- Walsh et al. 2014 Walsh L, Shore R, Auvinen A, Jung T, Wakeford R. Risks from CT scans—what do recent studies tell us? *Journal of Radiological Protection.* 2014 2014/03/04;34(1):E1, doi: 10.1088/0952-4746/34/1/E1
- Walsh et al. 2017 Walsh MF, Chang VY, Kohlmann WK, Scott HS, Cuniff C, Bourdeaut F, Molenaar JJ, Porter CC, Sandlund JT, Plon SE, Wang LL, Savage SA. Recommendations for Childhood Cancer Screening and Surveillance in DNA Repair Disorders. *Clin Cancer Res.* 2017 Jun 1;23(11):e23-e31, doi: 10.1158/1078-0432.Ccr-17-0465
- Wang et al. 2023 Wang WH, Sung CY, Wang SC, Shao YJ. Risks of leukemia, intracranial tumours and lymphomas in childhood and early adulthood after pediatric radiation exposure from computed tomography. *Cmaj.* 2023 Apr 24;195(16):E575-e83, doi: 10.1503/cmaj.221303

- Wechsler et al. 2002 Wechsler J, Greene M, McDevitt MA, Anastasi J, Karp JE, Le Beau MM, Crispino JD. Acquired mutations in GATA1 in the megakaryoblastic leukemia of Down syndrome. *Nat Genet.* 2002 Sep;32(1):148-52, doi: 10.1038/ng955, Epub 20020812
- Weiß et al. 2025 Weiß D, Beeres M, Rochwalsky U, Vogl TJ, Schlößer R. Radiation exposure and estimated risk of radiation-induced cancer from thoracic and abdominal radiographs in 1307 neonates. *Eur Radiol.* 2025 Jan;35(1):297-308, doi: 10.1007/s00330-024-10942-x, Epub 20240716
- Wollschläger et al. 2023 Wollschläger D, Jahnen A, Hermen J, Giussani A, Stamm G, Borowski M, Huisinga C, Mentzel HJ, Braun J, Sigmund G, Wagner J, Adolph J, Gunschera J, Koerber F, Schiefer A, Müller B, Lenzen H, Doering T, Entz K, Kunze C, Starck P, Staatz G, Mildenerberger P, Pokora R. Pediatric computed tomography doses in Germany from 2016 to 2018 based on large-scale data collection. 2023 6;163, doi: 10.1016/j.ejrad.2023.110832
- Wootton-Gorges et al. 2017 Wootton-Gorges SL, Soares BP, Alazraki AL, Anupindi SA, Blount JP, Booth TN, Dempsey ME, Falcone RA, Jr., Hayes LL, Kulkarni AV, Partap S, Rigsby CK, Ryan ME, Safdar NM, Trout AT, Widmann RF, Karmazyn BK, Palasis S. ACR Appropriateness Criteria(®) Suspected Physical Abuse-Child. *J Am Coll Radiol.* 2017 May;14(5s):S338-s49, doi: 10.1016/j.jacr.2017.01.036
- Yang et al. 2022 Yang S, Shan F, Shi Y, Liu T, Wang Q, Zhang H, Zhang X, Yang S, Zhang Z. Sensitivity and specificity of magnetic resonance imaging in routine diagnosis of pulmonary lesions: a comparison with computed tomography. *J Thorac Dis.* 2022 Oct;14(10):3762-72, doi: 10.21037/jtd-22-370
- Zeeb et al. 2024 Zeeb H, Gill S, Dreger S. Erweiterte Erhebung der medizinischen Strahlenexposition in der NAKO-Gesundheitsstudie und Verknüpfung mit Sekundärdaten. Vorhaben 3620S42270. Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz. BfS-RESFOR-239/24. 2024
- Zhang et al. 2015 Zhang J, Walsh MF, Wu G, Edmonson MN, Gruber TA, Easton J, Hedges D, Ma X, Zhou X, Yergeau DA, Wilkinson MR, Vadodaria B, Chen X, McGee RB, Hines-Dowell S, Nuccio R, Quinn E, Shurtleff SA, Rusch M, Patel A, Becksfort JB, Wang S, Weaver MS, Ding L, Mardis ER, Wilson RK, Gajjar A, Ellison DW, Pappo AS, Pui CH, Nichols KE, Downing JR. Germline Mutations in Predisposition Genes in Pediatric Cancer. *N Engl J Med.* 2015 Dec 10;373(24):2336-46, doi: 10.1056/NEJMoa1508054, Epub 2015/11/19

Zhang et al. 2017

Zhang Z, Preston DL, Sokolnikov M, Napier BA, Degteva M, Moroz B, Vostrotin V, Shiskina E, Birchall A, Stram DO. Correction of confidence intervals in excess relative risk models using Monte Carlo dosimetry systems with shared errors. PLoS One. 2017;12(4):e0174641, doi: 10.1371/journal.pone.0174641, Epub 20170403

Abkürzungen

ALL	akute lymphatische Leukämie
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CLL	chronische lymphatische Leukämie
CT	Computertomografie
cCT	craniale Computertomografie
CTDI	Computed Tomography Dose Index
DLP	Dosislängenprodukt
DRG	engl. Diagnosis Related Group
DRW	Diagnostische Referenzwerte
EOR	engl. Excess Odds Ratio
EPI-CT	European Epidemiological Study to Quantify Risks for Paediatric Computerized Tomography
ERR	engl. Excess Risk Ratio
ESR	engl. European Society of Radiology
ESPR	engl. European Society of Paediatric Radiology
GPOH	Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie
IARC	Internationalen Agentur für Krebsforschung der WHO
ICRP	engl. International Commission on Radiological Protection
ICD	engl. International Classification of Diseases
ICD-O	engl. International Classification of Diseases for Oncology
ICCC	engl. International Classification of Childhood Cancer
KI	Konfidenzintervall

LBW	engl. Low Birth Weight
LNT	engl. Linear-No-Threshold
LSS	engl. Life Span study
MRT	Magnetresonanztomografie
NAKO	nationale Kohorte
NCICT	National Cancer Institute Dosimetrie-System für CT
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OSCC	engl. Oxford Survey of Childhood Cancers
RIC	Risk of Pediatric and Adolescent Cancer Associated with Medical Imaging
SHT	Schädel-Hirntrauma
SOP	engl. Standard Operating Procedure
SPECT/PET-CT	Single Photon Emission Computed Tomography/ Positronen-Emissions-Tomographie CT-Untersuchungen
SSDE	engl. Size Specific Dose Estimate
SSK	Strahlenschutzkommission
TPS	Tumorprädispositionssyndrome
UNSCEAR	engl. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
VLBW	engl. Very Low Birth Weight

Begriffserklärungen

adverser Effekt

Ein adverser Effekt ist eine unerwünschte, nachteilige oder schädliche Wirkung einer Maßnahme (z.B. Anwendung ionisierender Strahlung).

Confounding

Bei der Untersuchung der Wirkung einer Strahlenexposition auf ein Krankheitsrisiko sind Confounder Einflüsse, die sowohl die Höhe der Exposition als auch das Krankheitsrisiko mitbestimmen. Confounder können dazu führen, dass Exposition und Krankheitsrisiko auch dann statistisch assoziiert sind, wenn tatsächlich keine kausale Wirkung der Exposition besteht. Ebenso können Confounder dafür sorgen, dass eine Exposition trotz deren tatsächlich kausaler Wirkung statistisch nicht mit dem Krankheitsrisiko assoziiert ist.

Wie stark ein Confounder die Schätzung des Zusammenhangs zwischen Exposition und Krankheitsrisiko beeinflussen kann, hängt davon ab, wie stark der Confounder die Exposition beeinflusst, wie stark der Confounder auf das Krankheitsrisiko wirkt und welche Prävalenz der Confounder hat.

Ist der Confounder grundsätzlich bekannt und können Daten zu seiner Ausprägung erhoben werden, kann die statistische Dosis-Wirkungs-Analyse so angepasst werden, dass der Confounder keinen Einfluss auf die Schätzung des Zusammenhangs zwischen Exposition und Krankheitsrisiko nimmt.

Verweis: Confounding by Indication

Confounding by Indication

In Studien zur Untersuchung der Wirkung medizinischer Strahlenexposition auf ein späteres Krankheitsrisiko kann die Ursache für die Exposition, also deren medizinische Indikation, ein Confounder sein. Personen mit Indikation für eine medizinische Strahlenexposition können sich so bereits vor der Exposition systematisch bzgl. des Risikos für den in der Studie betrachteten späteren Gesundheitsendpunkt von Personen ohne Exposition unterscheiden.

Diese Zusammenhänge können auch quantitativ sein: Personen mit einer Indikation für häufigere bzw. höhere medizinische Strahlenexposition können ein bereits vor Exposition bestehendes höheres Krankheitsrisiko haben als Personen mit einer seltener vorliegenden Indikation bzw. mit einer Indikation für eine geringere Exposition.

Verweis: Confounding

Dosisbericht	Der Dosisbericht ist die Aufzeichnung der medizinischen Strahlenexposition eines Patienten.
Dosis-Wirkungs-Beziehung	Als Dosis-Wirkungs-Beziehung wird der funktionale Zusammenhang zwischen der Dosis eines Agens und der daraus resultierenden Wirkung bezeichnet. In Bezug auf Strahlung geht es dabei typischerweise um den Zusammenhang zwischen einer Strahlendosis und der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten oder die Ausprägung eines biologischen Effektes (siehe auch LNT).
DRG-Statistik	DRG steht für „Diagnosis Related Groups“. Die DRG-Statistik ist eine fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik und eine jährliche Vollerhebung, von den erbrachten Leistungen der berichtspflichtigen Krankenhäuser. Die kontinuierliche vollstationäre Behandlung im Krankenhaus (Behandlungskette) wird erfasst. Somit sind nur vollstationäre Behandlungen, insbesondere Operationen und Behandlungsmaßnahmen in der Statistik enthalten.
Echokardiografie	Die Echokardiografie ist eine sonografische Untersuchung des Herzens zur Beurteilung von Herzstruktur, Blutfluss und Pumpfunktion.
effektive Dosis	Die effektive Dosis ist die Summe der mit den zugehörigen, von der ICRP empfohlenen und in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T multiplizierten Organ-Äquivalentdosen H_T in relevanten Organen und Geweben $E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R}.$ H_T ist die Organ-Äquivalentdosis in einem Gewebe oder Organ T; w_T ist der Gewebe-Wichtungsfaktor, w_R der Strahlungs-Wichtungsfaktor. Die Einheit der effektiven Dosis ist $J\ kg^{-1}$. Um deutlich zu machen, dass es sich um eine gewichtete Dosisgröße handelt, wird wie bei der Äquivalentdosis anstelle von Gray (Gy) die Einheit Sievert (Sv) verwendet.
epidemiologische Längsschnittstudie	Eine epidemiologische Längsschnittstudie analysiert den Zusammenhang zwischen einer Exposition und einem Gesundheitsendpunkt auf der Basis von Daten zu Exposition, Endpunkt und weiteren relevanten Größen, die für eine längere Zeitperiode des Lebens der an der Studie teilnehmenden Personen erhoben wurden. Epidemiologische Längsschnittstudien können retrospektiv und prospektiv angelegt sein. Zwei Untersuchungsdesigns sind die Fall-Kontroll-Studie und die Kohortenstudie.

Verweis: Fall-Kontroll-Studie, Kohortenstudie

Excess Relative Risk (ERR)

Excess Relative Risk ist eine Weiterleitung auf diese Seite:

Das zusätzliche relative Risiko (Excess relative risk, ERR) ist der um 1 verminderte Quotient aus dem Risiko eines Ereignisses (z. B. Krankheit oder Tod) in einer exponierten Population und dem Risiko in einer nicht exponierten Population. Das zusätzliche relative Risiko kann in strahlenepidemiologischen Studien aus dem um 1 verminderten Quotient der Ereignisraten in beiden Gruppen geschätzt werden. In der Literatur wird dieser Zusammenhang oft nicht dargestellt und das „Excess Relative Risk“ mit dem um 1 verminderten Quotient der Ereignisraten gleichgesetzt.

Excess Odds Ratio (EOR)

siehe ERR im SSK-Glossar:

In der Literatur wird teilweise anstelle des ERR das EOR (excess odds ratio) verwendet, das bei niedrigen Häufigkeiten einer Erkrankung (weniger als etwa 10% in einer Population) numerisch in etwa dem ERR entspricht.

Exclusion Period

Die Exclusion Period in einer längsschnittlichen epidemiologischen Studie ist ein auf die Exposition folgender Zeitraum, während dessen auftretende Ereignisse des untersuchten Gesundheitsendpunkts nicht berücksichtigt werden. Dieser Zeitraum gilt daher nicht als Zeit unter Risiko.

Ziel des Einsatzes einer Exclusion Period ist Reverse Causation zu verhindern. Die gewählte Länge der Exclusion Period basiert auf Überlegungen zur minimalen Zeitdauer der Krankheitsentwicklung von der Exposition bis zur Diagnostizierbarkeit der Krankheit.

Verweis: Epidemiologische Längsschnittstudie, Reverse Causation

Fall-Kontroll-Studie

Eine Fall-Kontroll-Studie ist eine längsschnittliche epidemiologische Beobachtungsstudie. In diesem Design wird zunächst eine Gruppe von Personen identifiziert, bei der ein relevantes Gesundheitsereignis eingetreten ist, etwa eine diagnostizierte Krebserkrankung oder der Tod. Die so ermittelten Personen repräsentieren die Fälle. Jedem Fall werden individuell Personen als Kontrolle zugeordnet, die dem zugehörigen Fall bzgl. wichtiger Basiseigenschaften äquivalent sind, etwa Geschlecht und Alter. Retrospektiv wird anschließend sowohl für Fälle als auch für Kontrollen eine in der Vergangenheit liegende Exposition durch einen oder mehrere Risikofaktoren individuell rekonstruiert. Die Auswertung der

erhobenen Daten kann den Zusammenhang zwischen der Exposition und dem Auftreten des für die Falldefinition herangezogenen Gesundheitsereignisses quantifizieren.

Verweis: Epidemiologische Längsschnittstudie

Gewebe-Wichtungsfaktor

Die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T beschreiben näherungsweise den Anteil des Strahlenrisikos, der sich bei homogener Ganzkörperbestrahlung aus der Bestrahlung eines Gewebes oder Organs T für das Gesamtrisiko ergibt. Die Gewebe-Wichtungsfaktoren stellen Mittelwerte dar, gemittelt über Menschen beider Geschlechter und aller Altersgruppen, und beziehen sich somit nicht auf die Eigenschaften einzelner Personen. Durch die Gewebe-Wichtungsfaktoren werden die einzelnen Organ-Äquivalentdosen H_T zur Berechnung der effektiven Dosis E gewichtet. Diese Faktoren w_T spiegeln die unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Organe, Gewebe und Körperteile T gegenüber stochastischen Strahlenwirkungen (Krebsinduktion, Auslösung von Erbschäden) wider.

Kohortenstudie

Eine Kohortenstudie ist eine längsschnittliche epidemiologische Beobachtungsstudie. In diesem Design wird zunächst eine Gruppe von Personen entsprechend von Ein- und Ausschlusskriterien als eine Kohorte definiert. Für die Mitglieder dieser Kohorte wird die individuelle Exposition durch einen oder mehrere Risikofaktoren zusammen mit weiteren Personeneigenschaften erhoben. Über einen längeren Zeitraum wird die Kohorte längsschnittlich beobachtet, um dabei eintretende Gesundheitsereignisse – etwa eine neu diagnostizierte Krebserkrankung oder der Tod – individuell zu dokumentieren. Die Auswertung der erhobenen Daten kann den Zusammenhang zwischen der Exposition und dem Auftreten von Gesundheitsereignissen quantifizieren. Kohortenstudien können sowohl prospektiv als auch retrospektiv durchgeführt werden.

Verweis: Epidemiologische Längsschnittstudie

LAR

Das Lebenslange Atttributable Risiko (Lifetime Attributable Risk, LAR) ist das für die gesamte Lebensspanne berechnete Atttributable Risiko (Attributable Risk, AR) für ein Gesundheits-Ereignis – etwa eine Krebserkrankung.

Werden in einem festen Zeitraum mit R_1 das Risiko unter Exponierten, mit R_0 das Risiko unter nicht Exponierten, mit RR das Relative Risiko R_1 / R_0 und mit ERR das Excess Relative Risk bezeichnet, dann gilt:

$$AR = \frac{R1 - R0}{R1} = \frac{RR - 1}{RR} = \frac{ERR}{1 + ERR}$$

Die Terminologie ist nicht einheitlich. AR wird auch als „Attributable Fraction Among the Exposed“ bezeichnet. Mit einigen Zusatzvoraussetzungen ist AR der Anteil des Risikos von Exponierten, für den die Exposition verantwortlich sein könnte. Für diese Interpretation wird auch die Bezeichnung „Etiologic Fraction“ verwendet. Mit einigen Voraussetzungen ist AR gleich der Wahrscheinlichkeit, dass ein auftretendes Gesundheits-Ereignis durch die Exposition verursacht sein könnte („Probability of Causation“, „Assigned Share“).

LNT Modell

Linear-No-Threshold Model. Dieses Modell beschreibt die im Strahlenschutz gemachte Annahme, dass die Häufigkeit eines stochastischen Effektes, die im mittleren bis hohen Dosisbereich (etwa 0,1 bis 5 Gy) beobachtet wird, linear bis zur Dosis Null (also ohne Schwellendosis) extrapoliert werden kann.

Morbidität

Morbidität bezeichnet die Häufigkeit des Auftretens von Krankheiten in einer Population.

Mortalität

Die Mortalität bezeichnet die Anzahl der Todesfälle die innerhalb eines Bezugszeitraums in einer spezifischen Population auftreten.

**Operationen-und
Prozedurenschlüssel (OPS)**

Klassifikation von Operationen, Prozeduren und medizinischen Maßnahmen. Zweck der OPS-Codes ist primär die Verschlüsselung für die Abrechnung mit den jeweiligen Krankenkassen (gesetzlich sowie privat). Die OPS-Codes werden für die Abrechnung im stationären Bereich angewandt. Für die Abrechnung im ambulanten Bereich, die hier nicht erfasst ist, erfolgt die Klassifikation mittels des Einheitlichen Bemessungsmaßstabs (EBM) (gesetzliche Krankenkassen) oder der Gebührenordnung für Ärzte (GOÄ) (private Krankenkassen).

PECO Schema

Im PECO Schema steht P für Population, E für Exposure, C für Comparator und O für Outcome. Das Schema dient dazu, eine epidemiologische Fragestellung präzise zu definieren. Es kann sowohl bei der Planung einer Studie als auch zur Festlegung der Suchstrategie bei einer systematischen Literaturrecherche als Orientierung dienen.

Polytrauma

Ein Polytrauma bezeichnet lebensbedrohliche, gleichzeitig aufgetretene Verletzungen mehrerer Organsysteme bzw. Körperregionen.

Radiografie	Die Radiografie (auch als „konventionelles Röntgen“ bezeichnet) ist ein bildgebendes Verfahren unter Verwendung von Röntgenstrahlen zur Erzeugung zweidimensionaler Abbildungen von Objekten. In der Humanmedizin basierte sie bis in die 1980er Jahre auf der Film-Folientechnik, danach auf der Verwendung digitaler Speicherfolien und seit den 1990er Jahren zunehmend auf der Verwendung digitaler Festkörperdetektoren.
Reverse Causation	Die einer strahlenepidemiologischen Studie zugrundeliegende Fragestellung ist typischerweise, ob eine Strahlenexposition kausal für ein erhöhtes Krankheitsrisiko verantwortlich ist. Reverse Causation beschreibt die Situation, dass sich die untersuchte Krankheit bereits vor der Exposition bei einer an der Studie teilnehmenden Person entwickelt, jedoch noch nicht diagnostiziert ist und der Prozess der Krankheitsentwicklung eine erhöhte Strahlenexposition bewirkt.
Size Specific Dose Estimate (SSDE)	Die Size Specific Dose Estimate (SSDE) (dt. größenabhängige Dosisabschätzung) berücksichtigt die unterschiedlichen Patientendurchmesser im Vergleich zu den auf zwei Phantomgrößen (Kopf 16 cm und Körper 32 cm) beschränkten CTDI _{vol} . Der Wert berechnet sich als $SSDE = CTDI_{vol} \times f$ (f ist ein Faktor basierend auf dem effektiven Patientendurchmesser). Der effektive Durchmesser wird als Quadratwurzel des Produkts aus dem anteroposterioren (a.p.) und lateralen (lat.) Durchmesser des Patienten berechnet.
Sonografie	Stellt ein bildgebendes Verfahren unter Einsatz von Ultraschall dar.
Staging	Staging bezeichnet die Stadienbestimmung zur Feststellung des Ausbreitungsgrades eines malignen Tumors.
Standard Operating Procedures (SOPs)	In den SOP werden standardisierte Arbeitsweisungen und Parameter zur Durchführung von Untersuchungen festgelegt.
Strahlenkanzerogenität	Eigenschaft von Strahlung, Krebs (bösartige Tumoren) hervorzurufen oder die Krebsbildung zu fördern.
Surrogatmarker	Indirekter Indikator für die Erfassung eines Effekts. Ein Surrogatmarker wird verwendet, wenn die eigentlich relevante Messgröße, an der sich ein Effekt zeigt, nicht erfasst werden kann.
Tumorprädispositionssyndrom	Genetisch bedingte Erkrankung, die das individuelle Risiko für die Entwicklung bösartiger Tumoren erhöht.

Zusatzfilter

Diese Filter beim CT bestehen z. B. aus einer Aluminiumlegierung, Silber oder Zinn. Sie werden verwendet, um die Strahlenqualität zu erhöhen, indem weiche, bildunwirksame Strahlen absorbiert werden, die sonst eine unnötige Strahlenbelastung für die Patientin oder den Patienten darstellen würden.