

JAMA Internal Medicine | [Originaluntersuchung](#) | WENIGER IST MEHR

Prognostiziertes Lebenszeit-Krebsrisiko durch aktuelle Computertomographie-Bilder

Rebecca Smith-Bindman, MD; Philip W. Chu, MS; Hana Azman Firdaus, MPH; Carly Stewart, MHA; Matthew Malekheaday, BS; Susan Alber, PhD; Wesley E. Bolch, PhD; Malini Mahendra, MD; Amy Berrington de González, DPhil; Diana L. Miglioretti, PhD

WICHTIG Jährlich werden in den Vereinigten Staaten etwa 93 Millionen Computertomographie-Untersuchungen (CT) an 62 Millionen Patienten durchgeführt, und die ionisierende Strahlung der CT ist ein bekanntes Karzinogen.

ZIEL Hochrechnung der Anzahl zukünftiger Krebserkrankungen in der US-Bevölkerung im Zusammenhang mit der CT-Bildgebung im Jahr 2023.

DESIGN, EINRICHTUNG UND TEILNEHMER Für dieses Risikomodell wurde eine multizentrische Stichprobe von CT-Untersuchungen verwendet, die zwischen Januar 2018 und Dezember 2020 prospektiv aus dem internationalen CT-Dosis-Register der University of California San Francisco zusammengestellt wurde. Die Datenanalyse wurde von Oktober 2023 bis Oktober 2024 durchgeführt.

WICHTIGSTE ERGEBNISSE UND MASSNAHMEN Die Verteilungen der CT-Untersuchungen und der damit verbundenen organspezifischen Strahlendosen wurden nach Alter, Geschlecht und CT-Kategorie der Patienten geschätzt und auf die US-Bevölkerung skaliert, basierend auf der Anzahl der Untersuchungen im Jahr 2023, die durch die nationale IMV-Erhebung ermittelt wurde. Die durch Strahlung verursachte Krebsinzidenz und die 90%ige Unsicherheitsgrenze (UL) wurden nach Alter, Geschlecht und CT-Kategorie mit einer Software des National Cancer Institute auf der Grundlage des Modells Biological Effects of Ionizing Radiation VII des National Research Council geschätzt und anhand der skalierten Untersuchungszahlen auf die US-Bevölkerung projiziert.

ERGEBNISSE Schätzungsweise 61 510 000 Patienten unterzogen sich 93 000 000 CT-Untersuchungen in 2023, darunter 2 570 000 (4,2%) Kinder, 58 940 000 (95,8%) Erwachsene, 32 600 000 (53,0 %) weibliche Patienten und 28 910 000 (47,0 %) männliche Patienten. Ungefähr 103 000 (90% UL, 96 400-109 500) strahleninduzierte Krebserkrankungen wurden für diese Untersuchungen prognostiziert. Die geschätzten strahleninduzierten Krebsrisiken waren bei Kindern und Jugendlichen höher, wobei der größte Teil auf die höhere CT-Nutzung bei Erwachsenen zurückzuführen ist (93 000; 90% UL, 86 900-99 600 [91%]) strahleninduzierte Krebserkrankungen. Die häufigsten Krebsarten waren Lungen Lungenkrebs (22 400 Fälle; 90% UL, 20 200-25 000 Fälle), Dickdarmkrebs (8700 Fälle; 90% UL, 7800-9700 Fälle), Leukämie (7900 Fälle; 90% UL, 6700-9500 Fälle) und Blasenkrebs (7100 Fälle, 90% UL, 6000-8500 Fälle) insgesamt, während bei weiblichen Patienten Brustkrebs am zweithäufigsten war (5700 Fälle; 90% UL, 5000-6500 Fälle). Die meisten Krebsfälle wurden bei Erwachsenen durch CT-Untersuchungen des Abdomens und des Beckens prognostiziert, nämlich 37 500 von 103 000 Krebsfällen (37 %) und 30 Millionen von 93 Millionen CT-Untersuchungen (32 %), gefolgt von Brust-CT (21 500 Krebsfälle [21 %]; 20 Millionen Untersuchungen [21 %]). Die Schätzungen blieben auch bei einer Reihe von Sensitivitätsanalysen hoch, was zu einer Spanne von 80 000 bis 127 000 prognostizierten Krebserkrankungen in allen Analysen führte.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND RELEVANZ Diese Studie ergab, dass CT-Untersuchungen im Jahr 2023 bei der derzeitigen Inanspruchnahme und Strahlendosis im Laufe des Lebens der exponierten Patienten voraussichtlich zu etwa 103 000 künftigen Krebserkrankungen führen werden. Wenn die derzeitigen Praktiken beibehalten werden, könnte CT-assoziiierter Krebs schließlich 5 % aller neuen Krebsdiagnosen pro Jahr ausmachen.

JAMA Intern Med. 2025;185(6):710-719. doi:10.1001/jamainternmed.2025.0505 Veröffentlicht online am 14. April 2025. Korrigiert am 2. Juni 2025.

← Anmerkung der Redaktion Seite 719

+ Ergänzender Inhalt

Autorenzugehörigkeit: Die Namen der Autoren sind am Ende dieses Artikels aufgeführt.

Korrespondierender Autor: Rebecca Smith-Bindman, MD, Abteilung für Epidemiologie und Biostatistik, University of California, San Francisco, 550 16th St, Box 0560, San Francisco, CA 94143 (rebecca.smith-bindman@ucsf.edu).

Computertomographie (CT) ist ein unverzichtbares und weit verbreitetes bildgebendes Verfahren in der Medizin. Ständige technische Weiterentwicklungen erweitern ihre Möglichkeiten und ihre Beliebtheit, und die Inanspruchnahme nimmt in den Vereinigten Staaten weiter zu und übersteigt das präpandemische Volumen.¹ Während die CT die Diagnose unterstützt und zu besseren Ergebnissen führt, setzt sie die Patienten auch ionisierender Strahlung in

einer Höhe aus, die bekanntermaßen mit einem erhöhten Krebsrisiko verbunden ist. Mehrere große retrospektive Kohortenstudien haben gezeigt, dass eine CT-Exposition im Kindesalter mit einem erhöhten Risiko für hämatologische bösartige Neubildungen und Hirntumore einhergeht.²⁻⁵ Bei Erwachsenen beruhen die Krebsrisiken durch niedrige bis mittlere Strahlendosen in erster Linie auf Studien an japanischen Atombombenüberlebenden oder an Bevölkerungsgruppen, die durch medizinische oder berufliche Expositionen bestrahlt wurden.^{6,7} Es gibt jedoch auch Hinweise darauf, dass die Computertomographie bei Erwachsenen die DNA schädigt.⁸ Die strahleninduzierten Krebsrisiken bei CT-Untersuchungen variieren je nach Strahlendosis, die von der klinischen Indikation, der abgebildeten Körperregion, dem Geschlecht, dem Alter und der Größe der Patienten sowie der Aufnahmetechnik abhängt.⁹ In einer Analyse aus dem Jahr 2009¹⁰ wurde geschätzt, dass im Jahr 2007 in den Vereinigten Staaten etwa 29 000 künftige Krebserkrankungen auf routinemäßige CT-Expositionen zurückzuführen waren. Die Autoren der Studie verwendeten die besten verfügbaren Daten über den Umfang und die Verteilung der Untersuchungen, Näherungswerte für die Strahlungsdosen und die damit verbundenen absorbierten Organdosen. Seitdem ist die Zahl der jährlich in den Vereinigten Staaten durchgeführten CT-Untersuchungen um mehr als 30 % gestiegen,¹ es stehen inzwischen detailliertere Daten zur Beschreibung der Untersuchungsarten zur Verfügung, und es werden genauere Methoden verwendet.

Für die Schätzung der Organdosis wurden verschiedene Methoden entwickelt.

Diese Studie aktualisiert frühere Projektionen der lebenslangen Krebsinzidenz im Zusammenhang mit der Computertomographie unter Verwendung der neuesten verfügbaren Nutzungszahlen, empirischer Daten über die Art der Computertomographie nach Alter und Geschlecht sowie von Organdosen, die direkt aus klinischen Daten auf Untersuchungsebene in den Vereinigten Staaten unter Verwendung von Best-Practice-Methoden geschätzt wurden. Ziel ist es, die Auswirkungen der derzeitigen CT-Nutzung auf die öffentliche Gesundheit zu verstehen und die Untersuchungsarten, Alters- und Geschlechtsgruppen mit dem höchsten Risiko zu ermitteln.

Methoden

Für dieses Risikomodell wurden Daten auf Patientenebene aus dem International CT Dose Registry der University of California San Francisco (UCSF) verwendet, in dem CT-Untersuchungen aus 143 US-amerikanischen Krankenhäusern und ambulanten Einrichtungen, die 22 Gesundheitsorganisationen in 20 Bundesstaaten angehören, erfasst wurden.⁹ Für jede Untersuchung wurden im Rahmen des Registers DICOM-Metadaten (Digital Imaging and Communications in Medicine) erfasst, darunter Alter und Geschlecht des Patienten, effektiver Durchmesser des abgebildeten Körperteils, Scannertyp, Untersuchungsname und -beschreibung sowie weitere technische Aufnahmeparameter wie Kilospannung, Milliampere-Stundenzahl, Scanlänge, Phase, Neigung und Kollimation. Das UCSF Committee on Human Research genehmigte die Studie mit einem Verzicht auf die Einwilligung, da es aufgrund der großen Anzahl von Datensätzen unpraktisch war, alle Teilnehmer zu kontaktieren, die Forscher die Identität der Teilnehmer nicht kannten und das Risiko der Kontaktaufnahme mit den Teilnehmern größer war als die Risiken der Studie. Die mitwirkenden Einrichtungen erhielten eine lokale Ethikgenehmigung. Wir haben uns an die STROBE-Richtlinie (Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology) zur Berichterstattung gehalten.

Wichtige Punkte

Frage Wie viele Krebserkrankungen könnten in Zukunft durch die Strahlenbelastung bei jährlichen Computertomographie-Untersuchungen (CT) in den Vereinigten Staaten entstehen?

Ergebnisse In diesem Risikomodell wurde prognostiziert, dass die 93 Millionen CT-Untersuchungen, die bei 62 Millionen Patienten im Jahr 2023 durchgeführt werden, zu etwa 103 000 zukünftigen Krebserkrankungen führen werden. Obwohl das Krebsrisiko pro Untersuchung bei Kindern höher war, war die höhere CT-Nutzung bei Erwachsenen für den Großteil der prognostizierten Krebsfälle verantwortlich.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass CT-assoziierte Krebserkrankungen schließlich 5 % aller jährlichen Krebsneuerkrankungen ausmachen könnten, wenn die derzeitige Praxis der Strahlendosierung und -nutzung beibehalten wird.

CT-Nutzung

Wir haben den IMV Medical Information Division CT Market Outlook Report verwendet, der auf einer nationalen, jährlichen Umfrage bei 235 Krankenhäusern und 78 Bildgebungseinrichtungen basiert, um die Anzahl der CT-Untersuchungen in den Vereinigten Staaten im Jahr 2023 zu quantifizieren.¹ Die IMV-Daten zur Nutzung der medizinischen Bildgebung wurden vom US National Council on Radiation Protection Report No. 184 anhand von Quellen wie Medicare und der Veteranenverwaltung validiert und in mehreren Veröffentlichungen verwendet. 184 validiert und in mehreren Veröffentlichungen verwendet.^{11,12} Zur Aufteilung der Untersuchungen auf Erwachsene und Kinder haben wir den Anteil pädiatrischer Untersuchungen im Jahr 2022 im National Radiology Data Registry des American College of Radiology (ACR) verwendet (Judy Burleson, MHSA, und Mike Simanowith, MD, ACR, E-Mail, 13. November 2023). Um die Anzahl der Patienten zu schätzen, die sich im Jahr 2023 einer CT unterzogen, wurden Längsschnittdaten aus dem Register aus den Jahren 2016 und 2020 verwendet, um die jährliche Anzahl der Untersuchungen pro Patient nach Alter und Geschlecht zu schätzen (der Mittelwert lag zwischen 1,1 und 1,7). Dieser Durchschnittswert wurde auf die Gesamtzahl der CT-Untersuchungen im Jahr 2023 nach Geschlecht und Altersgruppe angewandt, um die Zahl der exponierten Patienten zu schätzen.

Verteilung der Untersuchungen nach Alter, Geschlecht und CT-Kategorie

Anhand von DICOM-Metadaten wurden die CT-Untersuchungen im Register einer von 26 CT-Kategorien zugeordnet, die eine Kombination aus Körperregion und klinische Indikation (18 bei Erwachsenen¹³; 13 bei Kindern [Denise Bos, MD, unveröffentlichte Daten, März 2025] (eMethods in Supplement 1). Einige CT-Kategorien stehen für eine einzige Körperregion (z. B. Halswirbelsäule), während andere Regionen in Kategorien unterteilt sind, die den Strahlendosisbedarf der zugrunde liegenden Indikation widerspiegeln (z. B. umfasst die niedrige Dosis im Abdomen die Bildgebung bei Nierensteinen, die Routinedosis bei Traumata und die hohe Dosis bei Krebs).

Um die Verteilung der Untersuchungen nach Alter, Geschlecht und CT-Kategorie zu schätzen, haben wir pädiatrische Untersuchungen (Alter 0-17 Jahre) aus dem Register von Januar 2018 bis Dezember 2020 (46 559 Patienten) und Untersuchungen bei Erwachsenen (Alter 18-99 Jahre) von Januar bis Dezember 2020 (74 653 Patienten) verwendet. Wir schlossen CT-Untersuchungen im Zusammenhang mit Biopsien und Verfahren, Positronen-Emissions-Tomographie oder Forschung (allesamt selten) sowie Alters-, Geschlechts- und CT-Kategorie-Schichten mit weniger als 12 Untersuchungen aus, da die geschätzten Dosen ungenau sein könnten. Für pädiatrische Untersuchungen wurden zusätzliche Jahre an Daten verwendet.

(2018–2020) mit den Untersuchungen bei Erwachsenen (2020) verglichen, um stabile Schätzungen innerhalb der Schichten sicherzustellen. Wir überprüften, ob die Verteilung der CT-Kategorien und der Strahlendosis pro Kategorie bei Erwachsenen von 2018 bis 2020 stabil blieb. Aus dieser Stichprobe von 121 212 Untersuchungen schätzten wir die Anteile der Untersuchungen nach Alter, Geschlecht und CT-Kategorie, was zu 418 Schichten führte: 288 bei Erwachsenen (18 CT-Kategorien, 8 Altersgruppen, 2 Geschlechter); und 130 bei Kindern (13 CT-Kategorien, 5 Altersgruppen, 2 Geschlechter).

Rekonstruktion der individuellen, patientenabhängigen Organdosis

Wir schätzten die absorbierten Dosen (Strahlungstransportcode MCNPX Version 2.70 [Los Alamos National Laboratory]) für 18 Organe für jede CT-Untersuchung durch Monte-Carlo-Strahlungs transportsimulationen unter Verwendung exakter technischer Parameter auf Untersuchungsebene und der Patientengröße, die auf morphometrieangepasste hybride Computerphantome aus der Phantombibliothek der University of Florida/National Cancer Institute abgebildet wurden.^{14–17} Anschließend berechneten wir die mittleren Organdosen (und SDs) in Milligramm (mGy) für jede Schicht.

Statistische Auswertung

Schätzung des Krebsrisikos

Wir haben das zukünftige strahleninduzierte Krebsrisiko für die gesamte Lebenszeit mit Hilfe der Software Radiation Risk Assessment Tool (RadRAT)^{18,19} des National Cancer Institute, Version 4.3.1, die Risikomodelle aus dem Bericht Biologic Effects of Ionizing Radiation (BEIR) VII der National Academy of Sciences für 11 ortsspezifische Krebsarten (Magen-, Dickdarm-, Leber-, Lungen-, Brust-, Gebärmutter-, Eierstock-, Prostata-, Blasen- und Schilddrüsenkrebs sowie Leukämie) verwendet, plus 7 zusätzliche Krebsarten (Mundhöhle oder Rachen, Speiseröhre, Mastdarm, Bauchspeicheldrüse, Niere und Gehirn oder Zentralnervensystem plus eine Restkategorie) unter Verwendung einer neueren Nachuntersuchung der japanischen Atombombenüberlebenden und gepoolter Analysen anderer medizinisch exponierter Kohorten.¹⁸ Für einen gegebenen Krebs-Typ schätzt RadRAT das überschüssige Lebenszeit-Krebsrisiko ab dem Zeitpunkt der Exposition auf der Grundlage der vom Benutzer angegebenen Organdosis und der US-Lebenszeittabellen-Schätzungen der alters- und geschlechtsspezifischen Basis-Krebsraten. Diese Risikoschätzungen berücksichtigen den Tod als konkurrierendes Risiko unter Verwendung geschlechtsspezifischer Lebenszeittabellenschätzungen für die US-Bevölkerung 2019. Wir haben Lösungen entwickelt, um die Massenanzahl von RadRAT zur Schätzung der Risiken innerhalb der 418 Schichten zu beschleunigen (eMethods in Supplement 1).

Krebs-Projektionen

Wir skalierten die Register-basierte Verteilung der CT-Kategorien nach Alter und Geschlecht mit der vom IMV abgeleiteten Gesamtzahl der Untersuchungen unter Verwendung des ACR-Prozentsatzes pädiatrischer Untersuchungen, um die Verteilung der Untersuchungen auf der Ebene der US-Bevölkerung im Jahr 2023 zu schätzen. Wir schlossen Untersuchungen im letzten Lebensjahr aus, die angesichts der durchschnittlichen Latenzzeit zwischen CT-Belastung und strahleninduzierter Krebsentstehung wahrscheinlich nicht zur Krebsentstehung beitragen werden. Um diesen Anteil zu bestimmen, quantifizierten wir die Anzahl der CT-Untersuchungen, die im Jahr 2022 in den letzten 1 und 2 Lebensjahren der Patienten für jede Alters- und Geschlechtsschicht bei Kaiser Permanente Northern California durchgeführt wurden, und folgten dabei veröffentlichten Methoden.^{19,20} Insgesamt wurden 10,6 % der Untersuchungen im letzten Lebensjahr durchgeführt (9,4 % bei weiblichen Patienten).

Patienten und 12,1 % bei männlichen Patienten), die von 0,9 % bei Kindern im Alter von 1 bis 4 Jahren (1,4 % Mädchen und 0,5 % Jungen) bis zu 38,6 % bei Erwachsene im Alter von 90 bis 99 Jahren (35,1 % Frauen und 44,4 % Männer). Wir haben dann die prognostizierten Krebsraten aus RadRAT auf die Anzahl der Untersuchungen auf nationaler Ebene angewandt (reduziert um den Anteil der Untersuchungen am Lebensende), um die Lebenszeit-Krebsinzidenz und die 90%-Unsicherheitsgrenzen (UL) zu schätzen, die sich aus CT-Untersuchungen im Jahr 2023 ergeben. Da die künftigen Krebschätzungen auf einem linearen Modell der insgesamt aufgenommenen Strahlendosis beruhen, bleibt die voraussichtliche Zahl der Krebserkrankungen gleich, unabhängig davon, ob die Analyse auf der Zahl der Patienten (62 Millionen, die sich jeweils durchschnittlich 1,5 Untersuchungen unterzogen) oder der Untersuchungen (93 Millionen) basiert.

Unsicherheitsabschätzungen und Sensitivitätsbetrachtungen

RadRAT verwendet Monte-Carlo-Simulationen auf der Grundlage von Latin-Hyper-Cube-Stichproben, um die Unsicherheit der Koeffizienten des Strahlenrisikomodells, den Risikotransfer von der japanischen auf die US-amerikanische Bevölkerung, den Dosis- und Dosisleistungsreduktions-Effektivitätsfaktor (DDREF), die Unsicherheit der Organdosen und die Anpassungen der minimalen Latenzzeiten zu berücksichtigen.¹⁸ Eine Latenzzeitanpassung wurde schrittweise zwischen 4,0 und 11,0 Jahren nach der Exposition für solide Krebsarten, 0,4 und 4,1 Jahre für Leukämie und 2,5 und 7,6 Jahre für Schilddrüsenkrebs. Um die Unsicherheit bei den Anpassungen für die minimale Latenzzeit bei den Risikoschätzungen darzustellen, wird der Mittelwert μ durch die folgenden dreieckigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben: feste Krebsarten außer Schilddrüse, T(5, 7,5, 10); Schilddrüse, T(3, 5, 7); und Leukämie, T(2, 2,25, 2,5), wobei die Zahlen die Zeit nach der Exposition in Jahren angeben. RadRAT übertrifft 90 % der ULs und liefert eine obere und untere Schätzung potenzieller zukünftiger Krebserkrankungen.

Es wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, bei denen die Annahmen des Basismodells geändert wurden. Erstens wendeten wir in unseren Projektionen männliche Lungenkrebs-Risikokoeffizienten auf weibliche Patienten an, da einige epidemiologische Studien das dreifach höhere Risiko für strahleninduzierten Lungenkrebs bei weiblichen Patienten im Vergleich zu männlichen Patienten in BEIR VII nicht bestätigen.²¹ Zweitens reduzierten wir das geschätzte jährliche Bildgebungsvolumen um 10 %, um eine mögliche Überschätzung durch das IMV zu berücksichtigen, und drittens erhöhten wir es um 10 %, um eine mögliche Unterschätzung zu berücksichtigen. Viertens haben wir die Organdosen um 20 % reduziert, um mögliche nationale Unterschiede zum UCSF-Register zu berücksichtigen, und fünftens haben wir sie um 20 % erhöht. Sechstens wendeten wir die höhere IMV-Schätzung für den Prozentsatz der CT-Untersuchungen an.

Nationen bei Kindern (9,0 % gegenüber 3,3 %). Siebten haben wir die Verteilung der Untersuchungen nach Alter und CT-Kategorie aus den Kalenderjahren 2018 bis 2019 verwendet, falls die Verteilung für 2020 aufgrund von COVID-19 atypisch war. Schließlich schlossen wir CT-Untersuchungen aus, die in den letzten zwei Jahren statt in einem Jahr durchgeführt wurden, wobei wir nach Alter und Geschlecht differenzierten. Für alle Analysen wurden SAS Version 9.3 (SAS Institute) und R Version 4.2.2 (2022-10-31) ucr [R Project for Statistical Computing]) verwendet. Die Datenanalyse wurde von Oktober 2023 bis Oktober 2024 durchgeführt.

Ergebnisse

Im Jahr 2023 wurden in den Vereinigten Staaten dreiundneunzig Millionen CT-Untersuchungen bei 61 510 000 Patienten durchgeführt, darunter ein

geschätzte 3 069 000 CTs (3,3%) bei 2 570 000 Kindern (4,2%) und 89 931 000 CTs (96,7%) bei 58 940 000 Erwachsenen (95,8%) (Tabelle 1; eTabelle 1 in [Anhang 1](#)). Die Patienten unterzogen sich im Durchschnitt jeweils 1,5 Untersuchungen, die je nach Alter variierten (Tabelle 1), und die mittlere Anzahl der Untersuchungen pro Patient betrug in allen Altersgruppen 1. Die Gesamtzahl der Untersuchungen nahm mit dem Alter für alle CT-Kategorien zu und erreichte ihren Höhepunkt bei Erwachsenen im Alter von 60 bis 69 Jahren (Abbildung 1; eTabelle 1 in [Anhang 1](#)). Nach Ausschluss der im letzten Lebensjahr durchgeführten Untersuchungen wurden insgesamt 84 161 000 Untersuchungen zur Abschätzung des Krebsrisikos herangezogen.

Organ-Dosen

Die Organdosen nach Körperregionen und Geschlecht sind für die Altersschichten der Proben dargestellt (eTabelle 2 in [Anhang 1](#)). Die Dosen waren für die meisten Kategorien nach Geschlecht ähnlich, aber nicht identisch. So war z. B. die mittlere (SD) Hirndosis bei der routinemäßigen Kopf-CT bei Kindern im Alter von 5 bis 9 Jahren bei Jungen 5 % höher (48,0 [27,3] mGy) als bei Mädchen (45,7 [24,1] mGy). In anderen Kategorien, z. B. Ganzkörperbestrahlung, waren die Unterschiede größer. So war beispielsweise die Dosis für die Bauchspeicheldrüse bei Jungen im Alter von 5 bis 9 Jahren um 29 % höher (21,5 [13,5] mGy) als bei Mädchen im Alter von 5 bis 9 Jahren (16,7 [8,9] mGy). Im Allgemeinen waren die Organdosen bei Kindern und Erwachsenen ähnlich oder nahmen mit dem Alter zu. So war beispielsweise die mittlere (SD) Kolondosis bei der Routine-CT des Abdomens und des Beckens bei Frauen im Alter von 50 bis 59 Jahren etwa doppelt so hoch (25,4 [15,2] mGy) gegenüber Mädchen im Alter von 5 bis 9 Jahren (12,8 [8,7] mGy). Es gab jedoch Ausnahmen: Die Organdosen waren insgesamt bei Kindern unter 1 Jahr am höchsten (z. B. betrug die mittlere [SD] Hirndosis bei der Routine-Kopf-CT bei Jungen <1 Jahr 60,0 [36,5] mGy), und die mittleren (SD) Knochenmarkdosen bei der Kopf-CT nahmen mit dem Alter ab (z. B. Jungen <1 Jahr, 26,7 [16,7] mGy; Jungen im Alter von 5-9 Jahren, 14,6 [10,0] mGy; und Männer im Alter von 50-59 Jahren, 3,5 [2,7] mGy).

Prognostizierte Krebsrisiken

Es wurde geschätzt, dass die CT-Nutzung in den Vereinigten Staaten im Jahr 2023 zu 102 700 (90% UL, 96 400-109 500) prognostizierten Krebsfällen im Leben führen wird.

Krebserkrankungen, darunter 93 000 (90% UL, 86 900-99 600) bei Erwachsenen und 9700 (90% UL, 8100-11 600) bei Kindern (Tabelle 2). Die Blei-Krebserkrankungen bei Erwachsenen waren Lungenkrebs (21 400 [90% UL, 19 200-24 000]), Dickdarmkrebs (8400 [90% UL, 7500-9400]) und Leukämie (7400 [90% UL, 6100-8900]), während die häufigsten projizierten Krebsarten bei Kindern Schilddrüsenkrebs (3500 [90% UL, 2300-5500]), Lungenkrebs (990 [90% UL, 870-1100]) und Brustkrebs waren. (630 [90% UL, 550-730]) Krebs (Tabelle 2; eAbbildung in [Beilage 1](#)). Die Inzidenz von Lungen- und Schilddrüsenkrebs war bei männlichen Patienten höher, während die Inzidenz der meisten anderen Krebsarten je nach Geschlecht ähnlich oder bei männlichen Patienten leicht höher war (eAbbildung und eTabelle 3 in [Anhang 1](#)).

Prognostizierte Krebserkrankungen nach Alter

Das projizierte Krebsrisiko pro CT-Untersuchung war schätzungsweise am höchsten bei Kindern, die sich im Alter von unter einem Jahr einer CT unterzogen, und nahm mit dem Alter bei der Exposition ab (Abbildung 1). So lag das Krebsrisiko bei Mädchen, die jünger als 1 Jahr waren, bei 20 Krebserkrankungen pro 1000 Untersuchungen (1900 von 97 000) gegenüber 2 pro 1000 bei Mädchen im Alter von 15 bis 17 Jahren (1100 von 483 600) (eTabellen 1 und 4 in [Anhang 1](#)). Trotz des höheren Risikos pro Untersuchung bei Kindern trug die höhere Inanspruchnahme jedoch zu einem höheren Pro-

Krebserkrankungen bei Erwachsenen (Tabelle 2 und Abbildung 2). Die Verwendung von CT bei Erwachsenen im Alter von 50 bis 59 Jahren war mit der höchsten Anzahl an prognostizierten Krebserkrankungen verbunden: 10 400 (90% UL, 8200-13 000) bei fe-

männlichen Patienten und 9300 (90% UL, 7500-11 700) bei männlichen Patienten (eTabelle 4 in [Anhang 1](#)).

Prognostizierte Krebserkrankungen nach CT-Kategorie

Die Bauch- und Becken-CT trug bei Erwachsenen schätzungsweise am meisten zu den prognostizierten Krebserkrankungen (40 %) bei (37 500 [90 % UL, 32 900-42 600] Fälle), während die Kopf-CT bei Kindern die größte Anzahl von Krebserkrankungen (53 %) verursachte (5100 [90 % UL, 3700-7100] (Tabelle 2 und Abbildung 3; eTabelle 3 in [Anhang 1](#)). Bei einigen wenigen Kategorien, wie z. B. der Ganzkörper-CT, war der prognostizierte Anteil der Krebserkrankungen (8000 [7,8 %]) größer als der Anteil der Scans (4 607 000 Scans [5,0 %]) (Tabellen 1 und 2).

Sensitivitäts-Analysen

Die Sensitivitätsanalysen ergaben eine Spanne von 79 900 bis 126 600 geschätzten Krebserkrankungen, indem die Organdosen um 20 % reduziert bzw. erhöht wurden, was 22,2 % weniger Krebserkrankungen bis zu 23,3 % mehr Krebserkrankungen als in der Primäranalyse entspricht (eTabelle 6 in [Anhang 1](#)). Die Verwendung des vom IMV geschätzten Anteils pädiatrischer Untersuchungen führte zu einem Anstieg der prognostizierten Krebserkrankungen insgesamt um 11,0 % (auf 114 000) und zu einem Anstieg des Anteils der Krebserkrankungen durch Bildgebung im Kindesalter von 9,4 % auf 23,2 %.

Diskussion

Die Computertomographie ist häufig lebensrettend, doch ihre potenziellen Schäden werden oft übersehen, und selbst ein sehr geringes Krebsrisiko wird angesichts des enormen Umfangs der Computertomographie in den Vereinigten Staaten zu einer beträchtlichen Anzahl künftiger Krebserkrankungen führen. Bei der derzeitigen Nutzung und Strahlendosierung gehen wir davon aus, dass im Jahr 2023 in den USA etwa 103 000 künftige Krebserkrankungen durch CT-Untersuchungen verursacht werden könnten (wobei Sensitivitätsanalysen eine Spanne von 80 000 bis 127 000 voraussagen), und zwar bei 62 Millionen Menschen, die sich einer CT unterziehen. Zum Vergleich: Wenn die Zahl der neuen Krebsdiagnosen in den Vereinigten Staaten stabil bleibt (1,95 Millionen im Jahr 2023) und sowohl die Nutzung als auch die Strahlendosis der CT in den kommenden Jahrzehnten unverändert bleiben, könnte die CT für etwa 5 % der jährlich diagnostizierten Krebserkrankungen verantwortlich sein. Damit stünde die CT auf einer Stufe mit anderen bedeutenden Risikofaktoren wie Alkoholkonsum (5,4 %) und Übergewicht (7,6 %).²²

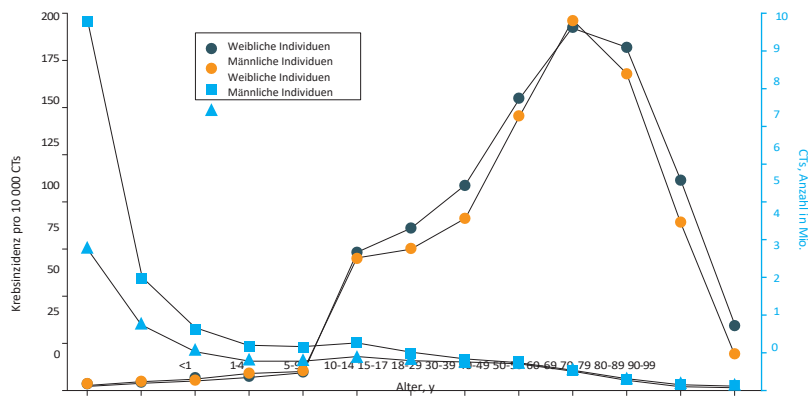
Die prognostizierte Zahl der strahleninduzierten Krebserkrankungen in dieser Analyse ist aus mehreren Gründen drei- bis viermal höher als die frühere Bewertung der CT-Exposition.¹⁰ Erstens hat sich der Anstieg der Nutzung in den letzten Jahren zwar verlangsamt,²⁰ doch ist die CT-Nutzung heute um 30 % höher als 2007, was auf die Zunahme geringwertiger, potenziell unnötiger Bildgebung²³⁻²⁷ sowie auf die Bevölkerungsalterung zurückzuführen ist. Zweitens wurde bei der Dosismodellierung in dieser Studie das mehrphasige Scannen berücksichtigt, das in 28,5 % der Untersuchungen vorkommt, aber in der vorherigen Studie nicht modelliert wurde, da die Häufigkeit von mehrphasigen Untersuchungen nicht bekannt war. Drittens wurden die wesentlich höheren Organdosen in dieser Studie unter Verwendung neuerer Dosimetriemethoden mit Daten auf Untersuchungsebene aus mehr als 120 000 tatsächlichen Untersuchungen rekonstruiert.

Tabelle 1. Geschätzte Anzahl der Patienten, die sich einer CT unterzogen haben, und Anzahl der CT-Untersuchungen in den Vereinigten Staaten im Jahr 2023, nach Geschlecht, Alter und Körperregion^a

Alter, j	Patienten, Nr.	CT-Untersuchungen, Anzahl (%)	Untersuchungen pro Patienten, Mittelwert, Anzahl ^b	Art der CT-Untersuchung, Nr.							
				Abdomen und Becken	Kopf	Brustkorb	Wirbelsäule	Kopf und Hals kombiniert	Herz	Ganzkörper ^c	Extremitäten ^d
Alle	61 510 000	93 000 000 (100)	1.51	30 221 400	24 115 800	19 975 300	7 735 200	2 826 900	1 073 900	4 607 000	2 444 500
Kind	2 570 000	3 069 000 (3.3)	1.19	689 900	1 600 800	275 200	290 000	NA	26 400	57 300	129 300
Erwachsene	58 940 000	89 931 000 (96.7)	1.53	29 531 500	22 515 000	19 700 100	7 445 200	2 826 900	1 047 500	4 549 700	2 315 200
Weiblich											
Alle Altersgruppen	32 600 000	48 549 200 (52.2)	1.49	16 669 900	12 263 700	10 136 700	4 082 800	1 494 100	513 800	2 228 000	1 160 200
<1	90 000	97 000 (0.1)	1.12	4000	72 200	13 100	3100	NA	4500	0	0
1-9	370 000	439 300 (0.5)	1.18	83 100	255 800	43 300	38 500	NA	3200	7900	7400
10-17	740 000	870 000 (0.9)	1.18	270 600	370 500	73 100	93 500	NA	4000	14 500	43 900
18-39	5 960 000	7 972 500 (8.6)	1.34	3 676 800	1 948 000	1 117 300	651 300	190 200	0	219 100	169 800
40-59	8 980 000	13 147 100 (14.1)	1.46	5 136 000	2 953 300	2 590 900	1 004 100	328 700	244 400	589 900	299 800
60-79	12 020 000	18 767 100 (20.2)	1.56	5 546 600	4 290 900	5 010 800	1 600 000	504 500	237 200	1 059 500	517 700
80-99	4 440 000	7 256 200 (7.8)	1.63	1 952 800	2 373 000	1 288 200	692 300	470 700	20 500	337 100	121 600
Männlich											
Alle Altersgruppen	28 910 000	44 450 900 (47.8)	1.54	13 551 400	11 852 300	9 838 700	3 652 500	1 332 800	560 100	2 379 100	1 284 500
<1	100 000	119 800 (0.1)	1.14	6300	87 000	17 400	2200	NA	5900	1100	0
1-9	490 000	580 100 (0.6)	1.18	108 700	356 400	45 200	48 900	NA	3500	10 800	6700
10-17	780 000	962 800 (1.0)	1.23	217 100	459 000	83 100	103 800	NA	5300	23 100	7400
18-39	5 160 000	7 282 700 (7.8)	1.41	2 501 800	2 070 800	909 000	754 900	278 100	59 000	344 300	364 800
40-59	7 770 000	11 780 600 (12.7)	1.52	3 928 500	2 872 600	2 458 500	931 900	304 600	249 200	645 300	390 100
60-79	11 320 000	18 278 300 (19.7)	1.61	5 414 100	4 327 000	5 080 600	1 336 400	456 300	237 200	1 059 500	367 200
80-99	3 290 000	5 446 600 (5.9)	1.66	1 374 900	1 679 500	1 244 900	474 400	293 800	0	295 000	84 300
Abkürzungen: CT, Computertomographie; NA, nicht anwendbar, d. h. diese Kategorie existiert in dieser Altersgruppe nicht.											
^a Ganzkörper umfasst Ganzkörperuntersuchungen bei Kindern und kombinierte Brust-, Bauch- und Beckenuntersuchungen bei Erwachsenen.											
^d Extremitäten umfasst alle Untersuchungen der oberen und unteren Extremitäten.											

^bDies sind die tatsächlich berechneten Mittelwerte auf der Grundlage der genauen Anzahl der Patienten.

Abbildung 1. Anzahl der Computertomographie (CT)-Untersuchungen und Krebsinzidenz nach Geschlecht



Die voraussichtliche Zahl der künftigen Krebserkrankungen wurde anhand der reduzierten Zahl der CT-Untersuchungen (ohne Untersuchungen im letzten Lebensjahr) geschätzt (siehe Tabelle 2). Die Krebsinzidenz (linke Achse, hellblaue Kreise und Dreiecke) basiert auf der Gesamtzahl der Untersuchungen (rechte Achse; dunkelblaue und orangefarbene Kreise), einer konservativen Schätzung.

Tabelle 2. Voraussichtliche Anzahl künftiger Krebserkrankungen insgesamt und nach Krebsart im Zusammenhang mit CT-Untersuchungen in den Vereinigten Staaten im Jahr 2023, nach Altersgruppe und Körperregion^a

Krebsart insgesamt	Voraussichtliche künftige Krebserkrankungen, Anzahl (90% UL)		
	Alle CT-Untersuchungen (N= 93 000 000)	CT-Untersuchungen bei Erwachsenen (n= 89 931 000)	CT-Untersuchungen in Kindern (n= 3 069 000)
	102 700 (50 400-203 300)	55 600 (30 300-93 600)	3700 (6100-21 600)
Prognostizierte Krebsfälle nach Art			
Lunge	22 400 (20 200-25 000)	21 400 (19 200-24 000)	990 (870-1100)
Dickdarm	8700 (7800-9700)	8400 (7500-9400)	330 (280-390)
Leukämie	7900 (6700-9500)	7400 (6100-8900)	550 (380-820)
Blase	7100 (6000-8500)	6900 (5700-8200)	250 (200-320)
Magen	7100 (5500-9100)	6800 (5200-8800)	280 (200-400)
Schilddrüse	7000 (5400-9200)	3500 (2700-4600)	3500 (2300-5500)
Brust	5700 (5000-6500)	5100 (4400-5900)	630 (550-730)
Leber	4100 (3400-5000)	4000 (3200-4900)	160 (130-200)
Niere	3000 (2300-3900)	2900 (2200-3700)	130 (90-180)
Bauchspeicheldrüse	2800 (2300-3500)	2700 (2200-3400)	100 (80-140)
Mundhöhle oder Pharynx	2800 (2300-3400)	2300 (1900-2900)	450 (310-650)
Gehirn oder ZNS	1600 (1300-2000)	1200 (910-1500)	440 (320-620)
Speiseröhre	1500 (1300-1800)	1400 (1200-1700)	110 (90-150)
Prostata	1500 (820-2700)	1400 (760-2700)	70 (30-170)
Eierstock	890 (670-1200)	850 (630-1100)	40 (30-70)
Rektum	560 (480-660)	540 (450-630)	30 (20-40)
Gebärmutter	550 (400-760)	530 (380-730)	30 (16-50)
Andere und schlecht definierte Stellen	17 400 (15 300-19 800)	15 800 (13 700-18 200)	1600 (1200-2000)
Projizierter Krebs nach CT-Untersuchung Körperregion			
Abdomen und Becken	39 100 (34 600-44 200)	37 500 (32 900-42 600)	1600 (1300-2000)
Brustkorb	22 700 (19 600-26 300)	21 500 (18 400-25 200)	1200 (960-1400)
Wirbelsäule	12 900 (11 500-14 500)	11 600 (10 200-13 200)	1300 (1000-1600)
Kopf	12 500 (10 600-14 700)	7300 (6200-8700)	5100 (3700-7100)
Ganzer Körper	8000 (7000-9100)	7600 (6600-8800)	320 (260-390)
Kopf und Hals kombiniert	4100 (3500-4800)	4100 (3500-4800)	NA
Herz	3400 (3200-3700)	3300 (3000-3600)	170 (140-210)
Extremitäten	80 (60-90)	70 (50-80)	9 (7-11)

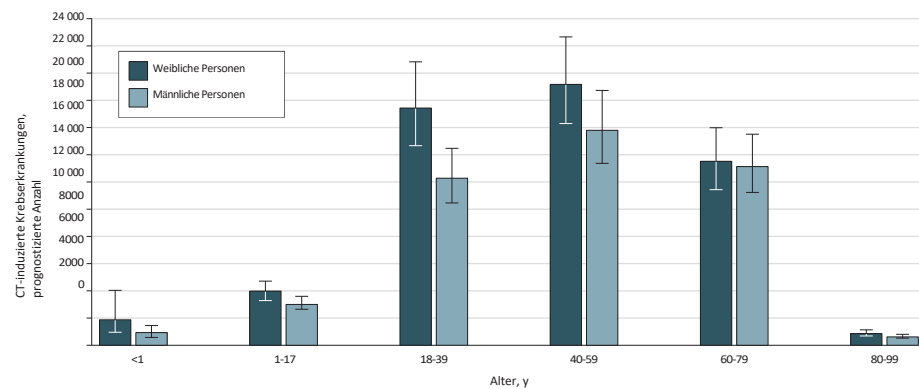
Abkürzungen: ZNS, Zentralnervensystem; System; CT, Computertomographie; NA, nicht anwendbar, d.h. dies Kategorie gibt es in dieser Altersgruppe nicht; UL, Unsicherheitsgrenze.

^aDetailliertere Ergebnisse nach Geschlecht und Kreuztabellen nach Körperregion und Krebsart finden sich in eTabelle 3 in Anhang 1.

Während die frühere Studie Dosen aus nationalen Erhebungsdaten oder Bildgebungsprotokollen modellierte und davon ausging, dass Untersuchungen bei

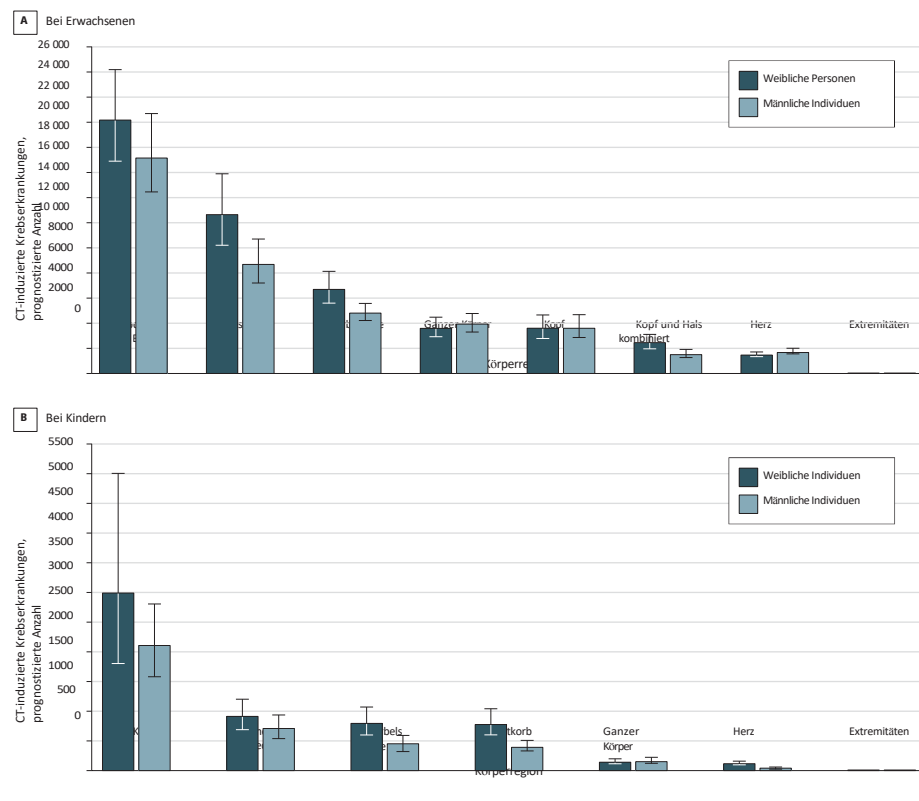
Untersuchungen bei Kindern mit pädiatriespezifischen Einstellungen durchgeführt wurden. Und schließlich haben wir detailliertere CT-Kategorien einbezogen, die Folgendes widerspiegeln

Abbildung 2. Gesamte prognostizierte lebenslange Krebserkrankungen nach Geschlecht und Alter bei Exposition



Fehlerbalken stellen 90%ige Unsicherheitsgrenzen dar. CT steht für Computertomographie.

Abbildung 3. Voraussichtliche Anzahl der durch Computertomographie (CT) verursachten Krebserkrankungen nach Körperregion bei Erwachsenen und Kindern, nach Geschlecht



Fehlerbalken stellen 90%ige Unsicherheitsgrenzen dar.

bildgebende Indikationen, die erhebliche Dosisunterschiede aufweisen. In beiden Studien wurden die gleichen BEIR VII-Risikomodelle verwendet, so dass dies die großen beobachteten Unterschiede nicht erklären würde.

Lungenkrebs wurde mit 22 400 Fällen als häufigste strahleninduzierte Krebserkrankung prognostiziert (eTabelle 4 in [Anhang 1](#)). Etwa 70 % dieser Fälle betrafen weibliche Patienten, was die höheren BEIR VII-Risikokoeffizienten bei weiblichen Patienten widerspiegelt. Wie-

Selbst wenn wir männliche Risikokoeffizienten für weibliche Untersuchungen anwandten, war Lungenkrebs immer noch der häufigste strahleninduzierte Krebs bei weiblichen Patienten. Dickdarmkrebs war mit 8700 Fällen (58,6 % bei Männern) die nächsthäufigste Krebsart. Es ist unklar, ob die derzeitige, ungeklärte Zunahme dieser beiden Krebsarten sowie anderer Krebsarten in unerwartet jungem Alter²⁸ zum Teil auf die CT zurückzuführen ist. Auch beim Schilddrüsenkrebs wurden deutliche Geschlechtsunterschiede festgestellt, wahrscheinlich

aufgrund von Risikokoeffizienten. So wurden z. B. 1400 bzw. 320 Schilddrüsenkrebsfälle als Folge der CT-Exposition bei weiblichen bzw. männlichen Patienten hochgerechnet, die durchgeführt wurden, als der Patient jünger als 1 Jahr war, trotz gleicher Schilddrüsendosen (74,4 und 75,2 mGy) (Tabellen 2 und 4 in [Anhang 1](#)) und mehr Untersuchungen bei männlichen Patienten (Tabelle 1). Unsere Schätzungen der CT-Exposition im Kindesalter sind höher als die der großen EPI-CT-Kohortenstudie zu pädiatrischen Krebserkrankungen^{2,3}, weil wir das Lebenszeitrisiko für alle Krebsarten schätzten, während EPI-CT Gehirn- und Blutkrebs innerhalb von 15 Jahren nach der Exposition untersuchte.

Es wurde prognostiziert, dass CT-Untersuchungen des Abdomens und des Beckens die größte Anzahl von Krebserkrankungen verursachen. Diese und andere Untersuchungsarten wie Hochdosis-CT des Abdomens und des Beckens, Ganzkörper- und Wirbelsäulen-CT sind im Durchschnitt pro Untersuchung mit größeren Risiken verbunden, da sie häufig mehrere Scan-Phasen verwenden, die zu höheren Dosen führen.^{29,30} Oft könnten diese Untersuchungen mit einem einphasigen Scannen durchgeführt werden, was die Dosen senken würde, ohne die diagnostische Genauigkeit zu beeinträchtigen.

In dieser Studie wurden künftige Krebserkrankungen anhand des BEIR VII-basierten Modellierungsansatzes der National Academy of Science geschätzt, der im Bereich der Strahlenepidemiologie weithin anerkannt ist. Während Beobachtungsstudien das Krebsrisiko bei Kindern im Zusammenhang mit pädiatrischer Computertomographie direkt quantifiziert haben,²⁻⁵ sind für die Exposition von Erwachsenen derzeit keine direkten Schätzungen verfügbar. Eine empirische Quantifizierung des Lebenszeitrisikos würde jahrzehntelange Nachfolgestudien an sehr großen Populationen erfordern, wie es die Life Span Study bei japanischen Bombenüberlebenden getan hat. Um das gesamte Lebenszeitrisiko zu erfassen, ist daher ein Modellierungsansatz erforderlich, und es gibt immer mehr Belege für erhöhte Krebsrisiken aus anderen Forschungsarbeiten zu niedriger Strahlung, die diese Risikoschätzungen unterstützen.^{6,7,31} Während die BEIR VII-Krebsrisikomodell der am weitesten verbreitete und akzeptierte Ansatz für die Quantifizierung des Krebsrisikos durch niedrige Strahlendosen sind, haben mehrere andere Studien Risikomodelle veröffentlicht, z. B. die US Environmental Protection Agency, das UK National Radiological Protection Board und das United Nations Scientific Committee on the Health Effects of Atomic Radiation

(UNSCEAR). Die Risikoschätzungen aus diesen Studien stimmen weitgehend mit BEIR VII sowie mit den Schätzungen aus den CT-Studienkohorten einschließlich EPI-CT überein.³²

Viele der Modellannahmen waren konservativ. So haben wir beispielsweise den vom ACR geschätzten Prozentsatz der Untersuchungen bei Kindern verwendet, der niedriger ist als der Prozentsatz aus dem IMV. Wir haben CT-geführte Verfahren, wie z. B. Biopsien, bei denen häufig höhere Dosen verwendet werden, nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist es möglich, dass die von CT-Scans emittierten niederenergetischen Röntgenstrahlen mehr Zellschäden verursachen als Gammastrahlen, die die Hauptquelle der von den Atombomben freigesetzten Strahlung waren.³³ Schließlich wandte RadRAT den von BEIR VII empfohlenen DDREF-Wert von 1,5 (90 % Unsicherheitsintervall, 1,1 bis 2,3) an, um die

Unterschiede zwischen der Exposition bei niedrigen Dosen und den höheren Dosen, für die die Modelle entwickelt wurden. Dabei wird davon ausgegangen, dass niedrigere Strahlungsdosen (pro Einheit) weniger schädlich sind als höhere Dosen, basierend auf der BEIR VII-Schätzung, dass das Risiko für soliden Krebs pro Einheit der Strahlungsdosis bei Dosen von 100 mGy oder weniger um das 1,5-fache niedriger sein kann.⁶ Mehrere systematische Übersichten über Expositionen mit niedriger Dosis (<100 mGy) und niedriger Dosisleistung unterstützen jedoch einen DDREF von

1.^{34,35} Wenn dies zutrifft, würde die tatsächliche Zahl der prognostizierten Krebserkrankungen näher am oberen Ende der Sensitivitätsschätzungen liegen als in der primären Analyse angenommen.

Stärken und Schwächen

Diese Studie hat mehrere Stärken, darunter detaillierte Daten über die Nutzung von Computertomographen und die damit verbundene Strahlendosis, detaillierte Risikoberechnungen mit Unsicherheitsgrenzen und Sensitivitätsanalysen, die eine Reihe von Schätzungen unter sehr unterschiedlichen Annahmen liefern. Es gibt mehrere Einschränkungen: Erstens basieren die Parameter des BEIR VII-Risikoschätzungsmodells in erster Linie auf den Ergebnissen japanischer Überlebender, und es bleiben Fragen zur Übertragung der Strahlenrisiken von der japanischen Bevölkerung Mitte des 20. Jahrhunderts auf die heutige US-Bevölkerung. Jahrhunderte auf die heutige US-Bevölkerung. Die Verwendung eines gewichteten Durchschnitts der Modelle für das übermäßige relative und das übermäßige absolute Risiko zielt darauf ab, dies teilweise zu berücksichtigen, aber diese Gewichte sind

³⁶ Zweitens haben wir bei unseren Risikoberechnungen die durchschnittliche Lebenserwartung berücksichtigt, und das Ausmaß, in dem Patienten, die sich einer CT unterziehen, aufgrund einer Grunderkrankung eine kürzere Lebenserwartung haben, kann das künftige Krebsrisiko überbewerten. Wir schlossen jedoch durchschnittlich 10,6 % der CTs aus, die wahrscheinlich im letzten Lebensjahr durchgeführt wurden, da bei diesen Patienten kein Risiko für eine strahleninduzierte Krebserkrankung besteht. Eine kürzlich durchgeführte Analyse ergab, dass 9,6 % der Patienten, die sich einer CT unterzogen, innerhalb eines Jahres starben,³⁷ was unserer Schätzung entspricht. Drittens war der CT-Kategorisierungsalgorithmus zwar zu 90 % genau, verglichen mit der Überprüfung durch Experten¹³, doch könnten einige Untersuchungen im Register falsch kategorisiert worden sein; dies dürfte unsere Ergebnisse jedoch nicht wesentlich beeinflussen.

Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde prognostiziert, dass im Jahr 2023 etwa 5 % der jährlichen Krebsdiagnosen bzw. 100 000 Krebserkrankungen auf den Einsatz von Computertomographen zurückzuführen sein werden. Trotz der öffentlichen Aufmerksamkeit für die potenziellen negativen Auswirkungen hat die CT-Nutzung in den Vereinigten Staaten seit 2009 erheblich zugenommen. Im Jahr 2023 wurden in den Vereinigten Staaten 93 Millionen CT-Untersuchungen durchgeführt; 2007 waren es 68,7 Millionen - ein Anstieg um 35 %, der sich nur unvollständig durch das Bevölkerungswachstum erklären lässt.³⁸ Eine sorgfältige Anwendung und die Optimierung der Dosis, einschließlich der Berücksichtigung der Notwendigkeit mehrphasiger Untersuchungen, sind die Grundpfeiler der CT-Bildgebung und müssen kompromisslos angewandt werden, um potenzielle Schäden zu minimieren.

ARTIKELINFORMATIONEN

Angenommen zur Veröffentlichung: Februar 11, 2025.

Online veröffentlicht: April 14, 2025.

doi:10.1001/jamainternmed.2025.0505

Offener Zugang: Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der CC-BY-Lizenz verbreitet wird.

© 2025 Smith-Bindman R et al. *JAMA Internal Medicine*.

Berichtigung: Dieser Artikel wurde am 2. Juni 2025 korrigiert, um Fehler in Abbildung 1 und Beilage 1 zu korrigieren.

Autorenzugehörigkeit: Abteilung für Epidemiologie und Biostatistik, University of California, San Francisco (Smith-Bindman, Chu, Azman Firdaus,

Stewart, Malekhdayat); Abteilung für Geburtshilfe, Gynäkologie und Reproduktionswissenschaften, Universität von Kalifornien, San Francisco (Smith-Bindman); Philip R. Lee Institute for Health Policy Studies, University of California, San Francisco (Smith-Bindman, Mahendra); Department of Public Health Sciences, University of California, Davis (Alber, Miglioretti); J. Crayton Pruitt Family Department of Biomedical

Engineering, University of Florida, Gainesville (Bolch); Division of Pediatric Critical Care, Department of Pediatrics, UCSF Benioff Children's Hospital, University of California, San Francisco (Mahendra); Division of Genetics and Epidemiology, The Institute of Cancer Research, London, United Kingdom (Berrington de González); Kaiser Permanente Washington Health Research Institute, Kaiser Permanente Washington, Seattle (Miglioretti).

Beiträge der Autoren: Dr. Smith-Bindman hatte vollen Zugang zu allen Daten der Studie und übernimmt die Verantwortung für die Integrität der Daten und die Genauigkeit der Datenanalyse. Dr. Berrington de González und Dr. Miglioretti sind gemeinsame Hauptautoren. **Konzept und Design:** Smith-Bindman, Chu, Stewart, Berrington de González, Miglioretti.

Beschaffung, Analyse und Interpretation der Daten: Alle Autoren.

Abfassung des Manuskripts: Smith-Bindman, Chu, Stewart. **Kritische Überprüfung des Manuskripts auf wichtige intellektuelle Inhalte:** Alle Autoren.

Statistische Auswertung: Chu, Alber, Mahendra, Berrington de González, Miglioretti.

Erlangte Finanzierung: Smith-Bindman. **Administrative, technische oder materielle Unterstützung:** Smith-Bindman, Azman Firdaus, Stewart, Malekheadayat, Bolch.

Beaufsichtigung: Smith-Bindman, Chu, Azman Firdaus, Stewart, Mahendra.

Offenlegung von Interessenkonflikten: Dr.

Smith-Bindman gab an, Mitbegründer von Alara Imaging Inc. zu sein, einem Unternehmen, das sich auf die Verbesserung der klinischen und betrieblichen Aspekte von Gesundheitssystemen konzentriert, einschließlich der Erfassung und Meldung von Strahlendosis und Bildqualität im Zusammenhang mit Computertomographie als Teil von Qualitätsprogrammen unter der Leitung von Kostenträgern. Alara Imaging war in keiner Weise an diesem Artikel beteiligt, und die Arbeit überschneidet sich nicht mit den kommerziellen Aktivitäten von Alara. Dr. Miglioretti gab an, während der Durchführung der Studie Zuschüsse von den National Institutes of Health erhalten zu haben. Es wurden keine weiteren Offenlegungen gemeldet.

Finanzierung/Unterstützung: Diese Forschungsarbeit wurde durch Zuschüsse des National Cancer Institute (1R01CA181191-01A1), des Patient-Centered Outcomes Research Institute (CD-1304-7043) und durch Restmittel aus dem Vergleich in der Sache *April Krueger gegen Wyeth Inc*, Fall Nr. 03-cv-2496 (US District Court, SD of Calif) unterstützt.

Rolle des Geldgebers/Sponsors: Die Geldgeber hatten keinen Einfluss auf die Planung und Durchführung der Studie, die Sammlung, Verwaltung, Analyse und Interpretation der Daten, die Vorbereitung, Überprüfung oder Genehmigung des Manuskripts und die Entscheidung, das Manuskript zur Veröffentlichung einzureichen.

Haftungsausschluss: Die in diesem Manuskript geäußerten Ansichten geben nicht unbedingt die offiziellen Ansichten des National Radiology Data Registry (NRDR) oder des American College of Radiology wieder.

Erklärung zur gemeinsamen Nutzung von Daten: Siehe [Anhang 2](#).

Zusätzliche Beiträge: Wir danken Davin Korstjens, MBA, vom IMV für die großzügige Bereitstellung von Informationen über das jährliche Volumen der Computertomographie in den Vereinigten Staaten und die Aufschlüsselung nach Alter. Wir danken Jeannette R. Ferber, MPH, von der Division of Research, Kaiser Permanente Northern California, für die Schätzung des Anteils der CT-Untersuchungen in den letzten Lebensjahren. Daten über pädiatrische

Untersuchungen wurden vom NRDR des American College of Radiology zur Verfügung gestellt. Wir danken den Mitarbeitern des American College of Radiology, insbesondere Judy Burleson, MHSA, für die Unterstützung bei der Aufbereitung der Daten, die Anleitung und den Input. Diese Personen wurden nicht über ihre üblichen Gehälter hinaus entlohnt.

REFERENZEN

- IMV. Bericht über die Aussichten für den KV-Markt 2023. Abgerufen am 10. März 2025. <https://imvinfo.com/product/2023-ct-market-outlook-report/>
- Bosch de Basea Gomez M, Thierry-Chef I, Harbron R, et al. Risiko von hämatologischen Malignomen durch CT-Strahlenexposition bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Nat Med*. 2023;29(12):3111-3119. doi:10.1038/s41591-023-02620-0
- Hauptmann M, Byrnes G, Cardis E, et al. Gehirnkrebs nach Strahlenbelastung durch CT-Untersuchungen bei Kindern und jungen Erwachsenen: Ergebnisse der EPI-CT-Kohortenstudie. *Lancet Oncol*. 2023;24(1):45-53. doi:10.1016/S1470-2045(22)00655-6
- Pearce MS, Salotti JA, Little MP, et al. Strahlenbelastung durch CT-Scans in der Kindheit und späteres Risiko für Leukämie und Hirntumore: eine retrospektive Kohortenstudie. *Lancet*. 2012;380(9840):499-505. doi:10.1016/S0140-6736(12)60815-0
- Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*. 2013;346:f2360. doi:10.1136/bmj.f2360
- National Research Council; Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Level of Ionizing Radiation. *Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (Gesundheitsrisiken durch Exposition gegenüber niedriger ionisierender Strahlung): BEIR VII Phase 2*. National Academies Press; 2006.
- Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *J Natl Cancer Inst Monogr*. 2020;2020(56):188-200. doi:10.1093/jncimonographs/gaa010
- Nguyen PK, Lee WH, Li YF, et al. Assessment of the radiation effects of cardiac CT angiography using protein and genetic biomarkers. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2015;8(8):873-884. doi:10.1016/j.jcmg.2015.04.016
- Smith-Bindman R, Wang Y, Chu P, et al. Internationale Unterschiede in der Strahlendosis bei Computertomographie-Untersuchungen: prospektive Kohortenstudie. *BMJ*. 2019;364:k4931. doi:10.1136/bmj.k4931
- Berrington de González A, Mahesh M, Kim KP, et al. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Arch Intern Med*. 2009;169(22):2071-2077. doi:10.1001/archinternmed.2009.440
- Mettler FA Jr, Mahesh M, Bhargavan-Chatfield M, et al. Patientenexposition durch radiologische und nuklearmedizinische Verfahren in den Vereinigten Staaten: Verfahrensvolumen und effektive Dosis für den Zeitraum 2006-2016. *Radiology*. 2020;295(2):418-427. doi:10.1148/radiol.2020192256
- Mahesh M, Ansari AJ, Mettler FA Jr. Patientenexposition durch radiologische und nuklearmedizinische Verfahren in den Vereinigten Staaten und weltweit: 2009-2018. *Radiology*. 2023;307(1):e221263. doi:10.1148/radiol.221263
- Smith-Bindman R, Yu S, Wang Y, et al. An image quality-informed framework for CT characterization. *Radiology*. 2022;302(2):380-389. doi:10.1148/radiol.2021210591
- Lee C, Lodwick D, Hurtado J, Pafundi D, Williams JL, Bolch WE. Die UF-Familie von Referenz-Hybridphantomen für die rechnerische Strahlendosismetrie. *Phys Med Biol*. 2010;55(2):339-363. doi:10.1088/0031-9155/55/2/002
- Geyer AM, O'Reilly S, Lee C, Long DJ, Bolch WE. The UF/NCI family of hybrid computational phantoms representing the current US population of male and female children, adolescents, and adults-application to CT dosimetry. *Phys Med Biol*. 2014;59(18):S225-S242. doi:10.1088/0031-9155/59/18/S225
- Stepusin EJ, Long DJ, Ficarrotta KR, Hintenlang DE, Bolch WE. Physikalische Validierung eines Monte Carlo-basierten, phantombegleiteten Ansatzes zur Organdosismetrie in der Computertomographie unter Röhrenstrommodulation. *Med Phys*. 2017;44(10):5423-5432. doi:10.1002/mp.12461
- Long DJ, Lee C, Tien C, et al. Monte-Carlo-Simulationen von Computertomographie-Untersuchungen bei Erwachsenen und Kindern: Validierungsstudien von Organdosen mit physikalischen Phantomen. *Med Phys*. 2013;40(1):013901. doi:10.1118/1.4771934
- National Cancer Institute Division of Cancer Epidemiology and Genetics. Instrument zur Bewertung des Strahlenrisikos - Lebenslanges Krebsrisiko durch ionisierende Strahlung. Aktualisiert im Februar 2024. Zugriff am 10. Januar 2025. <https://radiationcalculators.cancer.gov/radtrat/>
- Kwan ML, Miglioretti DL, Bowles EJA, et al. Quantifizierung des Krebsrisikos durch die Exposition gegenüber medizinischer Bildgebung in der Risk of Pediatric and Adolescent Cancer Associated with Medical Imaging (RIC) Study: Forschungsmethoden und Kohortenprofil. *Cancer Causes Control*. 2022;33(5):711-726. doi:10.1007/s10552-022-01556-z
- Smith-Bindman R, Kwan ML, Marlow EC, et al. Trends in der Nutzung medizinischer Bildgebung in US-Gesundheitssystemen und in Ontario, Kanada, 2000-2016. *JAMA*. 2019;322(9):843-856. doi:10.1001/jama.2019.11456
- Cahoon EK, Preston DL, Pierce DA, et al. Lung, laryngeal and other respiratory cancer incidence among Japanese atomic bomb survivors: an updated analysis from 1958 through 2009. *Radiat Res*. 2017;187(5):538-548. doi:10.1667/RR14583.1
- Islami F, Marlow EC, Thomson B, et al. Anteil und Anzahl der Krebsfälle und Todesfälle, die auf potenziell veränderbare Risikofaktoren zurückzuführen sind, in den Vereinigten Staaten, 2019. *CA Cancer J Clin*. 2024;74(5):405-432. doi:10.3322/caac.21858
- Hendee WR, Becker GJ, Borgstede JP, et al. Addressing overutilization in medical imaging. *Radiology*. 2010;257(1):240-245. doi:10.1148/radiol.10100063
- Schroeder AR, Duncan JR. Overuse of medical imaging and its radiation exposure: who's minding our children? *JAMA Pediatr*. 2016;170(11):1037-1038. doi:10.1001/jamapediatrics.2016.2147
- Chow S, McWilliams A, Kaplan DM, Stephens JR. Things we do for no reason: Neuroimaging for hospitalized patients with delirium. *J Hosp Med*. 2019;14(7):441-444. doi:10.12788/jhm.3167
- Tung M, Sharma R, Hinson JS, Nothelle S, Pannikottu J, Segal JB. Faktoren im Zusammenhang mit der Überbeanspruchung von bildgebenden Verfahren in der Notaufnahme: eine systematische Überprüfung. *Am J Emerg Med*. 2018;36(2):301-309. doi:10.1016/j.ajem.2017.10.049
- Smith M, Saunders R, Stuckhardt L, McGinnis JM, eds; The Institute of Medicine of The National Academies. Best Care at Lower Cost: The Path to Continuously Learning Health Care in America.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; 2013. Accessed April 6, 2019. <http://iom.nationalacademies.org/Reports/2012/Best-Care-at-Lower-Cost-The-Path-to-Continuously-Learning-Health-Care-in-America.aspx>

28. Siegel RL, Giaquinto AN, Jemal A. Krebsstatistiken, 2024. *CA Cancer J Clin*. 2024;74(1):12-49. doi:10.3322/caac.21820

29. Guite KM, Hinshaw JL, Ranallo FN, Lindstrom MJ, Lee FT Jr. Ionisierende Strahlung bei der abdominalen Computertomographie: Unindizierte mehrphasige Scans sind eine wichtige Quelle medizinisch unnötiger Exposition. *J Am Coll Radiol*. 2011;8(11):756-761. doi:10.1016/j.jacr.2011.05.011

30. Johnson PT, Bello JA, Chatfield MB, et al. New ACR Choosing Wisely recommendations: judicious use of multiphase abdominal CT protocols. *J Am Coll Radiol*. 2019;16(1):56-60. doi:10.1016/j.jacr.2018.07.026

31. Berrington de Gonzalez A, Daniels RD, Cardis E, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: rationale and framework for

Monographie und Überblick über in Frage kommende Studien. *J Natl Cancer Inst Monogr*. 2020;2020(56):97-113. doi:10.1093/jncimonographs/igaa009

32. Wissenschaftlicher Ausschuss der Vereinten Nationen für die gesundheitlichen Auswirkungen der atomaren Strahlung (UNSCEAR). Quellen, Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung: Bericht an die Generalversammlung mit wissenschaftlichen Anhängen. January 2017. Abgerufen am 10. März 2025. https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR_2016_GA-Report.pdf

33. Russ E, Davis CM, Slaven JE, Bradfield DT, Selwyn RG, Day RM. Vergleich der medizinischen Anwendungen und zellulären Auswirkungen von Strahlung mit hohem und niedrigem linearen Energietransfer. *Toxics*. 2022;10(10):628. doi:10.3390/toxics10100628

34. Shore R, Walsh L, Azizova T, Rühm W. Risk of solid cancer in low dose-rate radiation epidemiological studies and the dose-rate effectiveness factor. *Int J Radiat Biol*. 2017;93(10):1064-1078. doi:10.1080/09553002.2017.1319090

35. Little MP, Pawel DJ, Abalo K, Hauptmann M. Methodological improvements to meta-analysis of

low dose rate studies and der Ableitung von Dosis- und Dosisleistungseffektivitätsfaktoren. *Radiat Environ Biophys*. 2021;60(3):485-491. doi:10.1007/s00411-021-00921-x

36. Berrington de Gonzalez A, Iulian Apostoaiei A, Veiga LH, et al. RadRAT: a radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection. *J Radiol Prot*. 2012;32(3):205-222. doi:10.1088/0952-4746/32/3/205

37. Mataac MT, Li X, Rehani MM. Welcher Anteil der CT-Patienten ist nach 10 Jahren noch am Leben oder bereits verstorben? *Eur J Radiol*. 2024;178:111629. doi:10.1016/j.ejrad.2024.111629

38. Nationaler Rat für Strahlenschutz und Strahlenmessungen. Bericht Nr. 184-Medical Radiation Exposure of Patients in the United States. Zugriff am 10. März 2025. <https://ncrponline.org/shop/reports/report-no-184-medical-radiation-exposure-of-patients-in-the-united-states-2019/>

Anmerkung der Redaktion

Abwägung zwischen den Vorteilen der Computertomografie und den Strahlenrisiken

Ilana B. Richman, MD, MHS; Mitchell H. Katz, MD

In **dieser Ausgabe** von *JAMA Internal Medicine* berichten Smith-Bindman et al.¹ über die voraussichtliche Zahl der Krebserkrankungen, die aufgrund der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung bei Computertomographien (CT) in den Vereinigten Staaten im Jahr 2023 zu erwarten sind. Sie schätzen



Zugehöriger Artikel Seite 710

schätzten, dass etwa 93 Millionen Scans wurden in rund 62 Millionen Fällen durchgeführt

Patienten, was letztendlich zu 103 000 neuen Krebserkrankungen führen könnte. Obwohl diese Schätzungen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass CT-Scans wahrscheinlich eine wichtige Ursache für Krebs in den Vereinigten Staaten sind und für bis zu 5 % der jährlich auftretenden Krebserkrankungen verantwortlich sein könnten. Diese Ergebnisse stellen CT-Scans auf eine Stufe mit anderen bekannten Risikofaktoren für Krebs, einschließlich Alkohol und Fettleibigkeit.

Früher wurde die Computertomographie relativ selten eingesetzt. In den 1980er Jahren wurden jährlich etwa 3 Millionen CT-Scans durchgeführt.² Die deutliche Zunahme der Computertomographie - etwa das 30-fache in 40 Jahren - spiegelt ihren diagnostischen Wert wider. CT-Scans sind genau, schnell, gut verträglich und relativ preisgünstig. Sein Erfolg als bildgebendes Verfahren macht es auch so schwierig, es einzuschränken. Die CT ist für die Diagnose vieler schwerer Erkrankungen - von Trauma bis Krebs - unverzichtbar geworden. Notaufnahmen und Krankenhäuser haben

für einen effizienten Patientenfluss und ein effizientes Management auf eine schnelle und genaue Diagnose verlassen. Auch die Patienten erwarten zeitnahe und genaue Diagnosen. Die CT ist heute untrennbar mit der modernen Medizin verwoben.

Wie können wir also die Vorteile der CT mit ihren Risiken in Einklang bringen?

Risiken? Wie bei allen komplexen Problemen wird es keine einfache Lösung geben. Erstens: Trotz unseres Vertrauens in die CT ist das Verhalten der Ärzte ior ist immer noch formbar, und spezifische Maßnahmen, die darauf abzielen, den Einsatz von CT bei Patienten mit geringem Risiko zu reduzieren, haben sich als wirksam erwiesen. So kann beispielsweise die Einbeziehung von Diagnosealgorithmen am Ort der Behandlung den Einsatz von CT bei Patienten mit geringem Risiko verringern³ - ein Prozess, der durch künstliche Intelligenz und Informatik erleichtert werden kann. Auch das Angebot alternativer bildgebender Verfahren ohne ionisierende Strahlung, wie Ultraschall und Magnetresonanztomographie, kann sinnvoll sein - eine Strategie, die sich besonders in der Pädiatrie bewährt hat, wo die Computertomographie selten eingesetzt wird. Drittens können die Reduzierung der Strahlendosis, z. B. durch Digitalisierung, und die Verringerung der Unterschiede in der Bestrahlungstechnik und -dosis durch Standardisierung und Schulung in den verschiedenen Bildgebungszentren das Risiko mindern. Und schließlich kann die Aufklärung der Ärzte über die Vermeidung von Untersuchungen mit geringem Nutzen und - in Fällen, in denen Alternativen leicht verfügbar sind - die Einbeziehung der Patienten in die Entscheidung über die Durchführung einer CT-Untersuchung zu einem Wandel der Kultur und der Praxis beitragen.

Zugehörigkeit der Autoren: Abteilung für Allgemeine Innere Medizin, Yale School of Medicine, New Haven, Connecticut (Richman); Redaktionsmitglied, *JAMA Internal Medicine* (Richman); NYC Health + Hospitals, New York, New York (Katz); Stellvertretender Herausgeber, *JAMA Internal Medicine* (Katz).

Korrespondierende Autorin: Ilana B. Richman, MD, MHS, Abteilung für Allgemeine Innere Medizin, Yale School of Medicine, 367 Cedar St, Harkness A, Room 301A, New Haven, CT 06510 (ilana.richman@yale.edu).

Online veröffentlicht: April 14, 2025. doi:10.1001/jamainternmed.2025.0514

Offenlegung von Interessenkonflikten: Dr. Richman berichtete über Gehaltsunterstützung von den Centers for Medicare & Medicaid Services für die Entwicklung von Qualitätsmaßnahmen im Gesundheitswesen außerhalb der eingereichten Arbeit. Es wurden keine weiteren Offenlegungen gemeldet.

1. Smith-Bindman R, Chu PW, Firdaus HA, et al. Projiziertes Lebenszeit-Krebsrisiko durch aktuelle Computertomographie-Bildgebung. *JAMA Intern Med*.

Veröffentlicht online am 14. April 2025. doi:10.1001/jamainternmed.2025.0505

2. Brenner DJ, Hall EJ. Computertomographie - eine zunehmende Quelle der Strahlenbelastung. *N Engl J Med*. 2007;357(22):2277-2284. doi:10.1056/NEJMr072149

3. Dunne CL, Elzinga JL, Vorobeichik A, et al. Eine systematische Überprüfung von Maßnahmen zur Verringerung des Einsatzes von Computertomographen in der Notaufnahme. *Ann Emerg Med*. 2022;80(6):548-560. doi:10.1016/j.annemergmed.2022.06.001