

Die gesundheitlichen Auswirkungen

Der Tschernobyl-Unfall ist für statistisch signifikante Spätfolgen verantwortlich
– allerdings nicht in Deutschland.

Peter Jacob, Werner Rühm und Herwig G. Paretzke

Studien zu den Spätfolgen der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki legen nahe, dass es für eine abschließende Bewertung der gesundheitlichen Folgen des Reaktorunfalls noch viel zu früh ist. Bereits heute zeigt sich aber, dass in der Ukraine und in Weißrussland insbesondere Personen, die zum Zeitpunkt des Unfalls jünger als 18 Jahre waren, mit einer überdurchschnittlich hohen Wahrscheinlichkeit an Schilddrüsenkrebs erkranken.

Krebs ist eine beim Menschen häufig auftretende Krankheit. Von einigen Stoffen, darunter verschiedene Chemikalien und Tabakrauch, ist bekannt, dass sie kanzerogen wirken können. Auch ionisierende Strahlung kann Krebserkrankungen hervorrufen, wobei unterschiedliche Organe zum Teil verschieden stark reagieren. Dies wurde z. B. bei Studien an den Überlebenden der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki deutlich [1]. Von 86 611 in einer Langzeitstudie erfassten Überlebenden starben im Zeitraum von 1950 bis 2000 insgesamt 47 685 Personen an allen Ursachen, 10 127 davon an soliden (festen) Tumoren. Davon waren unter der Annahme einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung etwa 480 Todesfälle strahleninduziert. Die große Anzahl der untersuchten Personen und die lange Dauer der Studie (über 50 Jahre) erlaubten es zudem, statistisch signifikante Aussagen über verschiedene Tumorarten zu treffen. Dabei zeigte sich, dass z. B. das rote Knochenmark und die weibliche Brust zu den strahlensensibelsten Organen zählen. Man weiß außerdem, dass das zusätzliche relative Risiko für Personen, die in jungen Jahren ionisierender Strahlung ausgesetzt waren, meist höher ist als das für ältere Personen.

Ein erhöhtes Auftreten von Leukämie (außer der chronisch-lymphatischen Leukämie) ließ sich bei Strahlentherapie-Patienten [2], bei den Atombombenüberlebenden [3] und bei Radiologen, die Anfang des 20. Jahrhunderts mit Röntgenstrahlung arbeiteten [4], nachweisen. Bereits zu Beginn der Studien an den Atombombenüberlebenden im Jahr 1950 zeigte sich eine signifikant erhöhte Leukämierate.

KOMPAKT

- ▶ Abschätzungen der strahleninduzierten Spätfolgen beruhen auf der Annahme, dass die Wirkung auch bei geringer Exposition proportional zur Strahlendosis ist. Sie sind unter anderem daher mit großen Unsicherheiten behaftet.
- ▶ Die Kontamination mit Jod-131 ist verantwortlich für das Auftreten von rund 2000 Fällen an Schilddrüsenkrebs in Weißrussland und der Ukraine.
- ▶ Von 34 tödlich verlaufenen Leukämiefällen unter 72000 Aufräumarbeitern sind möglicherweise 24 auf die Strahlenbelastung zurückzuführen.



Um die gesundheitlichen Folgen der Tschernobyl-Katastrophe besonders für die Menschen in den hochkontaminierten Gebieten einschätzen zu können, ist es nötig, die Aktivität des im Körper einge-

lagerten Cäsium-137 zu bestimmen, etwa mithilfe eines hier gezeigten mobilen Ganzkörperspektrometers. (Quelle: ZSR, Universität Hannover)

Man geht daher davon aus, dass diese Erkrankung bereits wenige Jahre nach einer Exposition¹⁾ auftreten kann. Von den untersuchten Atombombenüberlebenden starben 293 Personen im Zeitraum von 1950 bis 2000 an Leukämie. Davon waren vermutlich über 90 Todesfälle strahleninduziert [3]. Ein Großteil dieser zusätzlichen Fälle trat bereits in den ersten Jahren nach der Exposition auf. Man hat zudem beobachtet, dass das zusätzliche relative Risiko, an Leukämie zu erkranken, für Kinder besonders hoch ist. Wakeford und Little berichten zudem von einer Erhöhung der Leukämieraten bei Kindern, die im Mutterleib („in utero“) aus medizinischen Gründen geröntgt worden waren, ab einer abgeschätzten Dosis für den Fötus von etwa 10 mSv [5].²⁾

Mit den Daten der Atombombenüberlebenden als Grundlage wird im Folgenden die Zahl der möglichen strahleninduzierten Tumor- und Leukämiefälle für die exponierten Personengruppen diskutiert. Ausdrücklich sei hier darauf hingewiesen, dass derartige Abschätzungen besonders für die

1) Die minimale Latenzzeit beträgt zwei bis fünf Jahre.

2) Zu den Einheiten Sievert und Gray siehe den Infokasten „Einheiten der Strahlendosimetrie“ im Artikel von R. Michel und G. Voigt.

Dr. Peter Jacob,
Dr. Werner Rühm,
Prof. Dr. Herwig
G. Paretzke, GSF-
Forschungszentrum
für Umwelt und
Gesundheit, Institut
für Strahlenschutz,
Ingolstädter Landstr.
1, 85764 Neuherberg

in kontaminierten Gegenden lebende Bevölkerung mit großer Vorsicht zu behandeln sind. Sie basieren für viele exponierte Gruppen auf relativ geringen Dosen, die zudem mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Außerdem ist gegenwärtig nicht im Geringsten klar, ob die verwendete lineare Risiko-Extrapolation von Werten für hohe Dosen und Dosisraten, die für die Analyse der Daten für die Atombombenüberlebenden typisch waren, zu den hier relevanten niedrigen Dosen und Dosisraten überhaupt richtig ist. Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP⁵⁾ geht davon aus, dass die Risikoabschätzungen auf der Grundlage der Atombombenüberlebenden halbiert werden müssen, wenn sie bei einer Exposition mit niedrigen Dosen (unterhalb 0,2 Gy) und Dosisraten (unterhalb 0,1 Gy pro Stunde) angewendet werden sollen, und führt dazu den „Dose and Dose Rate Effectiveness Factor“ (DDREF) ein [6].⁴⁾ Generell gilt, dass die Multiplikation des sich ergebenden, mit hoher Unsicherheit behafteten kleinen Risikos mit einer großen Bevölkerungszahl zu einer Anzahl von rechnerischen Todesfällen führt, die zwar hoch erscheint, jedoch nicht minder unsicher ist und bestenfalls einen groben Anhaltspunkt liefern kann.⁵⁾

Aufräumarbeiter

Wie im Artikel von R. Michel und G. Voigt bereits detailliert beschrieben, waren Personen, die im Jahre 1986 zu Aufräumarbeiten eingesetzt waren, im Mittel einer Dosis von etwa 170 mSv ausgesetzt. In den folgenden Jahren waren die beruflichen Dosen bei diesen Tätigkeiten dann geringer. Daher werden für die Arbeiter („Liquidatoren“), die im Rahmen epidemiologischer Studien untersucht werden, im Mittel über die Kalenderjahre dieser Tätigkeiten Dosen von etwa 100 mSv angegeben [9]. Die ICRP schlägt für die arbeitende Bevölkerung einen Strahlenrisikoeffizienten von 0,04 pro Sv vor, wobei darin ein Anteil von etwa 10 Prozent für das Auftreten von Leukämie enthalten ist [6]. Für das Auftreten von soliden Tumoren ergibt sich

dann bei einer Dosis von 100 mSv ein Lebenszeitrisko von $0,036/\text{Sv} \times 0,1 \text{ Sv} \approx 0,004$ für den „mittleren“ Aufräumarbeiter. Für das strahlenbedingte Auftreten von Leukämie ergäbe sich analog ein Lebenszeitrisko von $0,004/\text{Sv} \times 0,1 \text{ Sv} = 0,0004$.

Krebs: In epidemiologischen Arbeiten über die Gesundheitseffekte bei Aufräumarbeitern wird von ersten Anzeichen einer strahleninduzierten Erhöhung der Mortalitätsraten durch solide Tumoren berichtet. Beispielsweise wurden in einem Kollektiv von etwa 66000 Liquidatoren, von denen fast 53000 im Zeitraum 1986–1987 eingesetzt gewesen waren, für den Zeitraum 1991–1998 insgesamt 4995 Todesfälle dokumentiert [9, 10]. Davon waren 515 Todesfälle durch solide Tumoren verursacht, wobei ein Großteil spontan entstand, d. h. nicht durch die Einwirkung ionisierender Strahlung. Für das beobachtete *zusätzliche* relative Risiko (s. Infokasten), auf Grund der ionisierenden Strahlung an soliden Tumoren zu sterben, wird in dieser Arbeit ein Wert von etwa 2 pro Sv angegeben (mit einem 95 % Konfidenzintervall (KI) von 1,31–2,92). Dieses Ergebnis ist deutlich höher, als man es nach den Analysen der Daten für die Atombombenüberlebenden erwarten würde. Zudem wurde in einer weiteren, neueren Studie und gleichfalls von Ivanov et al. für das Auftreten solider Tumoren unter den Aufräumarbeitern ein deutlich geringerer Wert von nur 0,33 pro Gy abgeleitet, der zudem statistisch nicht signifikant ist [11]. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind deshalb die berichteten Ergebnisse über die Erhöhung der Krebsmortalität unter den Aufräumarbeitern widersprüchlich und daher mit großer Vorsicht zu bewerten.

Leukämie: Da bei den Atombombenüberlebenden eine strahleninduzierte Erhöhung von Leukämie bereits wenige Jahre nach der Exposition beobachtet wurde, wurde natürlich in der Kohorte der Aufräumarbeiter ebenfalls intensiv nach einer ähnlichen Erhöhung gesucht. Erschwert werden derartige Studien allerdings dadurch, dass die spontane Leukämieinzidenz in den Ländern der früheren Sowjetunion seit den frühen

5) International Commission on Radiological Protection, www.icrp.org

4) Es sei angemerkt, dass der ICRP-Wert von 2 für den DDREF in beiden Richtungen nicht unumstritten ist, und daher die auf der Basis der ICRP-Empfehlungen im Folgenden durchgeführten Abschätzungen der Spätfolgen auch höher oder niedriger sein können.

5) Weiteres dazu findet sich in [7] und [8] sowie auf den Websites des großen europäischen Projekts „RISC-RAD“ (www.riscrad.org) und des entsprechenden US-amerikanischen DOE-Low Dose-Programms (http://lowdose.tricity.wsu.edu).

Begriffe des zusätzlichen Risikos durch Strahlung

Ergebnisse epidemiologischer Kohortenstudien beziehen sich immer nicht nur auf bestimmte Expositionsszenarien, sondern auch auf bestimmte Altersintervalle und Beobachtungszeiträume. Das *relative Risiko* ist das Verhältnis der Erkrankungs- oder Mortalitätsrate H in der exponierten Gruppe zur entsprechenden Rate H_{ref} in einer nicht oder gering exponierten Gruppe, der Referenzgruppe. Diese Gruppe muss möglichst in allen relevanten Parametern (Alter, Geschlecht, Lebensgewohnheiten, säkularer Zeitraum, Beobachtungsdauer, etc.) mit denen für die Mitglieder der exponierten Gruppe übereinstimmen. Häufig wird das *zusätzliche relative Risiko* (excess relative risk, ERR) angegeben, das durch das Verhältnis der Rate zusätzlicher Fälle $H - H_{\text{ref}}$ und H_{ref} definiert ist:

$$ERR = H/H_{\text{ref}} - 1.$$

Unter der bislang unbewiesenen, aber operationell einfachen Annahme einer linearen Beziehung zwischen Dosis und Wirkung ohne Schwellenwert für stochastische Strahlenschäden (LNT-Hypothese) wird oft das zusätzliche relative Risiko für eine Exposition mit einer Dosis von 1 Sv angegeben. Alternativ wird – unter der gleichen Hypothese – das *zusätzliche relative Risiko je Dosis* (β) definiert:

$$\beta = ERR/D,$$

wobei D die Strahlendosis (unter Berücksichtigung der Art des Strahlenfeldes) ist. Ein zusätzliches relatives Risiko je Dosis von $\beta = 2 \text{ Sv}^{-1}$ bedeutet zum Beispiel, dass die zusätzliche Erkrankungs- oder Mortalitätsrate in der Beobachtungszeit nach einer Strahlenexpo-

sition mit einer Dosis von 1 Sv doppelt so hoch ist wie in der Referenzgruppe. Insgesamt ist die Rate in der Gruppe der Exponierten dann dreimal so hoch wie in der Referenzgruppe, das relative Risiko ist dann also 3.

Das *zusätzliche absolute Risiko* (excess absolute risk, EAR) ist definiert durch die Differenz der Erkrankungs- oder Mortalitätsraten H und H_{ref} in einem gegebenen Zeitraum. Für eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert ist das *zusätzliche absolute Risiko je Dosis* (α) definiert durch

$$\alpha = (H - H_{\text{ref}}) / D.$$

Ein Wert von α von zwei Fällen je 10^4 Personenjahren und Sv bedeutet, dass z. B. in einer Gruppe von 1000 Personen nach einer Exposition mit einer Dosis von 1 Sv in einem Zeitraum von zehn Jahren zwei zusätzliche

Fälle erwartet werden.

Häufig ist man nicht direkt am Risiko in einer beobachteten Gruppe für einen bestimmten Beobachtungszeitraum interessiert, sondern am *Lebenszeitrisko* nach einer Exposition. Um dieses abzuschätzen, werden die Ergebnisse von epidemiologischen Studien mit Hilfe von quantitativen Strahlenwirkungs-Modellen für die verschiedenen Altersgruppen und beide Geschlechter auf die gesamte Lebenszeit eines „repräsentativen, mittleren“ Mitgliedes der Bevölkerung extrapoliert. Ein Lebenszeitrisko von 5 % pro Sv bedeutet, dass z. B. nach einer Exposition von 1000 derartigen Personen mit einer Dosis von 1 Sv über die gesamte Lebenszeit 50 zusätzliche Fälle erwartet werden.

1980er-Jahren, d. h. bereits vor dem Unfallzeitpunkt, ansteigt.

In einem Kollektiv von 72 000 russischen Aufräumarbeitern wurden im Zeitraum von 1986 bis 1998 insgesamt 42 Leukämiefälle⁶⁾ beobachtet, von denen 34 Fälle tödlich verliefen. Die besondere Bedeutung dieser Studie liegt darin, dass sich für diese Betroffenen ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Dosis und dem zusätzlichen relativen Risiko nachweisen ließ. Mit einer mittleren Dosis von etwa 100 mSv, denen die Aufräumarbeiter ausgesetzt waren, und unter der hypothetischen Annahme, dass das zusätzliche relative Risiko linear mit kleiner werdender Dosis abnimmt, ergäbe sich, dass etwa 24 der 34 Leukämie-Todesfälle auf Grund der zusätzlichen Exposition mit ionisierender Strahlung aufgetreten sein könnten [12]. Basierend auf den Daten von Hiroshima und Nagasaki würde man einen Effekt ähnlicher Größenordnung erwarten [3].

Bevölkerung in kontaminierten Gebieten

Diejenigen, die in den ersten Tagen nach dem Unfall evakuiert wurden (etwa 116 000 Personen), waren im Mittel effektiven Dosen von etwa 30 mSv ausgesetzt⁷⁾. Für die etwa 5,2 Millionen Bewohner der kontaminierten Gegenden (¹³⁷Cs-Deposition > 37 kBq/m²) werden in einem zusammenfassenden Bericht des UN-Wissenschaftlichen Komitees für die Effekte Atomarer Strahlen (UNSCEAR) entsprechend mittlere Dosen von etwa 10 mSv (integriert über 10 Jahre) angegeben [13].

Basierend auf den Risikoeffizienten der ICRP und Schätzungen der spontanen Mortalität nach [14], ergäbe sich dann für die Bewohner der kontaminierten Gebiete in Russland, Weißrussland und der Ukraine eine Erhöhung der Krebsmortalität um etwa 0,3 %. Für die Evakuierten ergäbe sich entsprechend eine um etwa 0,9 % erhöhte Krebsmortalität. Dabei wird immer implizit die Gültigkeit der bislang nicht bewiesenen LNT-Arbeitshypothese vorausgesetzt, nämlich dass sich die an den Atombombenüberlebenden bei akuten Dosen oberhalb 100 mSv gewonnenen Risikoschätzungen auf die Bevölkerung der kontaminierten Gebiete, die viel kleineren und über einen längeren Zeitraum wirkenden Dosen ausgesetzt war, direkt übertragen lassen. Bei den Bewohnern der kontaminierten Gebiete könnte es dann im Laufe ihres Lebens zudem zu einer Erhöhung der Leukämiefälle um etwa 1,3 % sowie bei den evakuierten Personen um etwa 4 % kommen.

Schilddrüsenkrebs: In der Umgebung des Reaktors gab es in den ersten Tagen nach dem Unglück hohe Iodkonzentrationen in der Luft und in den ersten Wochen hohe Iodkonzentrationen in den Nahrungsmitteln. Aufgrund mangelnder Gegenmaßnahmen führten die Nahrungsmittelkontaminationen, insbesondere von Milch, zu beträchtlichen Schilddrüsendosen in der Bevölkerung. Mit Abstand das dominierende Radionuklid war hierbei ¹³¹I, das eine Halbwertszeit von acht Tagen hat. Kurzlebige Radionuklide trugen über die Nahrung nur etwa 1 % zur Schilddrüsendosis bei [15].

In den ersten Wochen nach dem Tschernobyl-Unfall wurden insgesamt 350 000 Messungen durchgeführt, um die Gammastrahlung aufgrund radioaktiver Zerfälle von ¹³¹I-Atomen in der Schilddrüse zu detektieren. Aus diesen Messungen wurden die Schilddrüsendosen der gemessenen Personen rekonstruiert [16, 17]. Die Messungen hatten sehr unterschiedliche Qualität, sodass viele der abgeschätzten Individualdosen große Unsicherheiten besitzen. Die Werte für die mittleren Dosen

in Bevölkerungsgruppen sind hingegen verlässlicher. In einigen Dörfern wurden bei Kleinkindern mittlere Schilddrüsendosen von über 10 Gy gemessen.

Seit 1990 wird eine signifikante Zunahme der Schilddrüsenkrebsrate unter denjenigen in Weißrussland und in den höher kontaminierten Gebieten der Ukraine beobachtet, die zum Zeitpunkt des Tschernobyl-Unfalls unter 18 Jahre alt waren (Abb. 1). In dem am höchsten kontaminierten Gebiet in Weißrussland, in Gomel, war der Effekt besonders dramatisch: Nach einer Abschätzung lag die Anzahl der beobachteten Fälle um mehr als einen Faktor 6 über der der spontanen Fälle [18]. Selbst nach einer erfolgreichen Operation des Schilddrüsenkrebses bedeutet die Krankheit in der Regel doch eine langfristige erhebliche Beeinträchtigung der Lebensqualität. So waren nach der Schilddrüsenoperation bei 63 % der Patienten eine ¹³¹I-Therapie und bei 23 % der Patienten wiederholte Operationen notwendig. Weiterhin müssen die Patienten lebenslang Hormonpräparate einnehmen. Immerhin sind die Heilungschancen sehr groß: Unter weißrussischen Patienten wurde nach der Schilddrüsenkrebsoperation eine 10-Jahres-Überlebenswahrscheinlichkeit von 98,5 % beobachtet [19]. In der Gruppe von 741 Patienten, von

6) Ohne chronisch-lymphatische Leukämie, da diese offensichtlich nicht durch Strahlung induziert wird.

7) Ohne Berücksichtigung der Schilddrüsendosen, die gesondert betrachtet werden.

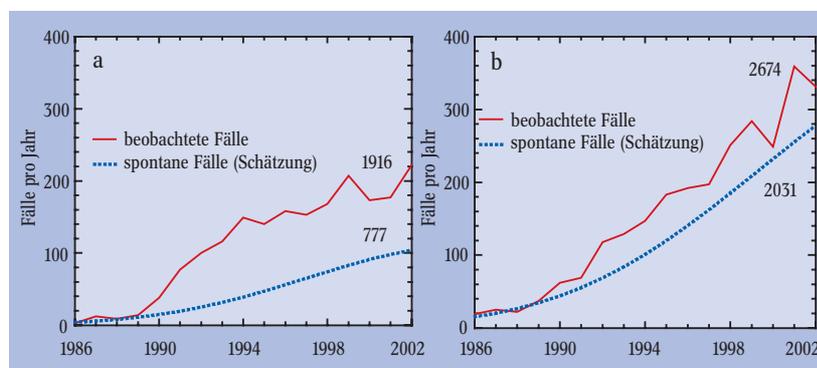


Abb. 1: Jährliche (Linien) und aufsummierte Anzahlen (Ziffern an den Linien) von Schilddrüsenkrebsoperationen von 1986 bis 2002 unter 2,7 bzw. 14 Millionen Personen, die zum Zeitpunkt des Tschernobyl-Unfalls Kinder oder Jugendliche waren in Weißrussland (a) bzw. in der Ukraine (b) [18].

denen 222 Patienten über zehn Jahre beobachtet werden konnten, traten neun Todesfälle auf. Von diesen waren sechs Todesfälle durch den Schilddrüsenkrebs und damit verbundene Metastasen verursacht.

Das gehäufte Auftreten von Schilddrüsenkrebs nach dem Tschernobyl-Unfall wurde mit drei verschiedenen Arten von epidemiologischen Studien untersucht: Fall-Kontrollstudien, eine Kohortenstudie und ökologische Studien.

► Die drei bis jetzt durchgeführten *Fall-Kontrollstudien* in Weißrussland und Russland zeigten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition und der Erhöhung der Erkrankungsrate [20–22]. In diesen Studien wurden den Schilddrüsenkrebspatienten aus jeweils einem vorbestimmten Gebiet und einem vorbestimmten Zeitintervall Kontrollpersonen zugeordnet, die mit den Patienten jeweils in Alter, Geschlecht, Wohngebiet und möglicherweise weiteren Parametern übereinstimmten. Basierend auf Befragungen wurden die Schilddrüsendosen der Patienten und der Kontrollpersonen rekonstruiert. In einer Analyse der Daten mit einem linearen Dosis-Wirkungs-Modell ergab die größte der Studien [22] für eine Exposition mit einer Dosis von 1 Sv ein zusätzliches relatives Inzidenz- (nicht: Mortalitäts-) Risiko von 4,5 (95 % KI: 1,2–7,8).

Ein Nachteil dieser Fall-Kontrollstudien liegt in der großen Unsicherheit der rekonstruierten Schilddrüsendosen, die nicht auf Messungen, sondern auf einer Modellierung basieren. Es ist zu erwarten, dass eine

Re-Analyse der Daten unter Berücksichtigung der Dosisunsicherheiten aus mathematischen Gründen zu einem höheren Ergebnis für das relative Risiko führen wird.

► Gegenwärtig existiert nur eine *Kohortenstudie*. Erste Ergebnisse der Studie werden noch im Jahr 2006 erwartet. Im Gegensatz zu den Fall-Kontrollstudien basieren die Dosiswerte in dieser Studie auf Messungen gleich nach dem Unfall im Jahre 1986. Sie schließt 26 161 Personen in der Ukraine und in Weißrussland ein, für die die ^{131}I -Aktivität in den ersten Wochen nach dem Tschernobyl-Unfall gemessen wurde [23]. Die Stärken dieser Studie liegen in den Iodmessungen, in der Größe der Kohorte und in den einheitlichen, zweijährigen Schilddrüsenuntersuchungen. Die intensiven Schilddrüsenuntersuchungen in der Kohortenstudie führen allerdings auch dazu, dass die registrierten Erkrankungsraten erheblich höher sind als die Erkrankungsraten in der allgemeinen, nicht so gründlich untersuchten Bevölkerung. Dementsprechend ist zu erwarten, dass das zusätzliche absolute Risiko je Dosis in der untersuchten Kohorte deutlich über dem in der Allgemeinbevölkerung liegen wird. Gleichzeitig kann durch die intensiven Schilddrüsenuntersuchungen das relative Risiko in der Kohorte deutlich niedriger als in der Bevölkerung sein. Ein solcher Effekt wurde unter Patienten, die wegen gutartiger Erkrankungen am Michael Reese Hospital in Chicago bestrahlt wurden, beobachtet: Der beste Schätzwert des relativen Risikos verringerte sich nach einer Intensivierung der Schilddrüsenuntersuchungen um einen Faktor 5 [24]. Möglicherweise wird durch eine Intensivierung der Untersuchung die Anzahl gefundener spontaner Tumoren stärker erhöht als die Anzahl gefundener strahleninduzierter Tumoren. Aus Autopsiestudien ist bekannt, dass ca. 10 % der Allgemeinbevölkerung Schilddrüsentumoren haben, ohne dass diese klinisch auffallen. Ein Teil dieser spontanen Tumoren wird durch eine Intensivierung von Schilddrüsenuntersuchungen entdeckt.

► Eine *ökologische Studie* schließt mittlere Dosen in 18 Alters- und Geschlechtsgruppen in 1034 ukrainischen und weißrussischen Orten ein, in denen mehr als zehn Messungen der ^{131}I -Aktivität in der Schilddrüse durchgeführt wurden. In diesen Orten wohnten zum Zeitpunkt des Unfalls 1,6 Millionen Kinder und Jugendliche, unter denen zwischen 1990 und 2001 insgesamt 1089 Schilddrüsenkrebsfälle operiert wurden [25]. Eine Analyse der alters- und geschlechtsspezifischen Daten in den einzelnen Orten ergab ein zusätzliches absolutes Risiko nach einer Schilddrüsenexposition mit 1 Sv von 2,5 Fällen je 10^4 Personenjahren (95 % KI: 2,0–3,0). Die jährliche Anzahl der zusätzlichen Krebsfälle stieg über den gesamten Beobachtungszeitraum von 1990 bis 2001 mit zunehmendem Alter der Exponierten kontinuierlich an. Daraus folgt, dass ein wesentlicher Anteil der mit der Strahlenexposition assoziierten Schilddrüsenkrebsfälle noch in der Zukunft zu erwarten ist. Der Anstieg ist besonders ausgeprägt für Menschen, die in jungen Jahren exponiert wurden. Die Studie ergab ein zusätzliches relatives Risiko nach einer Exposition mit 1 Sv von 19 (95 % KI: 11–27). Das zusätzliche relative Risiko fällt exponentiell mit dem Alter. Dies liegt an der starken Zunahme der spontanen Erkrankungsrate an Schilddrüsenkrebs mit dem Lebensalter. Am Ende der Beobachtungsperiode (2001) stimmten sowohl das zusätzliche absolute Risiko als auch das zusätzliche relative Risiko sehr gut mit Risikowerten überein, die nach externen Expositionen der Schilddrüse im Kindesalter beobachtet wurden [26].

Bei ökologischen Studien besteht die Gefahr eines sog. ökologischen Fehlschlusses (siehe unten). Erste Simulationsrechnungen haben allerdings ergeben, dass der ökologische Fehlschluss in Studien des Schilddrüsenkrebsrisikos in den weißrussischen und ukrainischen Orten mit Messungen der ^{131}I -Aktivität in der Schilddrüse gering ist, weil hier die Strahlung ein dominierender Risikofaktor ist, und weil die Anzahl der vorliegenden Messungen enorm hoch ist [27].

Vor dem Tschernobyl-Unfall wurde von einer Mehrheit der Wissenschaftler angenommen, dass ^{131}I bei gleicher mittlerer Dosis in der Schilddrüse eine geringere karzinogene Wirkung hat als externe Strahlung. Diese Annahme basierte darauf, dass andere als Tschernobyl-Studien keinen signifikanten Effekt von ^{131}I -Expositionen nachweisen konnten. Allerdings hatten alle diese Studien wegen relativ geringer Fallzahlen nur eine begrenzte Aussagekraft. Dies gilt auch für eine sehr große Studie schwedischer Patienten [28], in der die meisten Schilddrüsenkrebsfälle durch andere Ursachen als durch ^{131}I -Aufnahme verursacht wurden. Die nach dem Tschernobyl-Unfall durchgeführten Studien unterstützen aber nicht diese Annahme, dass ^{131}I bei gleicher Schilddrüsendosis eine geringere karzinogene Wirkung als externe Strahlung hat.

Andere solide Tumoren: Bisher konnten weder bei den Evakuierten noch bei der Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten Anzeichen für ein erhöhtes, strahleninduziertes Krebsrisiko gefunden werden. Dies überrascht nicht weiter, wenn man bedenkt, dass zum einen die zusätzlichen Dosen, denen selbst die Bevölkerung in den höher kontaminierten Gebieten ausgesetzt war bzw. immer noch ist, relativ gering sind. Im Falle von soliden Tumoren kommt zum anderen das hohe spontane und mit dem Kalenderjahr und dem Ort variierende Auftreten dieser Erkrankungen hinzu, sodass eine geringe zusätzliche strahleninduzierte Erhöhung nur sehr schwer nachweisbar wäre. Möglicherweise bildet Brustkrebs in diesem Zusammenhang eine Ausnahme. Kürzlich wurden erste Berichte bekannt, nach denen das Auftreten dieser Erkrankung bei Frauen aus den kontaminierten Gegenden der Ukraine erhöht sein könnte [29]. Obwohl es noch zu früh ist, diese Berichte zu bewerten, zeigen sie zumindest, wie wichtig es ist, in diesem Bereich weitere wissenschaftliche Erkenntnisse zu sammeln.

Leukämie: In einer Reihe von Studien wurde untersucht, inwieweit das Leukämierisiko bei denjenigen erhöht sein könnte, die in-utero bestrahlt worden waren. Die meisten der berichteten Ergebnisse sind statistisch nicht signifikant, basieren auf geringen Fallzahlen oder liefern in Bezug auf Dosisabhängigkeiten bestenfalls widersprüchliche Ergebnisse. Zudem wurden bei keiner dieser Arbeiten individuelle Dosissschätzungen verwendet. Daher sind momentan keine belastbaren Aussagen möglich, ob die Leukämierate bei dieser Personengruppe strahleninduziert erhöht ist oder nicht.

Exemplarisch sei eine ökologische Studie diskutiert [30], deren Autoren das Auftreten von Leukämie im Zeitraum von 1982 bis 1998 bei Kindern unter 15 Jahren aus den beiden am stärksten betroffenen weißrussischen Verwaltungsbezirken („Oblasts“) Gomel und Mogilev (mittlere zusätzliche effektive Dosis für den Zeitraum 1986–1995: 6,4 mSv bzw. 3,5 mSv) verglichen mit dem bei Kindern aus den übrigen fünf Bezirken (mittlere zusätzliche effektive Dosis für den Zeitraum 1986–1995: 1,0–1,6 mSv). Die angegebenen Leukämie-Inzidenzraten (Abb. 2) lassen für keinen der betrachte-

ten Bezirke in den Jahren nach dem Unfall einen statistisch signifikanten Anstieg erkennen. Zudem liegen die Inzidenzraten in den beiden kontaminierten Bezirken Gomel und Mogilev nicht über denen in den weniger kontaminierten Bezirken. Auch wenn die jährlich vorliegenden Daten in eine Periode vor dem Unfall (1982–1986) und zwei Perioden nach dem Unfall (1987–1991 und 1992–1996) zusammengefasst werden, ergeben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der Zeit vor und nach dem Unfall (Abb. 3).

Dieses Ergebnis mag überraschend sein, doch ist es durchaus mit aktuellen radiologischen Erkenntnissen im Einklang. Aus den Daten der Atombomben-Überlebenden folgt unter der Annahme der LNT-Hypothese beispielsweise, dass von 100 000 Kindern unter 15 Jahren bei einer angenommenen Exposition mit 5 mSv (die etwa der für den Zeitraum 1986–1995 in den stärker kontaminierten Oblasts abgeschätzten kumulativen Expositi-

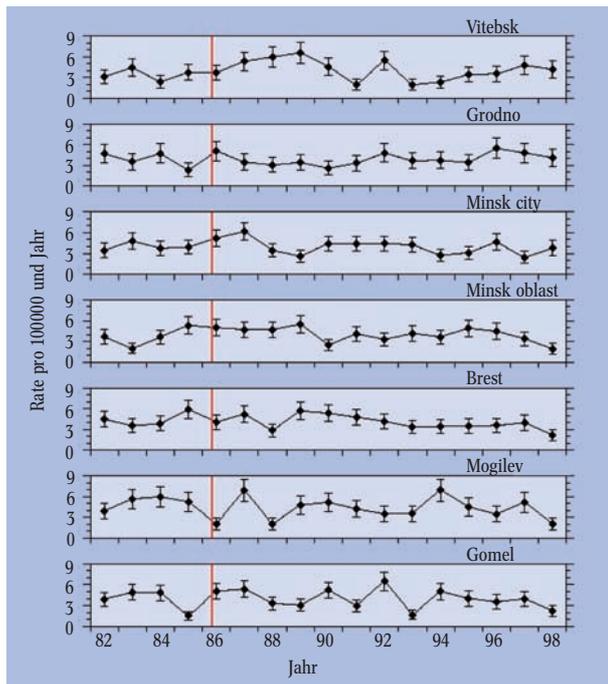


Abb. 2: Jährliche Leukämierate bei Kindern unter 15 Jahren in den sieben weißrussischen Verwaltungsbezirken (schwarze Symbole inklusive Standardabweichung) [30].

tion der Bevölkerung entspricht, siehe oben) zusätzlich etwa zwei Kinder vor Erreichen des 15. Lebensjahres an Leukämie erkranken würden. Basierend auf einer mittleren spontanen Leukämierate von 4 pro 100 000 und Jahr, die für Weißrussland typisch ist (Abb. 2, links), würde man dagegen in 15 Jahren unter 100 000 Kindern etwa 60 spontane Leukämiefälle erwarten.

Für Erwachsene berichten einige Studien in den höher kontaminierten Gebieten (^{137}Cs -Deposition $> 37 \text{ kBq/m}^2$) von signifikant erhöhten Leukämiezahlen in den Jahren nach dem Unfall verglichen mit denen davor. Ein derartiger Anstieg wird jedoch auch für deutlich geringer kontaminierte Gebiete beobachtet. Signifikante Unterschiede zwischen kontaminierten und nicht kontaminierten Gebieten ließen sich nicht nachweisen.

Bevölkerung in Deutschland

Wie im Artikel von R. Michel und G. Voigt ausführlich beschrieben, war Süddeutschland auf Grund der Regenfälle, die niedergingen, während die radioaktive Wolke Deutschland passierte, die am stärksten vom

Fallout betroffene deutsche Gegend. Für eine (hypothetische) Person, die von 1986 bis 2036 ausschließlich in dieser Region und von in dieser Region gewonnenen Nahrungsmitteln lebt, kann man eine zusätzliche, über diese 50 Jahre integrierte effektive Dosis von etwa 2 mSv abschätzen, wobei etwa die Hälfte davon innerhalb des ersten Jahres akkumuliert wurde. Im Vergleich dazu betrug die mittlere jährliche effektive Dosis für die Bevölkerung in Deutschland im Jahr 2004 2,1 mSv aus natürlichen Quellen ionisierender Strahlung plus 1,8 mSv durch künstliche Quellen, insbesondere durch medizinische Diagnostik [31]. Diese etwa 4 mSv pro Jahr führen in 50 Jahren zu einer mittleren Gesamtdosis des durchschnittlichen Deutschen von etwa 200 mSv. Zudem weist die natürliche jährliche Strahlenexposition in Deutschland je nach Urangehalt des Bodens und Höhe des Wohnortes über dem Meeresspiegel durchaus regionale Unterschiede der Größenordnung von 1 mSv pro

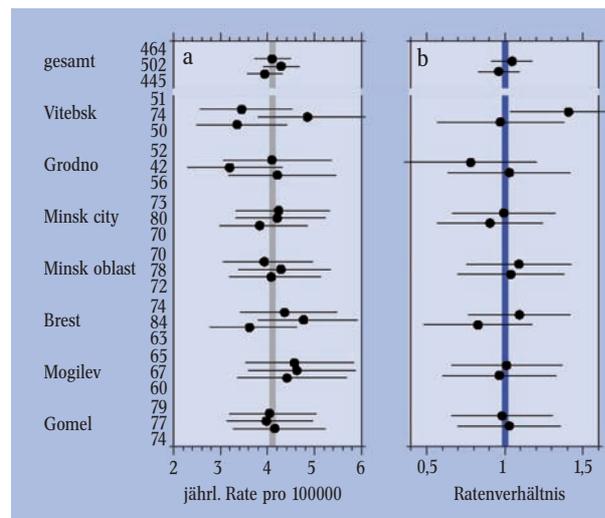


Abb. 3: ► a) Raten (inkl. 95 % Konfidenzintervalle) kindlicher Leukämie für ganz Weißrussland und die sieben Bezirke getrennt, jeweils für 1982–1986 (oben), 1987–1991 (Mitte) und 1992–1996 (unten); die Zahlen links repräsentieren die im entsprechenden Zeitraum und Gebiet beobachteten Leukämiefälle; das graue Band markiert die mittlere in ganz Weißrussland und im gesamten Untersuchungszeitraum (1982–1996) beobachtete Rate. ► b) Verhältnis der Leukämieraten nach dem Unfall (1987–1991, oben, bzw. 1991–1996, unten) zu denen vor dem Unfall (1982–1986); blau markiert ist das Verhältnis 1 [30].

Jahr und mehr auf. Diese Betrachtungen verdeutlichen, dass die zusätzlichen, durch den Unfall von Tschernobyl für die deutsche Bevölkerung resultierenden Dosen so gering waren, dass etwaige rechnerische gesundheitliche Spätfolgen von denen anderer Einflussfaktoren, wie Ernährungs- und Rauchgewohnheiten, überdeckt würden bzw. in den statistischen Schwankungen der epidemiologischen Daten untergehen würden.

Außerhalb der ehemaligen Sowjetunion waren die Schilddrüsendosen durch das freigesetzte ^{131}I relativ gering. Deshalb richtete sich das Interesse vor allem auf das langlebigere ^{137}Cs (Halbwertszeit 30 Jahre).

Die in Deutschland durchgeführten ökologischen Studien wurden mit relativ geringer Sorgfalt durchgeführt, sodass aus diesen Studien nicht auf eine erhöhte Erkrankungsrate durch die Strahlenexposition in Deutschland nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl geschlossen werden kann. Um den Einfluss kleiner Gesundheitsrisiken mit epidemiologischen Methoden zu untersuchen, sind selbst Studiendesigns mit großer Sorgfalt nicht geeignet, wie sie z. B. in Schweden von

Tondel et al. durchgeführt worden sind. Schweden war außerhalb der ehemaligen Sowjetunion eines der Länder, in denen die höchsten radioaktiven Kontaminationen nach dem Unfall auftraten. Stellvertretend für die vielen ökologischen Studien, wird hier deshalb eine schwedische Studie der Krebshäufigkeit nach dem Tschernobyl-Unfall diskutiert.



Abb. 4: Eine der ukrainischen Familien, die an der Ernährungsstudie des International Chernobyl Assessment Project teilgenommen haben. (Quelle: IAEA)

Diese Studie unterteilt 450 Gemeinden Nordschwedens in sechs Gruppen entsprechend der nach dem Reaktorunfall abgelagerten ^{137}Cs -Flächenaktivität [32]. Dazu wurden alle Personen identifiziert, die im Alter von 0–60 Jahren während der beiden Jahre 1986 und 1987 in diesen Gemeinden gemeldet waren. Insgesamt gehörten 1 143 182 Personen zu dieser Gruppe. Im schwedischen Krebsregister sind für diese Personen-gruppe und für den Zeitraum 1988–1996 insgesamt 22 409 aufgetretene Krebsfälle verzeichnet. Ein Trendtest ergab ein signifikantes zusätzliches relatives Risiko von 0,11 bei einer ^{137}Cs -Flächenaktivität von 100 kBq/m^2 (95 % KI: 0,03–0,20). Dieser Wert ist deutlich höher als es auf Grund der von der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990 empfohlenen Risikowerte zu erwarten wäre. Diese Studie basiert zwar auf zuverlässigen Messungen der ^{137}Cs -Flächenaktivität in Nordschweden und auf Erkrankungsdaten eines international anerkannten Krebsregisters. Allerdings ist die Flächenaktivität kein guter Indikator für die Strahlenexposition. Die externe Strahlenexposition hängt von der Ablagerung und Abwitterung der Radionuklide und der Abschirmung der Strahlung an den Aufenthaltsorten der einzelnen Personen ab. Die interne Strahlenexposition wird im Wesentlichen durch die Kontamination der verzehrten Lebensmittel bestimmt, die meist in Gebieten mit anderen Radionuklidablagerungswerten produziert wurden. Die Hauptschwäche der Studie liegt jedoch in ihrem Design als ökologische Studie.

Ökologische Studien sind dadurch definiert, dass nur Mittelwerte für den untersuchten möglichen Risikofaktor (hier die ^{137}Cs -Flächenaktivität) und für andere Risikofaktoren zur Verfügung stehen. Wenn diese anderen Faktoren nicht nur mit dem untersuchten Effekt (hier gesamte Krebsinzidenz), sondern auch mit dem untersuchten möglichen Risikofaktor korreliert sind, dann sind sie zufällige Störfaktoren (Confounder), d. h. sie verzerren das Ergebnis der Risikoschätzung [33]. Die Verzerrung einer Risikoschätzung durch Confounder kann man in Studien, in denen Daten für die Risikofaktoren der einzelnen Individuen vorliegen (sog. analytische Studien) durch eine Adjustierung korrigieren. In ökologischen Studien hingegen liegen keine

Individualdaten vor, sodass man nur für Korrelationen korrigieren kann, die zwischen den Mittelwerten der Risikofaktoren in den ökologischen Einheiten (hier: Gemeinden) bestehen. So wurde in der Studie von Tondel et al. zum Beispiel für eine mögliche Korrelation zwischen den mittleren ^{137}Cs -Flächenaktivitäten in den Gemeinden und einem Indikator für andere Risikofaktoren, der Krebsinzidenz in den Jahren 1986 und 1987, adjustiert. Allerdings kann auch *innerhalb* der Gemeinden eine Korrelation zwischen der ^{137}Cs -Flächenaktivität an den Aufenthaltsorten der einzelnen Einwohner und ihren anderen Risikofaktoren für Krebs bestehen. Die Studie beinhaltet keine Information über derartige Korrelationen, sodass deshalb auch nicht für Korrelationen innerhalb der Gemeinden korrigiert werden kann.

Die Gefahr einer Verzerrung des Studienergebnisses durch Confounder ist besonders groß, wenn ihr Einfluss vergleichbar oder größer ist zum untersuchten Risikofaktor. Genau dies ist in der Studie der Fall. Die Krebsinzidenz in den Jahren 1988–1996 ist sowohl mit der Bevölkerungsdichte als auch mit der Krebsinzidenz in den Jahren 1986–1987 jeweils halb so stark korreliert, wie in der ökologischen Analyse mit der ^{137}Cs -Flächenaktivität. Schon allein aus diesem Grund kann aus der Studie von Tondel et al. nicht auf eine Erhöhung der Krebsinzidenz in Nordschweden durch den Reaktorunfall von Tschernobyl geschlossen werden.

Schlussbetrachtungen

Die Erhöhung der Schilddrüsenkrebsinzidenz unter denjenigen, die in den höher kontaminierten Gebieten der ehemaligen Sowjetunion als Kinder oder Jugendliche exponiert wurden, stellt den einzigen, eindeutig auf die Exposition mit ionisierender Strahlung zurückzuführenden Gesundheitseffekt des Tschernobyl-Unfalls in der Bevölkerung dar. Die immer noch ansteigende Rate von jährlich zusätzlich auftretenden Fällen macht eine längerfristige Beobachtung der Erkrankungs-raten an Schilddrüsenkrebs in den betroffenen Gebieten notwendig. Hier ist zu beachten, dass die Intensivierung der medizinischen Untersuchungen und die Verbesserung der Berichtsrate fast ebenso viele Fälle zum Anstieg der registrierten Erkrankungsrate beitragen wie die Strahlenexposition. Der Tschernobyl-Unfall hat in Deutschland wie auch in vielen anderen Staaten eine Überarbeitung der Richtlinien für prophylaktische Maßnahmen im Ereignisfall einer größeren Umweltkontamination durch ^{131}I bewirkt [34]. Gegenwärtig werden in der Umgebung von deutschen Kernkraftwerken Tabletten von stabilem Jod eingelagert, um sie im Falle eines Reaktorunfalls verteilen zu können.

Bei der Bevölkerung in den kontaminierten Gebieten der ehemaligen Sowjetunion konnte bis jetzt keine strahleninduzierte Erhöhung der anderen Krebs- und Leukämieraten nachgewiesen werden, vermutlich weil die Dosen und deshalb möglichen Gesundheitseffekte hierfür zu niedrig waren. Für die Aufräumarbeiter stellt sich die Situation anders dar: Hier sind die mittleren Dosen ähnlich hoch wie bei den Atombombenüberlebenden, sodass der künftige Nachweis verschiedener strahleninduzierter Spätfolgen nicht unmöglich ist. Erste Studien, die von einer strahleninduzierten Erhöhung der Leukämieraten unter den Aufräumarbeitern berichten, wurden bereits veröffentlicht. Da mehr als 50 Jahre nach den Atombombenexplosionen über Hiroshima und Nagasaki das Krebsrisiko unter den Atombombenüberlebenden noch immer erhöht ist,

darf 20 Jahre nach dem tragischen Reaktorunglück von Tschernobyl diesbezüglich noch keine Entwarnung gegeben werden. Daher müssen die Untersuchungen der gesundheitlichen Spätfolgen des Reaktorunglücks weitergeführt werden.

In der Folge des Tschernobyl-Unfalls wurde zudem eine große Anzahl von Studien über mögliche Gesundheitseffekte des Unfalls bei der Bevölkerung anderer europäischer Länder veröffentlicht. Einige dieser Studien führten zu einer starken Resonanz in den Medien und in der Bevölkerung. In der Regel waren diese Studien jedoch allein auf Grund ihres Designs ungeeignet, um irgendeinen Gesundheitseffekt wissenschaftlich nachweisen zu können. Aus statistischen Gründen werden jedoch auch die besten epidemiologischen Studien nicht über das eventuelle Vorhandensein eines strahleninduzierten Effekts durch kleine Dosen im mSv-Bereich entscheiden können. Auch aus diesem Grund sollte eine quantitative Untersuchung der Strahlenkarzinogenese intensiviert werden.

Auch wenn mit Ausnahme der in der Bevölkerung aufgetretenen Fälle von Schilddrüsenkrebs und möglicherweise einiger zusätzlicher Leukämiefälle unter den Aufräumarbeitern bis jetzt keine gesundheitlichen Spätfolgen nachgewiesen werden konnten – alleine die Zahl der mit dem Unfall begründeten Abtreibungen und die psycho-sozialen Belastungen der Betroffenen durch die als unsichtbare Bedrohung empfundene Radioaktivität und die Umsiedlungen sind enorm. Die erhöhte Selbstmordrate unter den Aufräumarbeitern mag hierzu als Beispiel dienen. Hinzu kommen immense ökonomische Konsequenzen, wie z. B. die durch die Umsiedlungen und Abschaltung der Reaktorblöcke entstandenen Folgekosten. Selbst 20 Jahre nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl sind die tragischen Folgen für die am stärksten betroffenen Länder Russland, Weißrussland und die Ukraine in vielen Bereichen noch spürbar.

Literatur

- [1] D. L. Preston et al., *Radiat. Res.* **160**, 381 (2003)
- [2] E. Ron, *Health Phys.* **85**, 47 (2003)
- [3] D. L. Preston et al., *Radiat. Res.* **161**, 377 (2004)
- [4] S. Yoshinaga et al., *Radiology* **233**, 313 (2004)
- [5] R. Wakeford und M. P. Little, *Int. J. Radiat. Biol.* **79**, 293 (2003)
- [6] ICRP (Hrsg.), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, *Annals of the ICRP* **21** (1-3). Pergamon Press, Oxford (1991)
- [7] A. Aurengo et al., *Dose-effect relationships and estimation of the carcinogenic effect of low doses of ionizing radiation*, Académie des Sciences – Académie Nationale de Médecine, Paris (2005)
- [8] *Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation* (BEIR VII-Phase2), *Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, National Research Council, The National Academies Press, Prepublication Copy (www.nap.edu) (2005)
- [9] V. K. Ivanov et al., *Health Phys.* **81**, 514 (2001)
- [10] V. K. Ivanov et al., *Medical radiological consequences of the Chernobyl catastrophe in Russia*, St. Petersburg (2004)
- [11] V. K. Ivanov et al., *Radiat. Environ. Biophys.* **43**, 35 (2004)
- [12] V. K. Ivanov et al., *Health effects and assessment of radiation risks for emergency workers of the Chernobyl accident*, WHO, Genf (2001)
- [13] UNSCEAR (Hrsg.), *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Report to the

- General Assembly, United Nations, New York (2000)
- [14] E. Cardis et al., *One Decade after Chernobyl. Proceedings of an International Conference*, STI/PUB/1001. IAEA, Vienna (1996)
- [15] Y. Gavrillin et al., *Health Phys.* **86**, 565 (2004)
- [16] Y. I. Gavrillin et al., *Health Phys.* **76**, 105 (1999)
- [17] I. Likhtarov et al., *Radiat. Res.* **163**, 125 (2005)
- [18] P. Jacob et al., *J. Radiol. Prot.* **26**, 1 (2006)
- [19] Y. E. Demidchik et al., *Ann. Surgery*, im Druck
- [20] L. N. Astakhova et al., *Radiat. Res.* **150**, 349 (1998)
- [21] S. Davis et al., *Radiat. Res.* **162**, 241 (2004)
- [22] E. Cardis et al., *J. Natl. Cancer Inst.* **97**, 724 (2005)
- [23] V. A. Stezhko et al., *Radiat. Res.* **161**, 481 (2004)
- [24] A. B. Schneider et al., *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **77**, 362 (1993)
- [25] P. Jacob et al., *Radiat. Res.* **165**, 1 (2006)
- [26] E. Ron et al., *Radiat. Res.* **141**, 259 (1995)
- [27] M. Blettner et al., *Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission* **56**, 137 (2005)
- [28] P. W. Dickman et al., *Int. J. Cancer* **106**, 580 (2003)
- [29] WHO (Hrsg.), *UN-Chernobyl Forum Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Healthcare Programmes*, WHO, Geneva (2005)
- [30] Gapanovich et al., *Radiat. Environ. Biophys.* **40**, 259 (2001)
- [31] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* (Hrsg.), *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2004* (2005)
- [32] M. Tondel et al., *J. Epidemiol. Community Health* **58**, 1011 (2004)
- [33] H. Morgenstern, in: K. J. Rothman und S. Greenland (Hrsg.), *Modern Epidemiology*, Lippincott – Raven, Philadelphia (1998), S. 459
- [34] SSK (Hrsg.), *Fachgespräch zur Iodblockade der Schilddrüse bei kerntechnischen Unfällen*. Veröffentlichl. der Strahlenschutzkommission **48**, 175 (2001)

Die Autoren

Peter Jacob studierte Physik und promovierte 1979 an der TU München. Er leitet die Arbeitsgruppe Risikoanalyse am GSF-Institut für Strahlenschutz und ist Vorsitzender des Ausschusses Strahlenrisiko der Strahlenschutzkommission. Jacob koordiniert internationale Projekte zum Schilddrüsenkrebs nach dem Tschernobylunfall und zum Strahlenrisiko von Arbeitern und der Bevölkerung, die in der UdSSR in Folge der Plutoniumproduktion für Atomwaffen exponiert wurden.



Wurden.

Werner Rühm studierte an der TU München Physik, wo er 1993 auch promovierte. Von 1994 bis 1997 war er wissenschaftlicher Angestellter am Bundesamt für Strahlenschutz, seit 1997 arbeitet er am Institut für Strahlenbiologie der LMU München. Als Gastwissenschaftler forschte Rühm auch in Japan. 2002 hat sich Rühm an der LMU habilitiert.



Herwig G. Paretzke gilt als international angesehener Experte für Strahlenphysik. Er war und ist Mitglied zahlreicher nationaler und internationaler Kommissionen. Paretzke studierte Physik an der TU München, wo er auch promovierte und schließlich 1987 habilitierte. Er wandte sich 1968 dem Gebiet der Strahlenphysik zu, weil er verstehen wollte, wie Ionen-Spuren in Strahlendetektoren entstehen und welche biologischen Wirkungsmechanismen sie in Zellen und Körpergewebe anstoßen. Seit dieser Zeit arbeitet und forscht er am GSF-Institut für Strahlenschutz, dessen Direktor er seit 1993 ist.

