

Kinderleukämie und Kernkraftwerke – **(K)**Ein Grund zur Sorge?

Grundlagen, Studien, Analysen



**«Kinderleukämie und Kernkraftwerke –
(K)Ein Grund zur Sorge?»**

Das FME hat seine Broschüre «Kinderleukämie und Kernkraftwerke – (K)Ein Grund zur Sorge?» aufgrund des grossen Interesses in einer zweiten Auflage veröffentlicht. Sie ermöglicht dem Leser einen Einblick in den Stand der Forschung zu dieser Thematik.

«Eine ausgezeichnete Broschüre.»

Alan Niederer, Redaktion NZZ Wissenschaft

**«Sachlich korrekte und notwendige Darstellung
relevanter Sachverhalte.»**

Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW)

**«Wir möchten auf eine nach unserer Einschätzung
sehr ausgewogene und gut verständliche Darstellung
der gesamten Problematik [Kinderleukämie
und Kernkraftwerke; Ergänzung FME] hinweisen,
die vom Schweizer Forum Medizin und Energie
(FME) herausgegeben wurde.»**

Dr. Peter Kaatsch, Leiter des Deutschen Kinderkrebsregisters in Mainz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	
Von Prof. Dr. Ralph Eichler, Präsident der ETH Zürich	4
1 Wichtigste Aspekte in Kürze	5
2 Einleitung	6
3 Strahlendosen und Leukämie – Erkenntnisse aus der Geschichte	7
3.1 Die Pionierzeit der Röntgenstrahlen	7
3.2 Hiroshima und Nagasaki	9
3.3 Tschernobyl	10
4 Wirkung von Strahlen und Schutzmassnahmen	12
4.1 Ionisierende Strahlen, ihre Messung und ihre biologische Wirkung	12
4.2 Die Strahlenschutz-Gesetzgebung und die Überwachung der Radioaktivität	13
4.3 Die mittlere Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung und der Beitrag der KKW im Vergleich	14
5 Kinderleukämie und Strahlen	16
5.1 Das Krankheitsbild Kinderleukämie	16
5.2 Forschungsstand bei den Ursachen	17
5.3 Gegenwärtige Ansichten zur Leukämieentstehung	19
6 Epidemiologie-Studien um KKW-Standorte	20
6.1 Epidemiologische Studien	20
6.2 Die deutsche KiKK-Studie (2007)	21
6.3 Überblick über die bisherigen Studien auf diesem Gebiet	23
6.4 Überblick über die bisherigen Metastudien	24
6.5 Epidemiologische Studien zu anderen Ursachen	26
7 Zusammenfassung	26
7.1 Beurteilungen und Folgerungen	26
7.2 Schlussbetrachtungen	28
8 Anhang	29
8.1 Glossar	29
8.2 Weiterführendes Quellenverzeichnis	32
8.2.1 Allgemeine Grundlagen	32
8.2.2 Die wichtigsten epidemiologischen Studien im Überblick	33
8.3 Weiterführende Links	33
Impressum	35

Vorwort

Die Tatsache, dass sowohl Röntgen- und Mobilfunkstrahlung als auch kosmische Strahlung durch unsere Sinnesorgane nicht wahrgenommen werden kann, löst bei vielen Menschen Angst aus und gibt Raum für emotionale Botschaften. Die vorliegende Studie nimmt die Bedenken ernst, regt die Leserinnen und Leser gekonnt zum Nachdenken an und versetzt sie in die Lage, sich ein eigenes Urteil zum Thema zu bilden.

Eine wichtige Grundlage des westlichen Wissenschaftsverständnisses ist die Annahme, dass jede Wirkung eine Ursache hat. Mit statistischen Methoden können wir bestehende Abhängigkeiten aufzeigen. Aber aufgepasst: hohe Korrelationen zwischen zwei Phänomenen, auch wenn sie statistisch korrekt berechnet sind, bilden nicht immer kausale Beziehungen ab. Das folgende Beispiel zeigt dies anschaulich: statistisch kann man zeigen, dass das mittlere Einkommen bei Männern umso grösser ist, je weniger Haare sie auf dem Kopf haben. Die Ursache für das höhere Einkommen ist aber nicht der schütterere Haarwuchs, sondern das höhere Alter der Männer, weil dieses sowohl der Grund für weniger Haare als auch für ein höheres mittleres Einkommen sein kann.

In unserer rechtlich reglementierten Welt wünschen wir uns absolute Aussagen zu Risiken. Fortschritte in Technik und Medizin ermöglichen immer empfindlichere Messmethoden. Sie unterstützen das gesellschaftliche Bestreben, die rechtlich erlaubten Toleranzwerte weiter zu senken. In der Physik jedoch gibt es keine Messgrösse Null, sondern korrekt kann nur geschlossen werden, dass ein Effekt kleiner als die Messgenauigkeit des verwendeten Instruments oder der angewendeten Methode ist.

So werden am Schluss auch in einer rechtlich reglementierten, wissenschaftlich immer besser verstandenen und technisch immer stärker kontrollierten Welt stets Unsicherheiten bestehen bleiben. Somit wird sich auch in Zukunft jeder einzelne ein persönliches Urteil und eine persönliche Wertung zu Unsicherheiten und Unkenntnissen bilden müssen. Je mehr man selber versteht, desto einfacher ist es auch, sich eine persönliche Meinung zum Risiko zu machen, das man selber zu akzeptieren bereit ist.

Prof. Dr. Ralph Eichler, Präsident der ETH Zürich

1 Wichtigste Aspekte in Kürze

Das Ziel der vorliegenden Broschüre ist, die Leserinnen und Leser in die Lage zu versetzen, sich ein eigenständiges Urteil zu diesem Thema bilden zu können. Die Autoren bemühten sich deshalb um eine klare und verständliche Sprache. Einzelne Fachbegriffe liessen sich trotzdem nicht ganz vermeiden. Diese werden im *Text kursiv dargestellt* und in einem Glossar ab Seite 29 erklärt.

Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Informationen der Broschüre zusammen. Ausführliche Erklärungen finden sich in den entsprechenden Kapiteln.

Schutzmassnahmen und Strahlenwirkung

Der Mensch ist ständig und überall *ionisierender* Strahlung ausgesetzt. Pro Sekunde durchdringen Tausende von schnell fliegenden subatomaren Teilchen und *elektromagnetische Wellenpakete* den Körper. Diverse Quellen verursachen ganz unterschiedliche Strahlendosen.

Die durchschnittliche jährliche Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung beträgt *4 Millisievert* (mSv). Sie setzt sich zusammen aus der kosmischen Strahlung (0,35 mSv), der terrestrischen Strahlung (0,45 mSv), dem Gas *Radon* in Wohnräumen (1,6 mSv), Kalium-40, das mit der Nahrung in den Körper aufgenommen wird (0,35 mSv), der medizinischen Radiodiagnostik (1,2 mSv) sowie den Kernkraftwerken (0,001-0,005 mSv).

Im Schweizer Recht wird der Strahlenschutz zum ersten Mal im Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz (1959) erwähnt. Gestützt darauf erschien die erste Strahlenschutz-Verordnung 1963. Die heutige sehr ausführliche Gesetzgebung enthält ein Strahlenschutz-Gesetz (StSG 814.50) und eine zugehörige Verordnung (StSV 814.501) sowie weitere Verordnungen und Richtlinien.

Zum Schutz vor den schädlichen Auswirkungen der *ionisierenden* Strahlen besteht seit 1928 die «International Commission on Radiological Protection» (ICRP). Seit 1950 gibt die ICRP Empfehlungen heraus, die wissenschaftlich fundiert und weltweit anerkannt sind.

Strahlendosen und Krebsrisiko

Ionisierende Strahlen erhöhen nach einer gewissen *Latenzzeit* die Wahrscheinlichkeit für eine Krebserkrankung. Diese *Latenzzeit* beträgt etwa 3 bis 6 Jahre für Leukämie und 10 bis 20 Jahre für solide Tumore. Die Wahrscheinlichkeit für einen durch Strahlen ausgelösten Krebs verhält sich proportional zur aufgenommenen Strahlendosis.

Das strahlenbedingte Krebsrisiko beträgt ca. 5 bis 10% pro Sievert und gilt ungefähr im Bereich von 3 Sievert bis hinunter zu 0,05 Sv (*50 Millisievert*). Im Bereich der noch kleineren Dosen nimmt man vorsichtshalber an, dass dieser *Risikofaktor* weiter gilt und es keine Schwelle gibt, unter welcher die Auswirkungen der Bestrahlung gleich Null wären. Der Risikofaktor bedeutet konkret, dass zum Beispiel 4,1 zusätzliche Krebstodesfälle zu erwarten sind, wenn 1000 Personen mit *100 Millisievert* bestrahlt werden.

Auf der Basis des oben genannten Risikofaktors wurden international die Dosislimiten für vom Menschen verursachte Strahlung festgelegt. (Davon ausgeschlossen sind die Belastungen durch medizinische Anwendungen und die natürliche Strahlung.) Sie betragen seit 1990 *20 Millisievert* (mSv) pro Jahr für die aus beruflichen Gründen strahlenexponierten Personen und 1 mSv pro Jahr für die allgemeine Bevölkerung.

Die durch Kernkraftwerke verursachte Strahlendosis ist erheblich kleiner als alle anderen Strahlenbeiträge und auch kleiner als die örtlichen oder zeitlichen Schwankungen der gesamten Strahlenexposition. Sie kann daher kaum für eine medizinisch relevante Belastung, wie zum Beispiel ein erhöhtes Kinderleukämierisiko in der Umgebung von Kernkraftwerken, verantwortlich sein.

Kinderleukämie und ihre Ursachen

In der Schweiz erkranken jährlich etwa zwischen 50 und 60 Kinder an Leukämie. Dies entspricht 5 neuen Erkrankungen pro 100'000 Kindern unter 15 Jahren. Weltweit sind jedes Jahr einige tausend Kinder betroffen. Statistiken zeigen über die letzten 30 Jahre eine geringe Zunahme der Leukämiehäufigkeit bei Kindern.

Kinder können in jedem Alter an Leukämie erkranken. Am häufigsten betroffen ist jedoch die Altersgruppe zwischen dem 2. und dem 5. Lebensjahr. Knaben erkranken etwas häufiger als Mädchen. Ohne Behandlung verläuft die Krankheit tödlich. Aufgrund der modernen *Chemotherapie* konnte die Heilungsrate in den vergangenen Jahren drastisch verbessert werden: 4 von 5 Kindern mit *akuter lymphatischer Leukämie* werden heute langfristig geheilt.

Die genaue Ursache der Leukämieerkrankung bei Kindern kennt man nicht. Man weiss aber, dass Vorstufen einer Leukämie bereits schon vor Geburt auftreten können, möglicherweise durch Genveränderungen in unreifen weissen Blutzellen. Nach der Geburt können diese vorgeschädigten weissen Blutzellen weitere Veränderungen erleiden. Wahrscheinlich spielen dabei Infektionen in sehr frühem Alter eine Rolle, die in den veränderten Blutzellen zusätzliche Ausreifungsstörungen hervorrufen. Werden diese weissen Blutzellen vom Körper selbst nicht zerstört, kann aus ihnen eine Leukämie entstehen.

Epidemiologische Studien

Epidemiologie ist das Studium von Krankheiten in ganzen Bevölkerungsgruppen. Dazu werden vorhandene statistische Zusammenstellungen ausgewertet und manchmal auch grössere Umfragen bei Patienten und Spitälern organisiert. Ergeben sich im Zusammenhang mit einer vermuteten Ursache Zahlenverhältnisse, die nicht mehr durch Zufall erklärt werden können, so kann dies mit dem Krankheitsgeschehen zusammenhängen, ist aber keineswegs ein endgültiger Beweis dafür.

Eine 2007 in Deutschland veröffentlichte Studie hat einen statistischen Zusammenhang beobachtet zwischen der Entfernung der Wohnung vom nächstgelegenen Kernkraftwerk zum Zeitpunkt der Diagnose und dem Risiko, vor dem 5. Geburtstag an Krebs (bzw. Leukämie) zu erkranken. Diese Relation gilt nur für die ersten 5 Kilometer. Gemäss den Verfassern der Studie – und gemäss der abschliessenden Bewertung durch die deutsche Strahlenschutzkommission – kann aufgrund des aktuellen strahlenbiologischen und *epidemiologischen* Wissens die von deutschen Kernkraftwerken im Normalbetrieb emittierte *ionisierende* Strahlung grundsätzlich nicht als Ursache interpretiert werden. Ob andere Faktoren beim beobachteten Abstandstrend eine Rolle spielen, konnte mit dieser Studie nicht abschliessend geklärt werden.

Eine Erklärung für die teilweise höhere Häufigkeit von Kinderleukämie in der Nähe von Kernkraftwerken könnte die Bevölkerungsdurchmischung sein. Kernkraftwerke stehen häufig in ländlichen Gebieten. Neuzuzüger vermischen sich mit der ansässigen Bevölkerung und schleppen Erreger ein. Dieses Phänomen ist aus andern Orten und Epochen bekannt.

Beurteilungen und Folgerungen

Die Gesamtheit der weltweit erstellten Studien zeigt, dass ein erhöhtes Leukämierisiko in der Nähe von Kernkraftwerken keine generell gültige Aussage ist. An den meisten Kraftwerkstandorten war entweder nie eine Häufung von Leukämiefällen feststellbar, oder sie liess sich bei weiterer Beobachtung nicht bestätigen. An einzelnen Standorten sind vermehrt Krankheitsfälle aufgetreten, doch deren absolute Anzahl liegt in einem Bereich, der sich auch bei anderen Risiken findet.

2 Einleitung

Kinderleukämie und Kernkraftwerke – (K-)Ein Grund zur Sorge?

Die Kinderleukämie ist eine lebensbedrohliche Krankheit. Sie trifft am häufigsten Kinder im Alter zwischen 2 und 5 Jahren. Ursachen oder Faktoren, welche die Krankheit auslösen können, sind noch nicht abschliessend erforscht. Die damit einhergehende Unsicherheit lässt einigen Raum für Spekulationen. So vermutet die Ursachenforschung unter anderem, dass *elektromagnetische Felder*, die durch Hochspannungsleitungen oder Antennen erzeugt werden, eine Rolle spielen könnten. Aber auch chemische Substanzen und andere Faktoren werden als mögliche Krankheitsursachen genannt. Verschiedene Studien sind diesen Zusammenhängen nachgegangen, ohne eine hinreichende Beweiskraft zu liefern.

Eine weitere Vermutung lautet, Kernkraftwerke (KKW) und die von ihnen ausgehende Strahlung seien für die Entstehung von Kinderleukämie verantwortlich. Für Aufsehen sorgte zuletzt eine Studie zu dieser These aus Deutschland, die Ende 2007 veröffentlicht wurde. Auch in den Schweizer Medien wurden zum Teil beängstigende Berichte publiziert. Politische Vorstösse im eidgenössischen Parlament sowie die Lancierung einer Schweizer Studie zu diesem Thema (CANUPIS-Studie) waren die Folge. Ist diese Verunsicherung der Politik begründet? Sind die Sorgen und Ängste auf Seiten der Bevölkerung gerechtfertigt? Was weiss man heute über die Entstehung der Kinderleukämie und zu welchen Ergebnissen kommen die hierzu erschienenen Studien? Dies sind die Fragen, welche die vorliegende Broschüre beantworten möchte.

Objektive Darstellung der Ergebnisse

Das «Forum Medizin und Energie» (FME) beschäftigt sich seit mehr als 25 Jahren mit Themen an der Schnittstelle von Energie und Gesundheit. Das FME hat sich zum Ziel gesetzt, die Bevölkerung und die Politik auch über umstrittene Fragen objektiv und ausgewogen zu informieren. Aus diesem Grund hat der Vorstand des FME Anfang 2008 beschlossen, eine Arbeitsgruppe einzusetzen, die das Thema Kinderleukämie und Kernkraftwerke grundlegend aufarbeitet und die Ergebnisse in einer umfassenden Dokumentation verständlich darlegt. Denn das FME vertritt die Meinung, dass die Öffentlichkeit und alle interessierten Kreise ein Recht auf eine objektive und sachliche Information haben.

Dass dies nicht immer gelingen will, liegt zum Teil daran, dass die Debatte über einen möglichen Zusammenhang zwischen der Entstehung von Kinderleukämie und Kernkraftwerken nicht im luftleeren Raum geführt wird, sondern vor einem real- und energiepolitischen Hintergrund. Konkret geht es um die Frage, ob die Kernenergie ein Teil der Energieversorgung bleiben soll oder nicht. Wie in politischen Auseinandersetzungen üblich, werden auch hier Argumente zugespitzt formuliert oder nicht objektiv dargestellt. Nicht selten wird die These, Kernkraftwerke seien für Kinderleukämie verantwortlich, im Kampf gegen die Kernenergie verwendet. Ob und wie weit dieses Argument jedoch stichhaltig ist, verdient jenseits des politischen Streits eine fundierte und objektive Betrachtung. Schliesslich geht es um die Gesundheit der Kinder.

Aufbau der Broschüre

Ziel der vorliegenden Broschüre ist es, die Leserinnen und Leser in die Lage zu versetzen, sich ein eigenständiges Urteil zu diesem Thema bilden zu können. Dafür ist einiges Vorwissen erforderlich, das die Broschüre in gefaffer Form in den ersten 3 Kapiteln vermitteln möchte.

Das folgende dritte Kapitel beginnt mit einem Blick auf die Geschichte und dem für den heutigen Betrachter recht sorglosen Umgang mit Radioaktivität und *ionisierender* Strahlung während der «Pionierzeit» zu Anfang des 20. Jahrhunderts. Auf die Atombombenabwürfe in Japan am Ende des Zweiten Weltkriegs folgte eine langjährige Untersuchung zu den Auswirkungen der *ionisierenden* Strahlung auf die Überlebenden, die noch immer andauert. Auch das Unglück von Tschernobyl kostete Menschenleben und wird aufgrund der Folgeschäden bei mehreren tausend Überlebenden der Katastrophe vermutlich zu einem frühzeitigen Tod führen. Die aus den tragischen Ereignissen gewonnenen Erkenntnisse, aber auch zahlreiche andere Untersuchungen liessen ein relativ klares Bild über die Wirkung von *ionisierender* Strahlung entstehen.

Kapitel 4 erklärt, was *ionisierende* Strahlen oder Radioaktivität eigentlich sind, wie sie wirken und wie sie gemessen werden können. Diesen Strahlen sind wir ständig ausgesetzt, ja radioaktive Substanzen sind sogar im menschlichen Körper selbst vorhanden. Die Dosis bestimmt das Risiko einer strahlenbedingten Erkrankung oder genetischen Missbildung. Ausserdem werden die Grundsätze der Schweizer Strahlenschutz-Gesetzgebung beschrieben.

Das fünfte Kapitel ist allein dem Thema Kinderleukämie gewidmet. Es erklärt zunächst die Krankheit und ihre Symptome, bevor der aktuelle Stand der Forschung zu den möglichen Ursachen und bislang bekannten Risikofaktoren zusammengefasst wird. Zuletzt wird die aktuell geläufigste Erklärung für die Entstehung von Leukämie dargelegt.

Mit diesem Vorwissen ausgestattet, ist der Leser in der Lage, sich dem Hauptthema der Broschüre zuzuwenden: Besteht ein höheres Risiko für Kinder, die in der Nähe eines Kernkraftwerkes oder einer Kernanlage wohnen, an Kinderleukämie zu erkranken? Zur Beantwortung dieser Frage stellt das sechste Kapitel hierzu veröffentlichte *epidemiologische Studien* vor. Die Ende 2007 publizierte Studie aus Deutschland steht dabei im Mittelpunkt, während weitere *epidemiologische Studien* der letzten 30 Jahre zusammengefasst werden. Weiterhin widmet sich das Kapitel den sogenannten *Metastudien* und der Frage, welche Schlussfolgerungen aus ihnen zu ziehen sind. Das sechste Kapitel schliesst mit einem Resümee, was *epidemiologische Studien* mit Nicht-Kernkraftwerk-Fokus bislang an Ergebnissen geliefert haben.

Das siebte und letzte Kapitel schliesslich fasst die Ergebnisse zusammen und nimmt eine Beurteilung vor. Die Schlussbetrachtung enthält auch die Bewertung der Ergebnisse aus der Sicht der Arbeitsgruppe.

Fach- oder Fremdwörter im Text werden in einem Glossar im Anhang erläutert. Zudem findet sich dort ein weiterführendes Literatur- und Studienverzeichnis, das dem interessierten Leser eine vertiefende Beschäftigung mit dem Thema erlaubt.

3 Strahlendosen und Leukämie – Erkenntnisse aus der Geschichte

3.1 Die Pionierzeit der Röntgenstrahlen

1895 entdeckt der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen neue durchdringende Strahlen, die er X-Strahlen nennt. Als Beweis seiner Entdeckung publiziert er das Röntgenbild der Hand seiner Frau – eine Sensation in den Augen der Zeitgenossen. Danach schreitet die Entwicklung sehr schnell voran: Nur wenige Monate später, im März 1896, entdeckt Henri Becquerel ähnliche Strahlen, die aus dem *Uran* stammen. Im Jahr darauf werden in einigen Spitälern die ersten *Radiographien* vom menschlichen

Brustkorb realisiert. 1898 entdecken Marie und Pierre Curie das *Radium*. Nun spricht man zum ersten Mal von «Radioaktivität». Die Begeisterung der Wissenschaftler ist gross. Jeder bastelt seine improvisierte Röntgenröhre und *radiographiert* alle möglichen Gegenstände. Es werden öffentliche Veranstaltungen durchgeführt, bei denen das Publikum *Radioscopien* live bewundern kann. Auf Jahrmärkten gibt es Stände, wo man die verschiedensten Objekte zum *Fluoreszieren* bringt. Auch wird demonstriert, wie metallische Gegenstände, die eine Person in ihrer Tasche trägt, entdeckt und identifiziert werden können.

Leichtfertiger Umgang mit Strahlen

Die rudimentären Röntgenanlagen verursachen gewaltige Strahlendosen, was aber vorläufig niemanden kümmert. Zwar beobachtet man schon früh, dass Strahlung zu Hautrötungen führt, und spricht vom sogenannten «Röntgenbrand». Auch Haarausfall gilt bald als ein Indikator für hohe Strahlenexposition: Je höher die Hautdosis, desto länger dauert es, bis die Haare wieder nachwachsen. Ab dem Jahr 1905 schliesslich beginnt man zu vermuten, dass auch gewisse Todesfälle von der Strahlung verursacht worden sein könnten.

Danach schreitet der Fortschritt langsamer vorwärts. Erst 1928 erscheint der erste *Geiger-Müller-Zähler*. Damit beginnt die Strahlung quantitativ messbar zu werden. Im gleichen Jahr wird die ICRP (International Commission on Radiological Protection) gegründet. Seit 1928 weiss man zudem aus Untersuchungen an der Taufliege *Drosophila*, dass *ionisierende* Strahlung auch *Mutationen* auslösen kann. Die Befürchtung, dass eine Bestrahlung des Körpers durch *ionisierende* Strahlung auch Spätwirkungen haben könnte, verstärkt sich und resultiert in der Forderung, einen Dosisgrenzwert einzuführen. Aber erst im Jahr 1934 empfiehlt die US-Behörde für Strahlenschutz (U.S. National Committee on Radiological Protection, NCRP) einen Grenzwert von *1 Millisievert pro Tag* – erstaunlich grosszügig, wenn man dies mit den heute gültigen Limiten von 20 bzw. *1 Millisievert pro Jahr* vergleicht.

Strahlentherapie zur Bekämpfung von Krankheiten

Die Euphorie hält dennoch an. *Ionisierende* Strahlen sollen, so war man damals überzeugt, zur Bekämpfung der unterschiedlichsten Krankheiten nützlich sein: Gegen Krampfadern werden mit *Radium* imprägnierte Socken getragen, bei Husten hilft angeblich das Inhalieren von *Radon*, und Arthrose-Schmerzen lassen sich mit einer Bestrahlung der Gelenke lindern.

Eine besonders interessante Patientengruppe aus der damaligen Zeit – jene mit *Spondylitis ankylosans (Morbus Bechterew)* – bildet heute die Basis für eine seriöse und erfolgreiche *epidemiologische* Studie. Die *ankylosierende*

Spondylitis ist eine chronische Entzündung der Wirbelsäule. Sie ist schmerzhaft und führt allmählich zu einer deformierenden Versteifung der ganzen Wirbelsäule. Eine Bestrahlung der erkrankten Region lindert eindeutig die Symptome. Die Bestrahlungen fanden in den Jahren 1935 bis 1944 statt, sie sind gut dokumentiert und umfassen eine grosse Anzahl an Patienten (14'106). Die Krankheitsgeschichte der behandelten Personen wurde ausserordentlich lange dokumentiert, fast 50 Jahre über die Strahlentherapie hinaus – ideale Voraussetzungen also für eine *epidemiologische* Studie (Darby et al. 1987).

Die Resultate dieser Studie sind eindeutig: *Ionisierende* Strahlen erhöhen nach einer gewissen *Latenzzeit* die Wahrscheinlichkeit für eine Krebserkrankung. Diese *Latenzzeit* beträgt etwa 3 bis 6 Jahre für Leukämie und 10 bis 20 Jahre für solide Tumoren. Die Wahrscheinlichkeit für eine durch Strahlen ausgelöste Krebserkrankung steigt proportional zur Strahlendosis. Dies konnte anhand der Studie erstmals quantifiziert werden. Der eruierte Risikofaktor bestätigte sich später in der Hiroshima-Nagasaki-Studie (*siehe Kapitel 3.2*).

Erkenntnisse münden in Strahlenschutz

Etwa um 1970 herrschte endlich Klarheit über den Unterschied zwischen den kurzfristigen *deterministischen* Auswirkungen einer Bestrahlung, die erst oberhalb eines bestimmten Schwellenwerts auftreten, und den langfristig erscheinenden probabilistischen Risiken, für die es vermutlich keine Dosis-Schwelle gibt. Bei den strahlenbedingten *deterministischen* Auswirkungen (zum Beispiel Organschäden und Verbrennungen) nimmt die Schwere des Schadens proportional zur Dosis zu. Bei den sogenannten probabilistischen Auswirkungen (zum Beispiel Krebs, Leukämie, oder genetische Missbildungen bei den Nachkommen einer bestrahlten Person) nimmt dagegen die Eintretenswahrscheinlichkeit proportional zur Dosis zu. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde der moderne Strahlenschutz auf einer soliden Basis aufgebaut.

Folkloristische und nachweisbar nutzlose Anwendungen der Röntgenstrahlen konnten nun als nicht gerechtfertigt verboten werden. So verschwanden z. B. die «Pedoskope», die noch in den 60er-Jahren in jedem Schuhgeschäft zu finden waren, und mit deren Hilfe man seine Zehen im Schuh und der passenden Schuhgrösse bewundern konnte. Diese Geräte verursachten effektive Dosen von etwa 10 bis 20 mSv/Minute und waren für Kinder eine beliebte, aber gefährliche Attraktion.

Quellen

- Darby S., Doll R., Gill SK et al. (1987). Long term mortality after a single treatment course with X-rays in patients treated for ankylosing spondylitis. *British Journal of Cancer*, Volume 55, Seite 179–190.
- Darby S., Nakashima E. and Kato H. (1985). A parallel analysis of cancer mortality among atomic bomb survivors and patients with ankylosing spondylitis given X-ray therapy. *Journal of the National Cancer Institute*, Volume 75, Seite 1–21.
- ICRP Publikationen 22 (1973), 26 (1977), 60 (1991) und 103 (2007).

3.2 Hiroshima und Nagasaki

Das Ende des Zweiten Weltkriegs im Pazifik wurde durch den Abwurf zweier Atombomben auf die japanischen Städte Hiroshima (6.8.1945) und Nagasaki (9.8.1945) wesentlich mitbestimmt. Die meisten Opfer starben augenblicklich durch die verheerenden Wirkungen der schwallartigen Hitzewelle. Viele kamen kurz darauf ums Leben, als die enorme Druckwelle der Explosion Gebäudetrümmer mit sich riss und Menschen darunter begrub. Es folgte ein gewaltiger Feuersturm, der die grösstenteils aus Holzhäusern bestehenden Städte Hiroshima und Nagasaki einen ganzen Tag lang brennen liess. Bis zu 2 Kilometer vom *Epizentrum* entfernt war das Leben zu 90% ausgelöscht. Viele Menschen aus dieser zentralen Region starben nach ca. 2 bis 3 Wochen an einer akuten Strahlendosis (*Gammastrahlen und Neutronen*). Erst nach einigen Monaten war die gewaltige Todeswelle vorbei. Sie forderte in Hiroshima und Nagasaki zusammen etwa 130'000 Menschenleben. In etwas grösserer Distanz zu den *Epizentren* gab es zwar viele Überlebende, die von den thermischen und mechanischen Auswirkungen der Explosion wenig oder gar nicht betroffen waren, die aber eine nicht vernachlässigbare Strahlendosis aufgenommen hatten. Diese Überlebenden der Katastrophe nennt man «Hibakusha».

Umfangreiche Studie zu Überlebenden

Im Jahr 1950, im Rahmen des amerikanisch-japanischen Projekts für den Wiederaufbau Japans, wurde die grösste *epidemiologische* Studie aller Zeiten («The Life Span Study») in die Wege geleitet. Sie umfasst 86'572 Hibakushas, die sorgfältig registriert wurden. Zu den Personalien jedes Hibakusha gehörte vor allem sein genauer Standort zum Augenblick der Explosion unter Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten, die ihn möglicherweise geschützt hatten. Aus dieser Information wurde mit grossem Aufwand die Strahlendosis (*Gamma und Neutronen*) jedes Hibakusha

ermittelt und 7 Dosiskategorien festgelegt. Die erste Kategorie umfasst 37'458 Hibakushas mit einer Dosis kleiner als 5 mSv. Sie bildet die Null-Dosis-Gruppe, auf die alle statistischen Berechnungen referieren. Die übrigen 49'114 Hibakushas bilden die Gruppe der bestrahlten Personen, die nochmals in 6 Dosis-Kategorien unterteilt wurden. Die durchschnittliche Dosis der bestrahlten Hibakushas beträgt etwa 200 mSv (0,2 Sv). Seither verfolgt man diese *Kohorte* aufmerksam und registriert *Krebsinzidenz* und Todesursache. Die «Life Span Study» (LSS) ist noch immer aktiv und publiziert ca. alle 5 Jahre den Stand der *Kohorte*; sie soll bis zum Tod des letzten Hibakusha fortgesetzt werden. Die Personengruppe ist inzwischen 63 Jahre älter geworden, etwa die Hälfte ist bereits verstorben.

Die mittlere strahlenbedingte Lebensverkürzung der Hibakushas beträgt im unteren Dosisbereich 2 Monate, im oberen Dosisbereich 2,6 Jahre. Bis heute starben ca. 10'000 Hibakushas an Krebstumoren, von denen statistisch 440 direkt der Strahlungsursache zugeordnet werden können. In derselben *Kohorte* starben bislang 176 Personen an Leukämie, 78 davon gehen auf die Strahlenbelastung zurück. Da die exakte Registrierung der Todesursachen erst einige Jahre nach 1950 tatsächlich lückenlos und dauerhaft funktionierte, hat die LSS die Erfassung des grössten Anteils an Kinderleukämien offensichtlich verpasst.

Erhöhtes Krebsrisiko aufgrund der Strahlen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in Hiroshima und Nagasaki innerhalb kurzer Zeit insgesamt 130'000 Personen ums Leben gekommen sind. In einer Zeitspanne von etwa 50 Jahren starben nochmals ca. 500 Personen an strahlenbedingten Spätschäden, was im Durchschnitt 10 Fälle pro Jahr ausmacht.

Auf der Basis der LSS und der *epidemiologischen* Studie der *Morbus-Bechterew-Patienten* konnte das Ausmass des strahlenbedingten Krebsrisikos erfasst werden (*siehe Kapitel 3.1*). Es beträgt demzufolge ca. 5 bis 10% pro Sievert, das heisst 1 bis 2% pro 0,2 Sv (= die mittlere Dosis der 49'114 bestrahlten Hibakushas). 1 bis 2% von 49'114 bedeuten rund 500 bis 1'000 zusätzliche Krebsfälle, die auf die Strahlung zurückzuführen sind. Tatsächlich beträgt diese Zahl bis jetzt 440 Krebstumoren + 78 Leukämien = 518. Die Hälfte der *Kohorte* ist noch am Leben.

Quellen

- Pierce D.A. and Preston D.L. (2000). Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. *Radiation Research*, Volume 154, Seite 178–186.
- Preston D.L. et al. (2003). Studies of mortality of atomic bomb survivors, Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality: 1950–1997. *Radiation Research*, Volume 160, Seite 381–407.

- Preston D.L. et al. (1994). Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987. Radiation Research, Volume 137, Seite 68–97.

3.3 Tschernobyl

Am 26. April 1986 um 1:23 Uhr explodierte der Reaktor vom Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl im Norden der Ukraine. Dieser Reaktor vom russischen Typ RBMK wies einige Sicherheitsmängel und sogar Konstruktionsfehler auf. Er wäre in allen westlichen Ländern nicht lizenzierbar. Zudem war die Mannschaft ungenügend ausgebildet und unternahm ein sehr gewagtes Experiment. Aufgrund der Explosion wurde das Dach des Gebäudes weggeschleudert und der Reaktor brannte. Enorm viele heisse, radioaktive Gase und *Aerosole* wurden in die Atmosphäre freigesetzt. Ein Grosseinsatz an Feuerwehrmännern konnte zwar die in der Folge ausgelösten Brände löschen, nicht jedoch den *Graphitbrand* im Zentrum der Kernbrennstoff-Trümmer. Der *Graphitbrand* dauerte 14 Tage. In dieser Zeit änderten sich die Windverhältnisse mehrmals, so dass die radioaktiven Wolken in fast alle Himmelsrichtungen gestreut wurden.

Die Bevölkerung der umliegenden Ortschaften hatte Glück im Unglück: Die radioaktiven Gase stiegen 1 bis 3 km hoch in die Atmosphäre. Die Strahlendosen der lokalen und regionalen Bevölkerung waren daher wesentlich geringer als befürchtet. Allerdings konnten sich die radioaktiven Substanzen über weite Distanzen verbreiten.

Einsatzkräfte riskierten ihr Leben

Nach dem Unfall wurde mit enormem Personal- und Materialaufwand eine dicke Abschirmung rund um den Block 4 gebaut sowie eine Dachkonstruktion improvisiert, die man «Sarkophag» nannte. Diese Einsatzkräfte mussten bereits nach kurzer Zeit wegen der aufgenommenen Strahlendosis abgelöst werden – zuerst nach einigen Minuten, später nach einigen Stunden und noch später nach einigen Tagen. Die meisten der an diesem riskanten Unternehmen beteiligten sogenannten «Liquidatoren» waren Soldaten. Man schätzt, dass insgesamt etwa 200'000 bis 600'000 Liquidatoren eingesetzt wurden.

In der 30-km-Zone (Sperrgebiet) wurden am zweiten Tag rund 120'000 Menschen evakuiert und anschliessend umgesiedelt. Einige Jahre später wurden nochmals 220'000 Personen aus bürokratischen und politischen Gründen umgesiedelt. Landwirtschaft wurde in einem Gebiet von ca. 7'000 km² verboten. Insgesamt waren rund 7 Millio-

nen Menschen von den Folgen der Katastrophe betroffen, entweder direkt durch die radioaktive Wolke oder indirekt durch den Konsum von *kontaminierten* Lebensmitteln. Bei rund 95% dieser Personen blieb die Strahlendosis aber im Bereich einer Verdoppelung der natürlichen Untergrund-Dosis.

Gesundheitliche Folgen der Katastrophe

Das Gesamtbild der gesundheitlichen Auswirkungen dieser Katastrophe bleibt lückenhaft. So wurden keine gross angelegten *epidemiologischen* Studien durchgeführt, und die Aussagen der Ärzte zu den beobachteten Krankheitsfällen bleiben widersprüchlich.

In den ersten 24 Stunden waren ca. 500 Personen (Feuerwehreute, Notfallarbeiter) darum bemüht, Brände zu löschen und hochradioaktive Trümmer zu beseitigen. Von diesen ersten Einsatzpersonen erlitten 134 eine akute Strahlenkrankheit, 28 starben noch in den folgenden 2 bis 3 Wochen.

Einige Liquidatorengruppen, die zwar hohe Strahlendosen erhielten, aber nicht akut erkrankten, wurden medizinisch beobachtet. Erwartungsgemäss stellte man bei ihnen ein leicht erhöhtes Vorkommen folgender Erkrankungen fest: Leukämie, Katarakt (grauer Star) und *kardiovaskuläre Erkrankungen*, bislang jedoch keine soliden Tumoren.

Die auffälligste gesundheitliche Folgewirkung dieser Katastrophe ist Schilddrüsenkrebs bei Kindern. Der kausale Zusammenhang zwischen der Aufnahme von Radio-Jod (vor allem über den Konsum von Milchprodukten) und dem erhöhten Schilddrüsenkrebsrisiko bei Kindern ist eindeutig. Da Jod als seltenes Element für die Produktion von Schilddrüsenhormonen notwendig ist, wird es in diesem Organ 25- bis 200-fach angereichert und gespeichert. Damit ergibt sich bei einer Verseuchung mit radioaktivem Jod eine lokal wesentlich höhere Strahlenwirkung als mit anderen radioaktiven Substanzen. Etwa 5'000 Erkrankungen an Schilddrüsenkrebs sind auf das radioaktive Jod zurückzuführen. Zum Glück kann diese Krebsart mit etwa 99% Erfolgchancen geheilt werden. Tatsächlich starben bis heute erst 9 der betroffenen Jugendlichen an dieser Erkrankung.

Bezüglich der Leukämieerkrankungen wurde ein leichter Anstieg der *Inzidenz* beobachtet, der aber bei der Gesamtbevölkerung nicht signifikant war. Innerhalb verschiedener Gruppen von Liquidatoren ist jedoch das Leukämierisiko deutlich gestiegen. Bei den Kindern kam es zu einem leichten Anstieg, der aber nicht in Zusammenhang mit dem Grad der *Bodenkontamination* gebracht werden konnte.

Bei den Frauen stieg nach einer sehr langen *Latenz* (15 bis 20 Jahre) das Brustkrebsrisiko deutlich. Dieser Zuwachs kann nur zum Teil mit den Auswirkungen von Tschernobyl in Beziehung gebracht werden. Nach dem Unglück wurden die medizinische Versorgung und damit die Diagnose-Möglichkeiten deutlich verbessert.

Missbrauch der staatlichen Entschädigungen

Der allgemeine Gesundheitszustand der Bevölkerung dieser Region – sei es in Russland, in der Ukraine oder in Weissrussland – ist schlecht, die Lebenserwartung beträgt kaum mehr als 60 Jahre. Die medizinische Betreuung ist rudimentär, das IKRK berichtet beispielsweise von einem Regionalspital ohne fliessendes Wasser. Die miserable gesundheitliche Versorgung in dieser Region Osteuropas hat sich in den letzten Jahren nicht wesentlich verbessert.

Für die Liquidatoren und Opfer des Reaktorunfalls wurden staatliche Entschädigungen in der Form von lebenslangen Renten oder Privilegien eingeführt und werden auch noch heute regelmässig bezahlt. Der offizielle Status «Liquidator» oder «Opfer» ist daher noch immer sehr begehrt und wurde leider oft auch von vielen nicht betroffenen Personen über Beziehungen oder Korruption erworben. Zudem gelang es verblüffend vielen Liquidatoren, gleich 2-mal registriert zu werden und damit eine doppelte Rente zu beziehen. So kommt es, dass heute etwa 7 Millionen Personen zu Subventionen oder Privilegien berechtigt sind, obwohl schätzungsweise maximal 400'000 Menschen bestrahlt wurden.

Folgeschäden sind schwer einzuschätzen

Unter all diesen Umständen lässt es sich nur äusserst schwierig abschätzen, welche Erkrankungen und Todesfälle tatsächlich der Strahlenbelastung von Tschernobyl zuzuordnen sind. Eine Prognose der Todesfälle ist schwierig. Schätzungen schwanken zwischen 4'000 und 9'000 Todesfällen. In Anbetracht des Ausmasses dieser Katastrophe erscheint diese Zahl erstaunlich klein. Eine Begründung hierfür mag in der ohnehin kurzen Lebenserwartung der Bevölkerung liegen, die hauptsächlich auf Alkohol und Nikotin zurückzuführen ist, d.h., viele Menschen sterben, bevor sich der strahleninduzierte Krebs überhaupt manifestieren kann.

Der Hauptschaden dieser Katastrophe ist jedoch psychosozialer und psychosomatischer Art. Ein grosser Teil der Bevölkerung lebt in der Dauerangst vor Krebs und leidet demzufolge unter Stresssymptomen (Apathie, Depression, Müdigkeit). Auch wurde von einer erhöhten Selbstmordrate berichtet. Die evakuierten und umgesiedelten Bevölkerungsgruppen werden wie Aussätzige behandelt und leben in Ghettos. Die neue Generation will nicht in der Region bleiben und wandert aus.

Die durch den Grossunfall von Tschernobyl in Mitteleuropa verursachten Strahlendosen blieben niedrig und bewegten sich innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition. Die höchste Strahlendosis erfuhren die Selbstversorger der *Hot-Spot-Gebiete*, bei denen vorübergehend eine Verdopplung der natürlichen Strahlenexposition nachweisbar war. Zum Vergleich: In Indien, Brasilien, China und dem Iran gibt es Gegenden, in denen der natürliche Strahlenuntergrund zwar sehr hoch ist – er liegt bis zu 10-mal oberhalb des üblichen Pegels – , wo aber dennoch keine erkennbaren Gesundheitsschäden beobachtet werden können. Die dortige Bevölkerung ist demzufolge mehr strahlenexponiert als 95% der offiziellen «Opfer» von Tschernobyl.

Quellen

- Cardis E. et al. (2006). The Cancer Burden from Chernobyl in Europe. International Agency for Research in Cancer (IARC) and World Health Organisation (WHO).
- Internationale Länderkommission Kerntechnik (ILK) (2006). Stellungnahme zu den Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl – Eine Bestandesaufnahme nach 20 Jahren. ILK-26, www.ilk-online.org.
- Strahlenschutzkommission (SSK) des BMU, Heft 50 (2006). 20 Jahre nach Tschernobyl – Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes. Hoffmann-Fachverlag, Berlin; ISBN 3-87344-127-6.
- The Chernobyl Forum 2003 – 2005 (2006) (IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. Printed by IAEA.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000 Report), Volume II: Effects. Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident.
- World Health Organisation, WHO (2005). Health Effects of the Chernobyl accident and special health care programmes.

4 Wirkung von Strahlen und Schutzmassnahmen

4.1 Ionisierende Strahlen, ihre Messung und ihre biologische Wirkung

Radioaktive Substanzen kommen entweder in der Natur vor – z.B. in Form von *Uran*, *Thorium*, *Radium*, *Radon*, Kalium-40 etc. – oder sie werden künstlich in einem Kernkraftwerk oder in einem Beschleuniger erzeugt. Diese Substanzen sind instabil und senden während ihres Zerfalls Strahlen aus (*Alpha-*, *Beta-* und/oder *Gammastrahlen*), um einen stabileren Zustand zu erreichen. Solche Strahlen sind energetischer als Licht und UV-Strahlung und können in den Molekülen der Materie Elektronen-Verbindungen brechen (Ionisation) und die Anordnung der Atome im Molekül verändern. Wenn diese Prozesse die Erbsubstanz betreffen, kann eine *Mutation* die Folge sein. Die Strahlendosis, die einen Bezug zum Ausmass dieser Schäden in der Materie erlaubt, wird in der Energiemenge (Joule) pro Masseinheit der bestrahlten Materie (kg) gemessen. Massgebend für den Schaden ist primär die Ionisationsenergie und nicht die Art der radioaktiven Substanz, welche die Strahlung aussendet. Die diversen Geräte, welche die Dosis messen, heissen *Dosimeter*. Eine absorbierte «Energiedosis» von 1 Joule/kg wird 1 Gray genannt.

Chemische Modifizierung von Zellen

In der Strahlentherapie, bei der es darum geht, Krebszellen abzutöten, werden sehr hohe Dosen in der Grössenordnung von total 50 bis 60 Gray auf den Tumor gerichtet. Im Bereich der kleinen Strahlendosen (weniger als 0,1 Gray = 100 Milligray) werden die Zellen nicht getötet, sondern chemisch modifiziert. Während geschädigte *Enzyme* oder *Zellorganellen* einfach abgebaut und durch neue ersetzt werden können, bleiben die Modifikationen der *Nukleinsäuren* als Träger der Erbinformation bestehen. Deren Modifikationen werden aber von der getroffenen Zelle entdeckt und meistens repariert. Es gibt jedoch eine kleine Wahrscheinlichkeit dafür, dass diese Reparatur nicht richtig gelingt. Damit entsteht eine bleibende *Mutation*. Wenn später diese bereits mutierte Zelle so oft getroffen wird, dass sie sich nicht mehr reparieren kann, begeht sie

normalerweise den genetisch programmierten Selbstmord (*Apoptose*) oder sie wird von den Nachbarzellen eliminiert. Wenn jedoch alle diese Abwehrmechanismen versagen, kann diese mehrmals mutierte Zelle eine erste Krebszelle werden, die sich vermehrt und einen Tumor oder *Metastasen* zu bilden beginnt.

Die Wahrscheinlichkeit für diese unglückliche Entwicklung hängt unter anderem von der Anzahl der Treffer, d.h. von der Strahlendosis ab. Aber auch die Art der Strahlung spielt hierbei eine grosse Rolle. Eine Bestrahlung durch schwere Teilchen (*Alphastrahlung*, *Protonen*, *Neutronen*) *ionisiert* viel dichter als *Gamma-* oder *Röntgenstrahlen* und kann in der getroffenen Zelle gleichzeitig mehrere Treffer verursachen. Zudem weisen die verschiedenen Organe des Körpers unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber *ionisierenden* Strahlen auf. Am empfindlichsten sind das rote Knochenmark, der Dickdarm, die Lunge und der Magen.

Ermittlung des Risikofaktors

Im Bereich des Strahlenschutzes und damit der tiefen Dosen verwendet man die «effektive Dosis» als Masseinheit für die Wahrscheinlichkeit, dass diese Exposition später zu einem Krebs führt. Die «effektive Dosis» ist die Energiedosis (in Gray) gewichtet einerseits für die Art der Strahlen und andererseits für die Empfindlichkeit der getroffenen Organe. Die «effektive Dosis» wird in Sievert ausgedrückt. Im Falle einer Ganzkörperbestrahlung durch *Gamma-* oder *Röntgenstrahlen* gilt einfach:

$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule/kg.}$$

Die sehr ausführliche *epidemiologische Studie* der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki hat es ermöglicht, das Risiko für eine Krebserkrankung – ausgelöst durch eine Bestrahlung – zu quantifizieren. Der Risikofaktor beträgt ca. 5 bis 10% pro Sievert und gilt ungefähr im Bereich von 3 Sievert bis hinunter zu 0,05 Sv (*50 Millisievert*). Im Bereich der noch kleineren Dosen nimmt man vorsichtshalber an, dass dieser Risikofaktor weiter gilt und dass es keine Schwelle gibt, unter welcher die Auswirkungen der Bestrahlung gleich Null wären. Viele Wissenschaftler vertreten aber die These, dass im Bereich der sehr kleinen Dosen und bei «zeitlich-verdünnter» Bestrahlung die Reparaturmechanismen in der Zelle zu 100% effektiv sind. Somit wäre die Auswirkung solch einer Bestrahlung wirklich unbedeutend.

Der Risikofaktor bedeutet konkret, dass 4,1 zusätzliche Krebstodesfälle zu erwarten sind, wenn 1000 Personen mit *100 Millisievert* bestrahlt werden. Angenommen, die «spontane» Krebstodesrate in dieser Bevölkerung betrage 20%, würde man im Laufe der Zeit ungefähr 204 statt 200 Krebstodesfälle erwarten. Eine so kleine Zunahme

wäre aus statistischen Gründen kaum messbar, da die durch Strahlung verursachten Krebsfälle sich überhaupt nicht von den anderen Krebsfällen unterscheiden.

Auf der Basis des oben genannten Risikofaktors hat die ICRP Dosislimiten für vom Menschen verursachte Strahlung empfohlen. (Davon ausgeschlossen sind die Belastungen durch medizinische Anwendungen sowie durch die natürliche Strahlung.) Sie betragen seit 1990 *20 Millisievert* (mSv) pro Jahr für die beruflich strahlenexponierten Personen und 1 mSv pro Jahr für die allgemeine Bevölkerung.

4.2 Die Strahlenschutz-Gesetzgebung und die Überwachung der Radioaktivität

Zum Schutz vor den schädlichen Auswirkungen der *ionisierenden* Strahlen besteht seit 1928 die «International Commission on Radiological Protection» (ICRP). Ab 1950 gibt die ICRP Empfehlungen heraus, die wissenschaftlich fundiert und weltweit anerkannt sind. Diese internationalen Empfehlungen bilden praktisch in allen Ländern die Basis für die nationale Strahlenschutz-Gesetzgebung.

Im Schweizer Recht wird der Strahlenschutz zum ersten Mal im Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz (1959) erwähnt. Gestützt darauf erschien die erste Strahlenschutz-Verordnung 1963. Die heutige sehr ausführliche Gesetzgebung enthält ein Strahlenschutz-Gesetz (StSG 814.50) und eine zugehörige Verordnung sowie weitere Verordnungen und Richtlinien (StSV 814.501 von 1994, Revision 2008).

Drei Grundsätze des Strahlenschutzes

Der Schutz von Mensch und Umwelt ist auf folgende 3 Grundsätze aufgebaut:

1. Jede Tätigkeit, bei der Menschen einer Strahlenexposition ausgesetzt sind, muss gerechtfertigt sein. Die Rechtfertigung muss zeigen, dass die Vorteile dieser Tätigkeit gegenüber den Nachteilen überwiegen.
2. Die Strahlendosen, die diese Tätigkeit verursacht, müssen so tief wie vernünftigerweise erreichbar gehalten werden. Dies ist das berühmte und erfolgreiche ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable).

3. Die Individualdosen der von dieser Tätigkeit betroffenen Menschen dürfen die entsprechenden Grenzwerte nicht überschreiten. Diese Grenzwerte sind *20 Millisievert* pro Jahr für beruflich strahlenexponierte Personen (das sind nur Erwachsene), und *1 Millisievert* pro Jahr für Personen der allgemeinen Bevölkerung (kleine Kinder und Föten inbegriffen).

Aber die blosse Einhaltung dieser Grenzwerte genügt nicht. Nach Grundsatz Nr. 2 muss der Verursacher einer Strahlenexposition – im Sinne des Vorsorgeprinzips – sich ständig bemühen, die Dosen «ALARA» zu halten. Damit wird berücksichtigt, dass möglicherweise selbst ganz kleine Dosen zu einem biologischen Schaden führen können, auch wenn die Wahrscheinlichkeit hierfür minimal ist.

Schutzmassnahmen für strahlenexponierte Personen

Die beruflich strahlenexponierten Personen müssen ein oder mehrere *Dosimeter* tragen, damit ihre tägliche bzw. monatliche Dosis durch externe Bestrahlung ermittelt und registriert werden kann. Wenn nötig, werden die Räumlichkeiten auf Radioaktivität in der Luft überwacht und die interne Dosis durch Inhalation regelmässig gemessen (Ganzkörpermessungen, Urinalysen).

Jede beruflich strahlenexponierte Person besitzt ein persönliches Dosisdokument, in dem die Buchhaltung ihrer Dosen geführt wird. Das BAG (Bundesamt für Gesundheit) registriert die Daten in einer Datenbank und publiziert jährlich die Statistik der beruflichen Strahlendosen in der Schweiz, inklusive kumulative Lebensalterdosen.

Die Kontrolle der Dosen der allgemeinen Bevölkerung wird durch *Ortsdosimeter*, Messstationen und Laboranalysen von Gras, Erde, Getreide, Milch etc. durch Laboratorien des Bundes, der Hochschulen und der Kantone durchgeführt.

Messstationen überwachen Radioaktivität

Die automatischen Messstationen sind in der Schweiz in 3 Messnetze gruppiert. RADAIR misst die Radioaktivität der Luft und erlaubt es, die Ankunft von radioaktiven Wolken – zum Beispiel nach einer Atomwaffen-Testexplosion irgendwo auf der Erde – früh aufzuspüren. NADAM (ca. 60 Stationen) misst die Orts-Dosisrate im Freien in der ganzen Schweiz. MADUK schliesslich besteht aus 12 bis 18 Sonden in der Nahumgebung (= 5-km-Radius) jedes Kernkraftwerks, die kontinuierlich die lokale Ortsdosisrate messen und sie alle 10 Minuten an die Aufsichtsbehörde und an die Gemeindeverwaltung des Dorfes melden (*Beispiel siehe Abbildung 1*).

Zudem werden die bewilligten geringen Abgaben von Radioaktivität an die Atmosphäre und an den Fluss bzw. das Abwassersystem direkt bei der Quelle gemessen (bei KKW's, Spitälern, Universitäten, der *Tritiumverarbeitungsindustrie* und anderen lizenzierten Laboratorien).

Erwähnenswert ist auch, dass die Schweiz über eine hochempfindliche *aeroradiometrische* Messausrüstung verfügt, die ursprünglich für das Aufspüren von *Uranerz* eingesetzt wurde und die es jetzt beispielsweise ermöglicht, mittels Armeehelikoptern die Trümmer eines abgestürzten Satelliten zu bergen oder verlorene Strahlenquellen zu finden. Mit dieser Ausrüstung wird die Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke regelmässig überwacht.



Abbildung 1: Beispiel für die MADUK-Messstationen um die KKW's Beznau und Leibstadt. Quelle: Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA091379)

Aufsichtsbehörden informieren Öffentlichkeit

Über die Einhaltung der Forderungen der Gesetzgebung berichten jährlich die beauftragten Aufsichtsbehörden (BAG = Bundesamt für Gesundheit, zuständig für den Bereich Medizin und Forschung; ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat für den Bereich Kernanlagen; Suva = Schweizerische Unfallversicherungsanstalt für den Bereich von Handel und Industrie). Bei Vorfällen wird die Öffentlichkeit sofort informiert und der Schweregrad des Ereignisses wird – in Anlehnung an die Richterskala für Erdbeben – auf der Basis der INES-Skala (International Nuclear Event Scale) geschätzt und mitgeteilt. Stufe 1 entspricht einer Betriebsstörung ohne Auswirkung auf die Bevölkerung, Stufe 7 einem katastrophalen Unfall wie in Tschernobyl. Der Diebstahl einer nicht mehr benutzten Radiotherapiequelle in einem Spital würde zum Beispiel mit Stufe 3 bewertet.

4.3 Die mittlere Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung und der Beitrag der KKW's im Vergleich

Der Mensch ist ständig und überall *ionisierender* Strahlung ausgesetzt. Pro Sekunde durchdringen Tausende von schnell fliegenden sub-atomaren Teilchen und *elektromagnetische Wellenpakete* den Körper. Diverse Quellen verursachen ganz unterschiedliche Strahlendosen.

Natürliche Bestrahlung des menschlichen Körpers

Die kosmische Strahlung, die hauptsächlich aus dem Weltall und teilweise von der Sonne (Sonnenwind) kommt, verursacht auf der Höhe des Schweizer Mittellandes eine Dosis von ca. *0,35 Millisievert* pro Jahr (mSv/Jahr). In Höhenlagen (ca. 1800 m ü.M.) beträgt diese Exposition ca. 0,6 mSv/Jahr. Beim Flugpersonal liegt die jährliche Dosis wegen der kosmischen Strahlung deutlich über derjenigen der Bevölkerung. Für Kosmonauten kann bei Sonneneruption die Strahlenexposition akut gefährlich werden.

Die terrestrische Strahlung stammt hauptsächlich aus dem *Uran*, dem *Thorium* und dem *Kalium-40*, die überall als Spuren in der Erdkruste vorhanden sind. *Radium* ist ein *Zerfallsprodukt* des *Urans*, das einen wichtigen Beitrag zur terrestrischen Dosis liefert. Diese ist ortsabhängig, beträgt im Minimum 0,4 mSv/Jahr und erreicht in gewissen Ortschaften der Alpen bis zu 1 mSv/Jahr, weil der Granit mehr *Uran* enthält. In Indien, dem Iran und Brasilien gibt es bevölkerte Regionen, wo die terrestrische Strahlenbelastung noch wesentlich höher ist.

Bestrahlung aus dem Körperinnern

Die *Uranatome* im Boden erzeugen auch das radioaktive Gas *Radon*, das durch die Klüfte des Bodenfelsens diffundiert und sich bis zu Kellerräumen und Parterrewohnungen ausbreitet (siehe Abbildung 2: *Radonkarte* der Schweiz). Die Inhalation von *Radon* führt zu einer *Alpha-Bestrahlung* der Lunge, die umgerechnet bis zu einer effektiven Dosis von 100 mSv/Jahr führen kann. Die mittlere Exposition der Schweizer Bevölkerung beträgt 1,6 mSv/Jahr. Man schätzt, dass *Radon* nach dem Rauchen die zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebs ist.

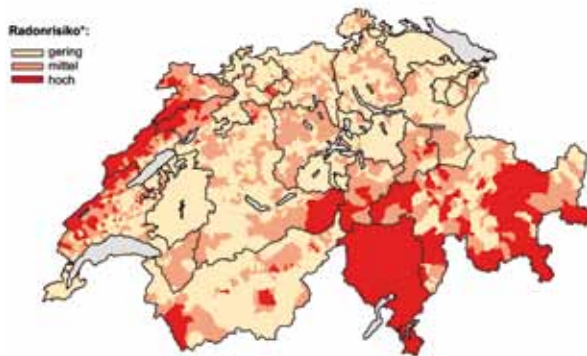


Abbildung 2: Radonkarte der Schweiz.

Stand: März 2009. *Bemerkung: in einigen Gemeinden wird das Radonrisiko aufgrund ungenügender Messungen geschätzt (siehe in der «Suchmaschine nach Gemeinde» unter www.ch-radon.ch).

Quellen: Bundesamt für Gesundheit, GG25 ©Swisstopo

Eine weitere Quelle für die interne Bestrahlung des menschlichen Körpers ist Kalium-40. Dies ist ein natürliches radioaktives Isotop des Kaliums, das durch die Nahrung vom Körper aufgenommen wird und zu seinen Bausteinen gehört. Kalium-40 zerfällt und bestrahlt den Körper von innen. Die jährliche von Kalium verursachte Dosis ist 0,35 Millisievert/Jahr und variiert von Mensch zu Mensch nur wenig.

Strahlenbelastung durch medizinische Anwendungen

Die medizinische Anwendung von Röntgenstrahlen und Radioaktivität führt trotz modernster Geräte zu einem schnell wachsenden Anteil an der gesamten Strahlenbelastung der Bevölkerung. Wir beschränken unsere Darstellung auf die Röntgendiagnose (Radiodiagnostik), da sie einen grossen Teil der Gesamtbevölkerung betrifft. Die Strahlentherapie betrifft nicht die Gesamtbevölkerung, sondern eine kleine Gruppe von erkrankten Personen, die einen direkten therapeutischen Nutzen von der Bestrahlung hat.

Die Schweizer Bevölkerung wird im Durchschnitt 1,3 radiodiagnostischen Untersuchungen pro Jahr ausgesetzt. Eine Radiographie führt zu einer effektiven Dosis von ca. 0,05 bis 5 mSv. Eine Radioskopie oder Computertomographie belastet den Patienten mit etwa 0,5 bis 50 mSv. Im medizinischen Bereich sind die Dosisgrenzwerte in erster Linie für das Personal anzuwenden. In der Diagnose müssen die entsprechenden Methoden so ausgewählt und angewendet werden, dass der Nutzen für den Patienten mögliche Nachteile durch die Strahlenbelastung überwiegt. Dies ist durch den Begriff der Rechtfertigung in der Gesetzgebung verankert. Eine detaillierte Erhebung von 1998 (Aroua et al.) zeigt, dass die mittlere Belastung der Schweizer Bevölkerung aus dem Bereich der Radiodiagnostik 1,2 mSv/Jahr beträgt.

Der Beitrag der KKW im Vergleich

Der Anteil der KKW an der Strahlenbelastung der Bevölkerung ist im Vergleich zu den oben erwähnten Quellen sehr gering. In der Betriebsbewilligung jedes KKW sind für die Abgabe von Radioaktivität an die Umwelt (Emissionen) bestimmte Abgabelimiten festgelegt. Diese sind so berechnet, dass sie die Nachbarbevölkerung unter den ungünstigsten Annahmen in Bezug auf Aufenthaltsort und Herkunft der verzehrten Lebensmittel mit höchstens 0,2 mSv/Jahr belasten können. In Anwendung des ALARA-Prinzips bleiben die tatsächlichen Abgaben sehr weit unterhalb dieser Limiten (etwa 100-mal kleiner).

Etwa ein Viertel dieser sehr kleinen Strahlenbelastung ist auf Kohlestoff-14 ($C-14$) zurückzuführen, der in Form von CO_2 aus den Kaminen der KKW in die Atmosphäre abgegeben wird. Da dieses Isotop von den Pflanzen aufgenommen und in ihren Stoffwechsel eingebracht wird, wird manchmal behauptet, dass es mit einer besonderen Gewichtung behandelt werden muss. Seit vielen Jahren werden die $C-14$ -Konzentrationen im Laub der näheren Umgebung von Kernkraftwerken überwacht. Sie zeigen einen bis ca. 15% höheren Wert an als der weltweite $C-14$ -Pegel. Es ist aber auch bekannt, dass die Kernwaffenversuche der 50er- und 60er-Jahre den $C-14$ -Pegel in der gesamten Nordhalbkugel während einiger Jahre praktisch verdoppelt haben. Dieser Wert ist seither langsam wieder auf den Vor-Bomben-Wert zurückgesunken. Wenn diese Strahlung für ein erhöhtes Leukämierisiko verantwortlich wäre, hätte man somit damals in der ganzen Nordhalbkugel einen massiven Anstieg der Leukämieerkrankungen feststellen müssen. Dies war jedoch nicht der Fall.

Eine Rekapitulation aller diskutierten Beiträge ergibt folgendes Bild:

	Mittelwert mSv/Jahr	Maximum mSv/Jahr
Kosmische Strahlung	0,35	0,6
Terrestrische Strahlung	0,45	1,0
Radon in Wohnräumen	1,6	~ 100
Kalium-40 im Körper	0,35	0,5
Medizinische		
Radiodiagnostik	1,2	~ 100
Kernkraftwerke (Nahumgebung)	0,001-0,005	0,2
Total	4	~ 200

Demzufolge ist die Strahlendosis, die durch KKW verursacht wird, erheblich kleiner als alle anderen Beiträge und auch kleiner als die örtlichen oder zeitlichen Schwankungen der gesamten Strahlenexposition. Sie kann daher kaum für eine medizinisch relevante Belastung, wie zum Beispiel ein erhöhtes Kinderleukämierisiko in der Umgebung von KKW, verantwortlich sein.

Quellen

- Aroua A., Vader J.-P., Valley J.-F. (2000). Enquête sur l'exposition par le radiodiagnostic en Suisse en 1998. Hospices Cantonaux de l'Etat de Vaud. ISBN 2-88444-0006-2.
- HSK Strahlenschutzbericht 2007 (2008) (Jahresberichte der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen) HSK-AN-6503, ISSN 1661-2906.
- Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz. Ergebnisse 2005, 2006, 2007 etc. Bundesamt für Gesundheit BAG (Jahresberichte).

5 Kinderleukämie und Strahlen

5.1 Das Krankheitsbild Kinderleukämie

Krebserkrankungen bei Kindern sind generell selten, können aber in jeder Altersgruppe auftreten. Sie unterscheiden sich von Krebserkrankungen bei Erwachsenen zum einen in der Form, zum andern in Bezug auf die Heilungschancen. So leiden Kinder oftmals an sehr schnell wachsenden Krebserkrankungen, die aber medikamentös besser behandelbar sind als jene bei älteren Menschen.

Nur ungefähr 1% aller Krebserkrankungen betreffen Kinder. Davon ist mit einem Anteil von etwa 33% die akute Leukämie die häufigste Form, gefolgt von Hirntumoren und Lymphdrüsenkrebs. Daneben gibt es noch einige typische kindliche Krebserkrankungen, die aus unreifem Gewebe entstehen und die daher kaum bei Erwachsenen anzutreffen sind.

Bei der Leukämie werden zu viele unreife weisse Blutkörperchen gebildet, welche keine richtige Funktion mehr ausüben. Leukämiezellen, die sich rasch vermehren, können gesunde Blutzellen verdrängen, ins Blut ausgeschwemmt werden und auf diesem Weg auch andere Organe befallen und deren Funktion beeinträchtigen (siehe dazu Abbildung 3 und 4). Die Beschwerden reichen von Knochen- oder Gelenkschmerzen über vermehrte Müdigkeit, Blässe und Gewichtsverlust bis hin zu zahlreichen Blutergüssen oder wiederkehrenden Infektionen. Gesunde weisse Blutkörperchen sind für die Infektionsbekämpfung im Körper und Aufräumarbeiten nach Verletzungen wichtig und werden wie die roten Blutkörperchen im Knochenmark oder in anderen Organen des *lymphatischen Systems* gebildet. Man unterscheidet 2 Hauptgrup-

pen von weissen Blutzellen, die lymphatischen Zellen und die myeloischen Zellen, wobei aus beiden Zellfamilien eine Leukämie entstehen kann.

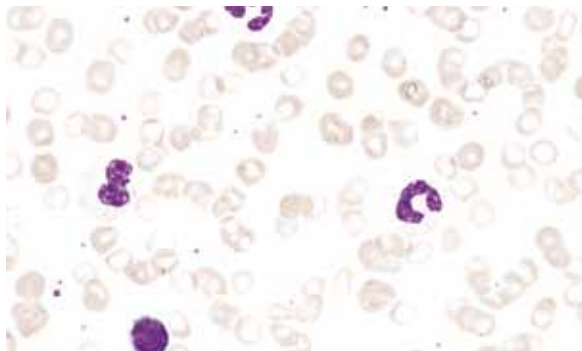


Abbildung 3: Blutbild mit normalen Blutzellen.

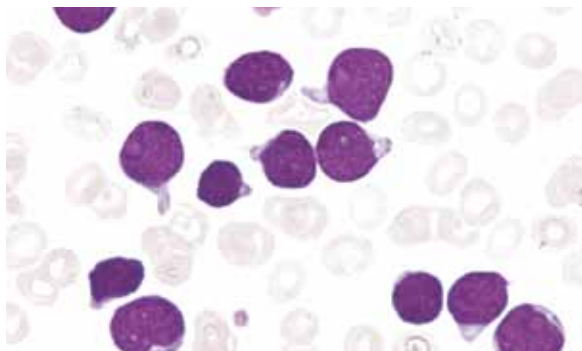


Abbildung 4: Blutbild mit Leukämiezellen.

Quelle: Universitäts-Kinderklinik, Zürich.

Unterschiedliche Formen und Therapien

In der Schweiz erkranken jährlich etwa 50 bis 60 Kinder an Leukämie. Dies entspricht 5 neuen Erkrankungen pro 100'000 Kindern unter 15 Jahren. Weltweit sind jedes Jahr einige tausend Kinder betroffen. Statistiken zeigen über die letzten 30 Jahre eine geringe Zunahme der Leukämiehäufigkeit bei Kindern. In vier Fünftel der Fälle diagnostiziert man eine *akute lymphatische Leukämie (ALL)*, welche durch eine Vermehrung der Lymphozyten gekennzeichnet ist. Der Rest der betroffenen Kinder leidet vorwiegend an einer *akuten myeloischen Leukämie (AML)*, welche durch eine Vermehrung von myeloischen Blutzellen charakterisiert ist. Die beiden Leukämievarianten sind biologisch unterschiedlich und benötigen daher unterschiedliche Behandlungskonzepte.

Kinder können in jedem Alter an Leukämie erkranken. Am häufigsten betroffen ist jedoch die Altersgruppe zwischen dem 2. und dem 5. Lebensjahr. Jungen erkranken etwas häufiger als Mädchen. Ohne Behandlung verläuft die Krankheit tödlich. Aufgrund der modernen *Chemotherapie* konnte die Heilungsrate in den vergangenen Jahren drastisch verbessert werden: 4 von 5 Kindern mit *akuter lymphatischer Leukämie* werden heute langfristig geheilt, während die *akute myeloische Leukämie* noch nicht ganz so erfolgreich behandelt werden kann. In besonderen Risikosituationen ist

eine zusätzliche Strahlentherapie oder sogar eine Knochenmarktransplantation notwendig.

Verschiedene Faktoren beeinflussen Heilungschancen

Der langfristige Erfolg einer Therapie kann durch verschiedene Risikofaktoren beeinflusst werden. So spielt die Art der Leukämie und das Alter des Kindes eine Rolle, aber auch die genetischen Veränderungen in den Leukämiezellen und vor allem die Empfindlichkeit der Leukämiezellen gegenüber der Therapie sind von grosser Bedeutung. Üblicherweise wird die Behandlung über einen Zeitraum von 2 Jahren mit intensiveren und weniger intensiven Therapiephasen durchgeführt. Zwar ist über die Spätfolgen der Leukämiebehandlung noch nicht alles bekannt, doch weisen die erwachsenen Personen, welche im Kindesalter wegen Leukämie behandelt wurden, mehrheitlich keine übermässigen Gesundheitsprobleme auf.

5.2 Forschungsstand bei den Ursachen

Die genaue Ursache der Leukämieerkrankung ist wie auch bei anderen kindlichen Krebserkrankungen in den meisten Fällen nicht bekannt. Es sind jedoch allgemeine Risikofaktoren nachweisbar, die eine bestimmte Krebserkrankung begünstigen können. So stellt etwa das übermässige Sonnenbaden einen Risikofaktor für die Entstehung von Hautkrebs dar, und Lungenkrebs und andere Krebsarten können durch Rauchen verursacht werden. Wenn man ein erhöhtes Risiko hat, bedeutet dies natürlich noch lange nicht, dass zwangsläufig eine Krebserkrankung ausbrechen muss.

Es gibt auch Faktoren, welche eine Leukämieentstehung begünstigen können, wobei es Hinweise gibt, dass für unterschiedliche Leukämieuntergruppen unterschiedliche Risikofaktoren von Bedeutung sein können. Diese Faktoren lassen sich in 3 Kategorien unterteilen: A) Angeborene oder genetische Faktoren, B) Veränderungen des Abwehrsystems, C) Äusserliche Faktoren, welche Lebensstil und Umwelt betreffen. Es ist wahrscheinlich, dass durch das Zusammenspiel verschiedener Faktoren das Risiko der Leukämieentwicklung besonders erhöht wird.

A) Angeborene und genetische Faktoren

Leukämien treten zwar gelegentlich bei einer Reihe von genetischen Erkrankungen auf, jedoch weisen die meisten leukämiekranken Kinder keine bekannten genetischen Risikofaktoren auf. Normale menschliche Zellen wachsen und funktionieren aufgrund von Informationen, die in den

Zellen auf den *Chromosomen* enthalten sind. Diese *Chromosomen*, welche zur Hälfte vom Vater und zur anderen Hälfte von der Mutter stammen, sind die Träger all unserer Erbfaktoren, den Genen. Gene enthalten Instruktionen für das Zellwachstum und für die Zellteilung. Bei jeder Zellteilung in 2 neue Zellen müssen die Erbfaktoren auf den *Chromosomen* neu kopiert werden, um sie auf die Tochterzellen zu übertragen. Dieser Kopiervorgang ist nicht immer perfekt, es können dabei Fehler auftreten, die zu Verlusten von Genen selbst oder sogar zu Veränderungen von Genen führen. Eine solche Genveränderung nennt man *Mutation*. Solche *Mutationen* können auch spontan sowie durch andere äussere Einflüsse wie krebserregende Stoffe entstehen.

Mutation kann Leukämie auslösen

Durch eine solche Veränderung der Gene kann die Zellteilung beeinflusst und ein unkontrolliertes Wachstum der Zellen ausgelöst werden, woraus schlussendlich eine Leukämie oder eine andere Krebserkrankung resultieren kann. Ein bekanntes Beispiel für eine genetische Erkrankung, die mit erhöhtem Leukämierisiko bei Kindern einhergeht, ist das *Down-Syndrom (Trisomie 21)*. Seltene angeborene Erkrankungen werden mit einer vermehrten *Chromosomenbrüchigkeit* in Verbindung gebracht, weshalb auch diese Kinder ein erhöhtes Risiko aufweisen, eine Leukämie zu entwickeln.

Genveränderungen, die zu einer Krebserkrankung führen können, werden in einigen Fällen auch von den Eltern vererbt. Ein solch veränderter Erbfaktor, beispielsweise auf dem *Chromosom 17*, kann das Risiko einer Leukämieentstehung erhöhen oder auch andere Krebserkrankungen wie *Weichteilsarkome* oder Brustkrebs mit verursachen. Man geht davon aus, dass Genveränderungen, die später zu einer Leukämie bei Kindern führen können, mehrheitlich nach der Eibefruchtung, aber teilweise noch vor der Geburt auftreten.

B) Veränderungen des Abwehrsystems (Immunsystem)

Patienten, die zum Beispiel aufgrund einer Organtransplantation eine intensive Behandlung zur Unterdrückung von Organabstossungen benötigen, weisen ein höheres Risiko auf, bestimmte Krebserkrankungen, insbesondere Lymphdrüsenkrebs und Leukämie, zu entwickeln. Der individuelle Zustand des menschlichen Abwehrsystems oder Immunsystems ist für die Leukämieentstehung daher sicherlich von Bedeutung.

C) Äusserliche Faktoren, welche Lebensstil und Umwelt betreffen

Die Bedeutung des Lebensstils spielt zwar bei mehreren Krebserkrankungen von Erwachsenen eine Rolle, ist aber

bei Kindern sicherlich weniger relevant. Insbesondere bei der Leukämieentstehung gibt es kaum relevante Hinweise, dass solche Faktoren diese Erkrankung begünstigen könnten. Vermehrter Alkoholkonsum während der Schwangerschaft wurde als möglicher Risikofaktor für die Leukämieentstehung diskutiert, konnte aber nicht abschliessend bewiesen werden. Auch der Tabakkonsum während der Schwangerschaft konnte nicht überzeugend mit einer erhöhten Gefährdung der Nachkommen für eine Leukämieerkrankung in Zusammenhang gebracht werden. Ebenso unwahrscheinlich ist, dass die Ernährung für die Entstehung von Leukämie bei Kindern verantwortlich ist.

Faktoren aus der Umwelt: Umweltfaktoren wie zum Beispiel verschiedenartige Strahlen, Luftpartikel und Chemikalien beeinflussen unsere Umgebung und können in manchen Fällen krankheitsauslösend wirken. Einige wenige schädigende Ursachen sind gut bekannt. In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedenste Untersuchungen über möglicherweise Leukämie auslösende Umweltfaktoren durchgeführt, leider oft mit unklaren oder sehr unterschiedlichen Resultaten.

Ionisierende Strahlen: Exposition gegenüber hohen Dosen von Radioaktivität kann Leukämien hervorrufen. Dies ist seit den Atombombenabwürfen auf Japan gut bekannt (siehe Kapitel 3.2). Dabei konnten vermehrt *akute myeloische Leukämien*, üblicherweise 6 bis 8 Jahre nach der Exposition, nachgewiesen werden. Ebenso kann eine übermässige Bestrahlung eines ungeborenen Kindes das Risiko einer Leukämieerkrankung erhöhen. Inwiefern aber Röntgenstrahlen oder Computertomographie-Untersuchungen bei Kindern im Rahmen üblicher diagnostischer Anwendungen das Krebsrisiko ansteigen lassen, ist noch unklar. Bislang gibt es hierfür keine eindeutigen Beweise. Ein möglicher Risikofaktor, der aus diesen diagnostischen Untersuchungen entstände, wäre in jedem Fall sehr klein. Da er dennoch nie ganz ausgeschlossen werden kann, ist der äusserst sorgfältige und zurückhaltende Umgang mit Röntgenuntersuchungen bei Kindern und schwangeren Frauen unbedingt notwendig.

Kinder und Erwachsene, welche wegen einer bereits bestehenden Krebserkrankung einer Strahlentherapie und *Chemotherapie* unterzogen werden müssen, haben ein höheres Risiko, später eine zweite Krebserkrankung – insbesondere eine Leukämie (AML) – zu entwickeln. Für die Strahlentherapie der ersten Krebserkrankung werden allerdings hohe Dosen benötigt, die bis zu 100'000-mal grösser sind als die eines normalen Röntgenbildes.

Elektromagnetische Wellen: In den letzten Jahren wurde vermehrt der Exposition *elektromagnetischer Wellen* eine leukämiefördernde Wirkung nachgesagt. Die elektro-

magnetische Strahlung gehört zu unserer Umwelt, wir sind also ständig von *elektromagnetischen Feldern* umgeben. Solche Felder werden vom Strom der Eisenbahn über Hochspannungsleitungen (niederfrequente Strahlung) bis hin zum Computer, zu Telefonanlagen, Handys, Sendestationen für Radio und Fernsehen und Mikrowellenofen (hochfrequente Strahlung) produziert. Obschon in einigen Untersuchungen ein Zusammenhang zwischen *elektromagnetischen Wellen* und einem höheren Leukämierisiko postuliert wurde – zum Beispiel bei einem Wohnort in unmittelbarer Nähe von Hochspannungsleitungen –, haben andere gleichartige Untersuchungen keinen solchen Zusammenhang nachweisen können. Eine erst kürzlich veröffentlichte Studie konnte ebenfalls keine eindeutig vermehrte Leukämiehäufigkeit bei Kindern mit Wohnort in der Nähe von Radio- und Fernsehantennen zeigen. Die Bedeutung von Mobiltelefonen wird diesbezüglich immer noch untersucht. Bislang jedoch existieren keine Hinweise darauf, dass Handys bei der Leukämieentstehung bei Kindern und Jugendlichen eine Rolle spielen. Im Rahmen eines nationalen Forschungsprogramms werden zurzeit die Auswirkungen von *elektromagnetischen Feldern* auf die menschliche Gesundheit untersucht.

Chemikalien: Bei Erwachsenen ist bekannt, dass gewisse Chemikalien eine *akute myeloische Leukämie* verursachen können. Ein Beispiel hierfür ist *Benzol*, auch *Benzene* genannt – ein Lösungsmittel, das bei Industriewerkstoffen Verwendung findet. Bei der *akuten lymphatischen Leukämie* kennt man dagegen bislang keine Chemikalien, die diese Krankheit direkt auslösen können. Möglicherweise spielen auch hier die Erbfaktoren eine wichtige Rolle, indem sie wesentlich bestimmen, wie unser Organismus mit den verschiedensten Substanzen umgeht, die wir zu uns nehmen oder denen wir in der Umwelt begegnen. Schlussendlich gilt auch hier die Tatsache, dass vor allem die Menge einer solchen Substanz darüber entscheidet, ob sie heilsam oder *toxisch* wirkt.

Kontroverse Risikofaktoren der Leukämieentstehung: Es gibt eine ganze Reihe von Faktoren, die immer wieder mit der Leukämieentstehung in Zusammenhang gebracht werden. Für viele dieser Faktoren sind jedoch die Datenlage oder die Beweisführung ungenügend oder die Resultate kontrovers.

So wurden etwa *Pestizide*, denen die Eltern leukämiekranker Kinder ausgesetzt waren, dafür verantwortlich gemacht, einen Einfluss in der Leukämieentstehung ausgeübt zu haben.

Insbesondere wurden der väterliche Arbeitsplatz und die Exposition gegenüber Chemikalien und Lösungsmitteln untersucht. Aber auch die chemische Verunreinigung von Grundwasser, Dutzende von anderen Substanzen und nicht

zuletzt auch verschiedenste Nahrungsmittel werden oftmals in den Zusammenhang mit einer Krebsentstehung gebracht. All diese Untersuchungen kamen in Bezug auf die Verursachung von Leukämie aber zu keinem eindeutigen Ergebnis. Ebenfalls keine eindeutige Erklärung findet die Beobachtung, dass bei höherem Alter der Mutter bei Geburt des Kindes sowie bei erhöhtem Geburtsgewicht eine leichte Häufung einer Leukämieentwicklung festgestellt wurde. Eine Hormonverabreichung während der Schwangerschaft oder Impfungen des Kindes konnten nicht mit der Leukämieentstehung in Verbindung gebracht werden.

Quellen

- Belson M., Kingsley B., Holmes A. (2007). Risk factors for acute leukemia in children: a review. *Environmental Health Perspectives*, Volume 115, Seite 138–145.
- Childhood cancer and residential proximity to power lines. UK Childhood Cancer Study Investigators. *British Journal of Cancer* 2000, Volume 83, Seite 1573–1580.
- Deutsches Kinderkrebsregister, Jahresbericht 2006/07. Institut für Medizinische Biometrie, *Epidemiologie* und Informatik, Mainz <http://www.kinderkrebsregister.de/>
- Dickinson HO. (2005). The causes of childhood leukaemia. *British Medical Journal*, Volume 330, Seite 1279–1280.
- Doll R., Wakeford R. (1997). Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *British Journal of Radiology*, Volume 70, Seite 130–139.
- Draper G., Vincent T., Kroll ME., Swanson J. (2005). Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *British Medical Journal*, Volume 330, Seite 1290.
- Hjalgrim LL., Rostgaard K., Hjalgrim H., Westergaard T., Thomassen H., Forestier E., Gustafsson G., Kristinsson J., Melbye M., Schmiegelow K. (2004). Birth weight and risk for childhood leukemia in Denmark, Sweden, Norway, and Iceland. *Journal of the National Cancer Institute*, Volume 96, Seite 1549–1556.
- Linet MS., Hatch EE., Kleinerman RA., Robison LL., Kaune WT., Friedman DR., Severson RK., Haines CM., Hartsock CT., Niwa S., Wacholder S., Tarone RE. (1997). Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *The New England Journal of Medicine*, Volume 337, Seite 1–7.
- Nationales Forschungsprogramm des Schweizerischen Nationalfonds «Nichtionisierende Strahlung – Umwelt und Gesundheit» (NFP 57), <http://www.nfp57.ch>.
- Rudant J., Menegaux F., Leverger G., Baruchel A., Lambilliotte A., Bertrand Y., Patte C., Pacquement H., V´erit´e C., Robert A., Michel G., Margueritte G., Gandermer V., H´emon D., Clavel J. (2008). Childhood hematopoietic malignancies and parental use of tobacco and alcohol: the ESCALE study (SFCE). *Cancer Causes & Control*, Volume 19, Seite 1277–1290.

- Schulze-Rath R., Hammer GP., Blettner M. (2008). Are pre- or postnatal diagnostic X-rays a risk factor for childhood cancer? A systematic review. *Radiation and Environmental Biophysics*, Volume 47, Seite 301–12.

5.3 Gegenwärtige Ansichten zur Leukämieentstehung

Leukämie ist eine vielschichtige Erkrankung. Die verschiedensten Ursachen für eine Erkrankung sind möglich. Allen gemeinsam ist eine genetisch verankerte Empfindlichkeit der Blutzellen während einer Lebensphase, in der das Kind auf äussere Einflüsse sehr empfindlich reagiert. So sind Kinder mit *Down-Syndrom* stärker gefährdet, eine Leukämie zu entwickeln, aber auch Knaben und Babies mit grösserem Geburtsgewicht entwickeln eine Leukämie etwas häufiger.

Zweistufenmodell als mögliche Erklärung

Die Hinweise häufen sich, dass die Entstehung der *akuten lymphatischen Leukämie* auf einem Zweistufenmodell (2-Hit-Modell) basiert, welches ursprünglich für bestimmte andere Krebsarten bei Kindern propagiert wurde. Danach müssen mindestens 2 Ereignisse eintreten, damit eine Leukämie zum Ausbruch kommt («Greaves Hypothese»). Das erste Ereignis, welches zu einer Genveränderung führt, tritt schon während der Schwangerschaft auf. Während der raschen Zellteilung von Blutzellen des ungeborenen Kindes kann es zu *Mutationen*, also Veränderungen der Erbfaktoren, kommen. Daraus kann eine *präleukämische Veränderung* in den weissen Blutzellen entstehen. Diese Veränderung alleine genügt aber in der Regel noch nicht für den Ausbruch der Leukämie. Ein weiteres Ereignis trifft in den ersten Lebensjahren auf die vorgeschädigten Blutzellen des Kindes, wobei hier Infektionen eine wichtige Rolle spielen können. Dieses zweite Ereignis hat möglicherweise zur Folge, dass die vorgeschädigten oder *präleukämischen* Blutzellen weitere Zellveränderungen erfahren und schliesslich zur lebensbedrohlichen Leukämieerkrankung ausarten. So gibt es zum Beispiel Hinweise, dass eineiige Zwillinge, die in den ersten Lebensjahren fast gleichzeitig eine Leukämie entwickeln, solche spezifischen *präleukämischen Veränderungen* schon bei der Geburt aufgewiesen und diese vermutlich im Mutterleib über ihr Blut gegenseitig ausgetauscht haben.

Hinweise auf die Entstehung von Leukämie

Was jedoch sind diese auslösenden Ereignisse? Könnten tatsächlich Infektionserreger die Ursache sein? Auffallend ist zumindest, dass die Leukämie am häufigsten bei Kindern zwischen dem 2. und dem 5. Lebensjahr auftritt. Ausserdem ist die Leukämiehäufigkeit in industrialisierten Ländern höher als in Entwicklungsländern. Vor allem bei der Modernisierung einer Region scheint die Krankheit zuzunehmen. Möglicherweise spielt hierbei die Verbesserung der Hygiene eine Rolle, die zur Folge hat, dass gewisse Infektionserreger verspätet (zwischen dem 2. und dem 5. Lebensjahr) auf die Kinder treffen, zu einem Zeitpunkt also, an dem sich ihr Abwehrsystem und ihre Blutzellentwicklung in einer empfindlichen Phase befinden. In der Tat treten Leukämien offenbar gehäuft in Gebieten auf, wo die Bevölkerungsveränderung und Durchmischung zunehmen, möglicherweise weil hier vermehrt Menschen mit und ohne Infektionserreger gegenseitig in Kontakt kommen.

Ebenso gibt es Hinweise darauf, dass Kinder, die sich bereits sehr früh in einer Krippe aufhalten, weniger häufig eine Leukämie entwickeln als Kinder, die verspätet mit anderen Kindern vermehrt in engen Kontakt treten. Eine Auseinandersetzung der lymphatischen Blutzellen unseres Abwehrsystems mit Infektionserregern in den ersten Lebensmonaten könnte also einen günstigen Einfluss auf das Abwehrsystem im Sinne einer frühzeitigen Reifung ausüben. Treffen mögliche Infektionserreger verspätet auf die noch unreifen lymphatischen Blutzellen, könnten diese Blutzellen Änderungen durchlaufen, die sie schliesslich in Leukämiezellen verwandeln. Dass Infektionserreger wie zum Beispiel Viren Leukämien verursachen können, ist etwa bei einer seltenen Leukämieart bei Erwachsenen bekannt sowie auch bei manchen Tieren (z.B. das Katzenleukämievirus, welches leukämieartige Erscheinungen bei Katzen hervorrufen kann). Eine einheitliche Ursache für die Entstehung der verschiedenen Formen von Leukämie ist aber eher unwahrscheinlich.

Quellen

- Alexander FE., Chan LC., Lam TH., Yuen P., Leung NK., Ha SY., Yuen HL., Li CK., Li CK., Lau YL., Greaves MF. (1997). Clustering of childhood leukaemia in Hong Kong: association with the childhood peak and common acute lymphoblastic leukaemia and with population mixing. *British Journal of Cancer*, Volume 75, Seite 457 – 463.
- Gilham C., Peto J., Simpson J., Roman E., Eden TO., Greaves MF., Alexander FE. (2005). Day care in infancy and risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia: findings from UK case-control study. *British Medical Journal*, Volume 330, Seite 1294 – 1297.
- Greaves M. (2006). Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukaemia. *Nature Reviews Cancer*, Volume 6, Seite 193 – 203.

- Kamper-Jørgensen M., Woodward A., Wohlfahrt J., Benn CS., Simonsen J., Hjalgrim H., Schmiegelow K. (2007). Childcare in the first 2 years of life reduces the risk of childhood acute lymphoblastic leukemia. *Leukemia*, Volume 22, Seite 189 – 193.

6 Epidemiologie-Studien um KKW-Standorte

6.1 Epidemiologische Studien

Untersuchungen über einen möglichen Zusammenhang zwischen Kernkraftwerken und Krebserkrankungen können mit Hilfe der *Epidemiologie* vorgenommen werden. Als *Epidemiologie* bezeichnet man diejenige Forschungsrichtung der Medizin, die Krankheiten nicht am einzelnen Patienten, sondern an der ganzen Bevölkerung oder an definierten Gruppen untersucht. Sie ist damit eine der wichtigsten Wissensquellen der Medizin – neben der Beobachtung im Einzelfall am Krankenbett, der Übertragung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse auf den Menschen und dem Experiment.

Entstehung der Epidemiologie

Als Geburtsstunde der *Epidemiologie* gilt die *Choleraepidemie* im Jahr 1854 in London. Der Arzt John Snow schloss damals aus der Verteilung der Todesfälle im Quartier Soho, dass der Ausbruch der *Epidemie* auf das Wasser des Brunnens an der Broad Street zurückzuführen sei. Er liess daher kurzerhand den Pumpengriff des Brunnens entfernen, worauf die Erkrankungen innert kurzer Zeit abnahmen und die *Epidemie* zu Ende ging. Dies war zu einer Zeit, als der Erreger der Cholera und seine Verbreitung noch nicht bekannt waren und viele zum Teil abenteuerliche Gerüchte über die Ursachen dieser lebensgefährlichen Erkrankung zirkulierten.

Für John Snow war es damals leicht, einen Zusammenhang zwischen der Trinkwasserquelle und der Krankheit herzustellen, da die Infektion hochansteckend war und der Zeitraum zwischen dem Genuss verdorbenen Wassers und dem Auftreten schwerer, charakteristischer Symptome nur Stunden bis wenige Tage betrug. Für die meisten

Krankheiten sind die Gegebenheiten nicht derart offensichtlich. Viele Krankheiten haben verschiedene Ursachen, die nebeneinander oder zum Teil nur in Kombination das Leiden hervorrufen können. Oft vergehen zwischen der Schädigung und den ersten Symptomen einige Jahre, während deren das damalige Geschehen verblasst oder gar verfälscht wird.

Statistik liefert wertvolles Datenmaterial

Über ganze Bevölkerungsgruppen kann nur mit statistischen Methoden eine verlässliche Aussage gemacht werden. Das Wort Statistik hat 2 Bedeutungen: Zum einen das systematische Sammeln von Daten beispielsweise über den Gesundheitszustand der Bevölkerung. Geburten, Todesfälle und Todesursachen, aber auch Erkrankungen werden kontinuierlich durch Amtsstellen und Spitäler registriert und publiziert. Die Tabellen und Grafiken, die daraus entstehen, sind nicht immer einfach zu interpretieren, aber sehr hilfreich für die Beantwortung bestimmter Fragestellungen anhand von Datenmaterial. Zum andern werden auch die mathematischen Verfahren als Statistik bezeichnet, mit denen man Beobachtungen als bedeutungsvoll oder als zufallsbedingt festlegen kann.

Zum Beginn einer *epidemiologischen* Untersuchung werden daher die Erkrankungsfälle in spezifischen Gruppen verglichen, aufgeschlüsselt nach Geschlecht, Beruf oder Wohnort. Dabei ist es wichtig, dass die Daten vollständig erhoben worden sind, zudem müssen sie zum Vergleich für unterschiedliche Altersstrukturen korrigiert werden. Eine derartige *Populationsstudie* stellt immer nur eine Momentaufnahme dar und erlaubt kaum Aussagen über den Verlauf einer Krankheit. In dem Fall helfen sogenannte *Kohortenstudien* weiter: Eine genau bezeichnete Gruppe von Patienten mit einer bestimmten Krankheit wird über längere Zeit regelmässig befragt und untersucht. Nur so lassen sich genaue Angaben über die Verschlechterung, die Komplikationsrate oder auch Spontanheilungen machen, da in den Spitalstatistiken naturgemäss die schlecht verlaufenden Fälle ein zu grosses Gewicht erhalten. Darüber hinaus werden alle verdächtigen Lebensumstände, Gewohnheiten und Berufsrisiken detailliert abgefragt, um Hinweise auf die Ursachen der Erkrankung zu erhalten.

Stichproben bei seltenen Krankheiten

Dieses detaillierte Vorgehen ist bei der Untersuchung seltener Krankheiten so nicht möglich, da die amtlichen Statistiken keine Informationen zu den Lebensbedingungen enthalten und grossflächige Interviews nicht praktikabel sind. In den Fällen, wo die Patienten mit Tausenden nicht Erkrankten verglichen werden müssen, greift man daher zu sogenannten *Fall-Kontroll-Studien*, d.h., man wählt möglichst zufällig für jeden Erkrankten einige Normalpersonen aus – meist passend zu Alter, Geschlecht und Herkunft –,

die sich für eine vertiefte Befragung zur Verfügung stellen. Diese zufällige Stichprobe wird dann zum Vergleich herangezogen und erlaubt Rückschlüsse auf die Ursachen und Risikofaktoren für eine Krankheit. Allerdings hat man dabei zumeist mit der geringen Bereitschaft der Gesunden zu kämpfen, längere Interviews und Untersuchungen zu gewähren. Ein hoher Prozentsatz von Verweigerern führt zwangsweise dazu, dass die Restlichen nicht mehr als *repräsentative* Stichprobe für die Normalbevölkerung gelten können und definitive Schlussfolgerungen somit nicht zu ziehen sind.

Grenzen und Nutzen der Epidemiologie

In jedem Fall können *epidemiologische Studien* jeweils nur Zahlenverhältnisse erbringen, die mit einer vermuteten Ursache übereinstimmen, aber niemals einen endgültigen Beweis für die *Genese* einer Krankheit liefern. Hierfür sind unterstützende Laboruntersuchungen und Experimente an Tieren notwendig, die den Verdacht weiter erhärten. Oftmals sind auch schon falsche Schlüsse gezogen worden, weil ein vermuteter Risikofaktor zufällig oder nur mittelbar, ohne also die tatsächliche Krankheitsursache zu sein, bei den Erkrankten in deutlich höherer Häufigkeit gefunden wurde. Trotz dieser Beschränkungen und ungeachtet des meist hohen Aufwandes ist die *Epidemiologie* zu einer unverzichtbaren Sparte der medizinischen Forschung geworden. Sie kann häufig das Wissen ergänzen, das aus biochemischen und molekularbiologischen Experimenten gewonnen wird. Denn diese können zwar viel biologisches Detailwissen erarbeiten, sind aber nicht in der Lage, die Relevanz eines Befundes zu erhärten.

6.2 Die deutsche KiKK-Studie (2007)

Die deutsche Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK) entstand in einem politischen Spannungsfeld und hat – wie viele derartige *epidemiologische Studien* – ihren Ursprung in einem Hinweis aus der Publikumspresse: In der Umgebung des Kernkraftwerkes Krümmel im deutschen Bundesland Schleswig-Holstein sei eine ungewohnte Häufung von Todesfällen durch Krebs bei Kindern aufgetreten. Da in Deutschland seit längerem ein umfassendes Register der kindlichen Krebserkrankungen existiert, wurden in einer ersten Studie 1992 die Erkrankungsraten in der Umgebung von allen Kernkraftwerken mit in Bezug auf die Bevölkerungsstruktur ähnlichen Landesteilen verglichen. In 20 Landkreisen mit Kernkraftwerken und jeweils einem geeigneten Landkreis als Kontrolle wurden insgesamt 1610 Krankheitsfälle

ausgewertet und das Risiko, eine Krebserkrankung im Kindesalter zu erleiden, in den verschiedenen Gebieten verglichen.

Widersprüchliche Ergebnisse der ersten Studie

Die Resultate waren widersprüchlich: Alle Krebskrankheiten kombiniert waren in der Nähe von Kernkraftwerken weniger häufig als in den Vergleichsregionen, für Leukämien allerdings war das Risiko um 6% höher. Weitere Berechnungen für einzelne Altersgruppen, Entfernung des Wohnorts vom Kernkraftwerk und einzelne Krebsarten ergaben ein teils erhöhtes, teils geringeres Risiko. Statistisch waren jedoch fast alle nicht von einem Zufallsresultat abzugrenzen. Allein für akute Leukämien bei Kindern unter 5 Jahren mit Wohnorten weniger als 5 km vom Kernkraftwerk entfernt zeigte die Auswertung ein signifikant höheres Risiko. Allerdings blieb auch dort die Erkrankungsrate unter dem Landesdurchschnitt der gesamten Bundesrepublik.

Auseinandersetzungen auf beiden Seiten führen zu Neuauflage

Wissenschaftler auf der einen Seite wiesen darauf hin, dass die Analyse von Untergruppen auch bei völlig zufälliger Verteilung in einem von 20 Resultaten eine Signifikanz ergibt. Kernkraftwerkgegner auf der anderen Seite insistierten, dass Leukämie als häufigste Krebserkrankung bei Kindern am Ort der höchsten Gefährdung nicht unter den Tisch gewischt werden dürfe. Zudem lag das erhöhte Risiko weit über den Erwartungen, die der minimalen Zusatzbelastung an *ionisierender* Strahlung in der Umgebung eines Kernkraftwerkes angerechnet werden könnte. In dieser Situation beschloss das Deutsche «Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit», eine neue Studie zu initiieren, an deren Planung neben den bisher Verantwortlichen auch Exponenten der Kritiker beteiligt sein sollten. Auch sollten durch detailliertere Befragungen andere Risikofaktoren zur möglichen Erklärung der Erkrankungshäufigkeit untersucht werden.

KiKK-Studie mit neuem Ansatz

Das Resultat dieser Bemühungen ist die KiKK-Studie, die 2007 veröffentlicht wurde. Sie verzichtete auf den Vergleich mit einer Kontrollregion, deren Auswahl immer problematisch ist. Stattdessen wurden in den 3 dem Kernkraftwerk am nächsten gelegenen Landkreisen für jedes erkrankte Kind jeweils 3 gleichaltrige Kinder vom gleichen Geschlecht zufällig ausgewählt und deren Wohnortabstände zum nächstgelegenen KKW mit denen der Erkrankten verglichen. Dies bezeichnet man als eine *Fall-Kontroll-Studie*. Die Nähe des Wohnortes zum Kernkraftwerk wurde mittels zweier Methoden als Einfluss auf das Krankheitsrisiko geprüft: Einerseits im Vergleich des 5-km-Umkreises mit der gesamten Region, andererseits durch eine *Regressionsanalyse*, die davon ausgeht, dass das Risiko

mit grösserer Nähe zum Kraftwerk kontinuierlich ansteigt und nicht auf einem willkürlichen Risikoabstand basiert. Wenn also die zufällig ausgewählten, gesunden Vergleichskinder in ähnlicher Entfernung vom KKW wohnten, kann daraus gefolgert werden, dass dies keinen Einfluss auf die Leukämiehäufigkeit hat. Leben sie jedoch zumeist weiter weg, muss angenommen werden, dass das KKW diese Krankheit «anzieht», also ein erhöhtes Risiko besteht.

Schwächen der neu aufgelegten Studie

Diese Studie entspricht in der Planung dem besten geltenden Wissensstand. In der realen Durchführung ergaben sich allerdings einige Schwierigkeiten. So war vor allem niemand bereit, nochmals 15 Jahre auf die Resultate zu warten. Es wurden daher die alten Daten um einige Jahre zusätzlicher Daten erweitert und mit den neuen Methoden durchgerechnet. Die neue Studie kann daher nicht als eine unabhängige Bestätigung der anfänglichen Befunde gewertet werden, insbesondere weil sich der Trend zu erhöhtem Risiko im weiteren Verlauf nicht bestätigte. Zufallsresultate können nicht durch Nachrechnen derselben Daten bestätigt oder ausgeschlossen werden. Dazu wäre eine erneute Beobachtungsperiode mit ausreichend Erkrankungsfällen zwingend nötig.

Immerhin zeigt die neue Studie, dass in der nächsten Umgebung von Kernkraftwerken doppelt so viele erkrankte Kinder wohnten als zufällig ausgewählte Kontrollen. Die Risikoerhöhung der ersten Studie lässt sich also nicht allein mit der Wahl der Vergleichsregion erklären. In der Untersuchungsperiode von 1980 bis 2003 erkrankten total 37 Kinder im 5-km-Umkreis aller 16 deutschen Kernkraftwerke an Leukämie, statistisch zu erwarten waren 17 Krankheitsfälle. Dies bedeutet, dass für jedes Kernkraftwerk durchschnittlich alle 18 Jahre ein zusätzlicher Fall im Vergleich zum Landesdurchschnitt festgestellt wurde.

Als gravierende Schwäche der neuen Studie erwies sich zudem, dass zu wenig Eltern von gesunden Vergleichskindern bereit waren, detailliert Auskunft zu geben, so dass die Suche nach anderweitigen Erklärungsversuchen aufgegeben werden musste.

Es zeigt sich leider, dass mit der neuen KiKK-Studie die Bedeutung von Kernkraftwerken und deren Radioaktivität bei der Entstehung von Kinderleukämie nicht geklärt werden konnte. Die *ionisierende* Strahlung erklärt keine Risikoerhöhung im gefundenen Ausmass, andere Ursachen konnten in der KiKK-Studie leider nicht erforscht werden, und ein Zufallsresultat ist weiterhin nicht ausgeschlossen. Dies ist auch das Fazit einer unabhängigen Expertenbeurteilung, die vom auftraggebenden Ministerium angeordnet wurde.

Quellen

- Kaatsch P., Blettner M. et al. (2008). Leukämien bei unter 5-jährigen Kindern in der Umgebung deutscher Kernkraftwerke. Deutsches Ärzteblatt, Volume 105, Seite 725 – 32.
- Kaatsch P., Spix C. et al. (2008). Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. International Journal of Cancer, Volume 1220, Seite 721 – 726.
- Kaatsch P., Kaletsch U. et al. (1998). An extended study on childhood malignancies in the vicinity of German nuclear power plants. Cancer Causes & Control, Volume 9, Seite 529 – 533.
- Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Stellungnahme der Strahlenschutzkommission <<http://www.ssk.de/werke/volltext/2008/ssk0806.pdf>>

6.3 Überblick über die bisherigen Studien auf diesem Gebiet

Das Interesse an der Fragestellung Krebskrankheiten bei Kindern in Zusammenhang mit Nuklear-Anlagen begann jedoch schon viel früher, etwa um 1980. Damals berichtete eine Reportage des lokalen Fernsehens in England darüber, dass um die Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungsanlage von Sellafield gehäuft Leukämien bei Kindern auftraten. In der Ortschaft Seascale habe es statt dem erwarteten 1 Fall insgesamt 5 Fälle von Kinderleukämie gegeben. Unter grossem öffentlichem Druck wurden diverse Studien zur Bestätigung und Erklärung dieses Phänomens organisiert, welche zwar die anfänglich berichteten Zahlen etwas korrigierten, ein erhöhtes Risiko jedoch bestätigten.

Sellafield bleibt die Ausnahme

Die Anlage in Sellafield bestand bereits seit längerem. 20 Jahre zuvor hatten der Brand eines *Graphit-modierten* Reaktors und die damals weniger strengen Standards zu einer deutlich nachweisbaren *Kontamination* der Umwelt geführt. Allerdings war die Freisetzung radioaktiven Materials nicht hoch genug, um die Häufung der Leukämien auszulösen. Erklärungsversuche wie Strahlenexposition der Väter bei der Arbeit, Besuch von Meeresstränden, an denen radioaktive Abwasser entsorgt worden waren, oder Konsum von Fischen mit angereicherter Radioaktivität konnten alle nicht erhärtet werden. Nach fast 30 Jahren bleibt Sellafield die einzige Nuklearanlage, in deren Umgebung die Leukämiehäufigkeit konstant erhöht geblieben ist.

Britische Behörde leistet wichtigen Beitrag

Einen wichtigen Beitrag zur kontinuierlichen Überwachung der Lage leistet die britische Behörde COMARE (Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment), die alle britischen Nuklearanlagen überwacht und 2005 den 10. Bericht über die Auswirkungen auf die Krebshäufigkeit bei Kindern herausgegeben hat. In dieser Übersicht über beinahe 30 Jahre waren bei 3 Kernkraftwerken die Leukämien geringfügig erhöht, bei 10 jedoch weniger häufig als im Landesdurchschnitt. Selbst mit der neuen, auch in der KiKK-Studie verwendeten *Regressionsrechnung* zeigte sich keine Zunahme bei geringerem Abstand zum Kernkraftwerk. Auch in der Umgebung von Dounreay in Schottland, einer anderen Wiederaufbereitungsanlage, bei der in den 90er-Jahren eine erhöhte Leukämiehäufigkeit festgestellt worden war, haben sich die Zahlen normalisiert, und seit 1992 ist keine neue Leukämie mehr aufgetreten.

Weltweite Studien mit ähnlichen Ergebnissen

Weltweit sind über 50 Studien zu dieser Fragestellung erschienen, etwa aus Frankreich, Deutschland, USA, Japan, Schweden und Israel; einzig Russland und der europäische Osten fehlen mit guten Untersuchungen. All diese *epidemiologischen Studien* (mit Ausnahme der KiKK-Studie) zeigen keine Häufung von Leukämien, wenn eine ganze Gruppe von Kernkraftwerken analysiert wurde. In Einzeluntersuchungen zeigt sich zum Teil ein erhöhtes Risiko, meist ohne statistisch signifikante Werte zu erreichen. Langzeituntersuchungen und ein kontinuierliches Überwachungsprogramm fehlen ausserhalb Grossbritanniens gänzlich. Dass bei diesen Untersuchungen manchmal auch überraschende Ergebnisse zutage treten, sei nur nebenbei erwähnt. So fand sich eine Häufung von Todesfällen beispielsweise auch in Gebieten, die für ein – später nicht gebautes – Kernkraftwerk vorgesehen waren. Und in der Nähe von Oxford, wo um 3 nahe beieinanderliegende kern-technische Anlagen ein erhöhtes Risiko festgestellt wurde, erwies sich schliesslich das konventionelle Kohlekraftwerk für den Hauptanteil der radioaktiven Emissionen verantwortlich (Kohle enthält Spuren von *Radium*).

Eine kartographische Übersicht über alle untersuchten Nuklearanlagen findet sich auf Abbildung 5. Rot sind die Standorte eingezeichnet, bei denen ein erhöhtes Risiko gesichert ist (3 Anlagen), orange steht für Anlagen, bei denen ein Verdacht weiterhin besteht (3 Anlagen). Gelb sind die Orte, wo eine vermutete Häufung durch genauere Untersuchung wieder entkräftet werden konnte (12 Anlagen), und grün sind die Kernkraftwerke markiert, bei denen die Untersuchung keinen Verdacht auf eine Häufung von Leukämien ergab (177 Anlagen).

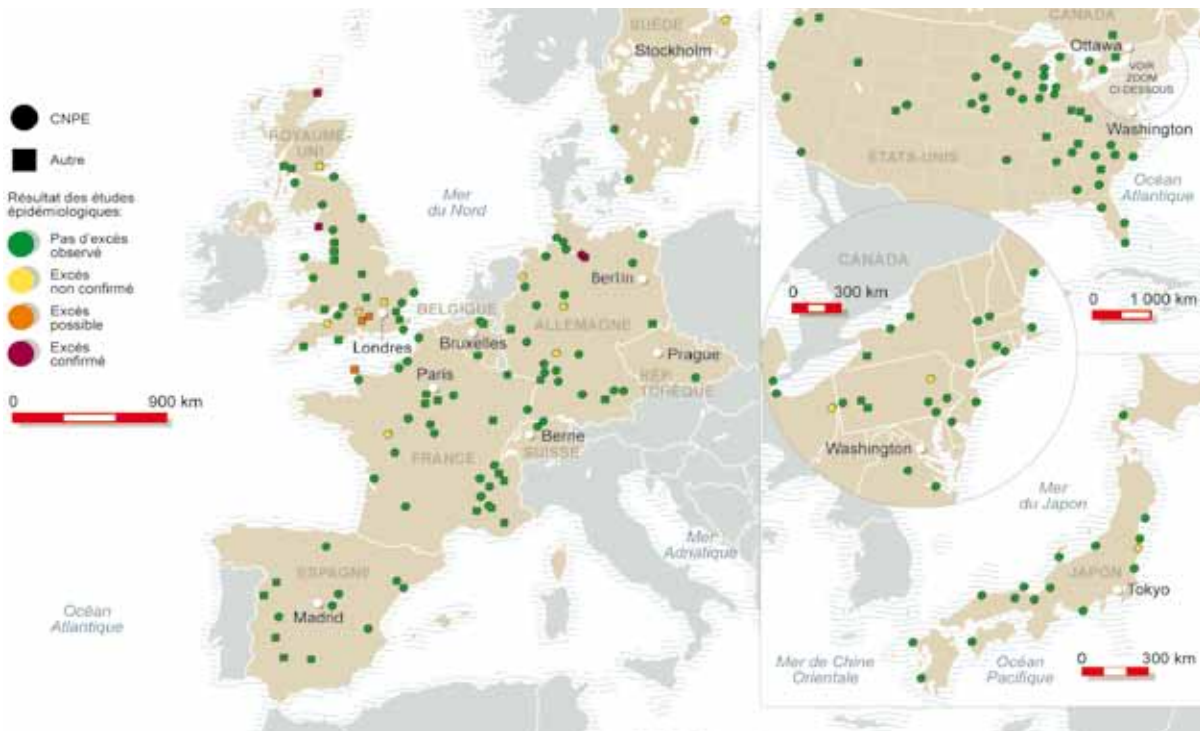


Abbildung 5: Kartographische Übersicht aller untersuchten Nuklearanlagen.

Quelle: Dominique Laurier. IRSN, report DRPH/SRBE n° 2008-001, www.irsn.fr.

Quellen

- Bridges B. et al. (2005). The incidence of childhood cancer around nuclear installations in Great Britain. COMARE Tenth Report. <http://www.comare.org.uk/documents/COMARE10thReport.pdf>
- Laurier D. et al. (2008). Les études épidémiologiques des leucémies autour des installations nucléaires chez l'enfant et le jeune adulte. Rapport DRPH No 2008_1: http://www.irsn.org/document/site_1/fckfiles/File/Internet/Actualites/IRSN-Rapport-Leucemie.pdf

6.4 Überblick über die bisherigen Metastudien

Angesichts so vieler widersprüchlicher Studien zu einem derart emotional belasteten Thema ist der Versuch naheliegend, diese Resultate eindeutig zusammenzufassen. Dies wird üblicherweise anhand einer sogenannten *Meta-studie* unternommen, d.h., die Rohdaten aller verfügbaren Studien werden gemeinsam neu berechnet und analysiert. Da die verschiedenen Studien auf ganz unterschiedliche Art und Weise ausgewertet wurden, erwies sich die Zusammenfassung allerdings wesentlich schwieriger als erwartet.

So wurden Leukämie-Patienten häufig doppelt gezählt, wenn sie zur Behandlung in ein anderes Spital eingetreten waren. Da Todesfälle durch Leukämie über die vergangenen Jahre wegen der besseren Behandlungsmöglichkeiten deutlich weniger geworden sind, waren die Resultate nicht vergleichbar. Auch die Altersgruppen, die Definition des Umkreises eines Kernkraftwerks und andere Grundlagen für die Berechnungen wurden unterschiedlich gehandhabt.

Geringe Aussagekraft der Metaanalyse

Schliesslich konnten durch Baker und Hoel insgesamt 14 Studien ausgewertet werden, die ähnlich genug geplant waren, um eine Sammelrechnung zu erlauben. Im Schnitt ergab sich eine Erhöhung des relativen Risikos um 20% für Kinder unter 9 Jahren, und um ca. 10% für alle Jugendlichen zusammen. Das entspricht einem zusätzlichen Krankheitsfall alle 8 Jahre für ein Kernkraftwerk in einem Land wie Deutschland. Wegen der grossen Unterschiede zwischen den Studien bleibt nur eine knappe Signifikanz. Von den damals bekannten 194 Standortanalysen waren nur 50 in die *Metaanalyse* eingeschlossen, da sich die anderen nicht nach der gleichen Berechnungsart auswerten liessen. Diese Resultate sind daher nicht als *repräsentativ* zu betrachten.

Wichtiger ist wohl eine Gesamtübersicht und kritische Würdigung der Qualitäten und Limiten jeder Studie in einer 1999 publizierten Übersicht. Sie kommt zum Schluss, dass zeitliche und lokale Häufungen von Leukämieerkrankungen bei Kindern schon immer beobachtet wurden, nicht nur im Zusammenhang mit Kernkraftwerken. Jeder Versuch, bei auffälligen *Clustern* einen Grund zu eruieren, ist regelmässig gescheitert. Für die öffentliche Meinung und die

besorgten Eltern wäre es sicher wesentlich beruhigender, wenn anstelle von häufig als dramatisch empfundenen Einzelbefunden eine konstante und transparente Überwachung zur Verfügung stünde.

Neue Erkenntnisse anhand umfangreicher Statistik

Diesen Weg ist die englische Expertengruppe des COMARE konsequent weitergegangen. In ihrem letzten Report zu diesem Thema präsentiert sie eine sich über das ganze Vereinigte Königreich erstreckende Studie, die über 30'000 Krebserkrankungen bei Kindern auswertet und die begünstigenden Faktoren genau analysiert. Zum ersten Mal konnte anhand einer derart umfangreichen Statistik dokumentiert werden, dass die Leukämien bei Kindern deutlich von der sozialen Schicht abhängen, in der sie aufwachsen. Kinder aus begüterten Verhältnissen leben isolierter und haben in frühen Lebensjahren weniger Kontakt mit Altersgenossen, weshalb die üblichen Kinderkrankheiten später auftreten; d.h. zu einem Zeitpunkt, wo das Kind nicht mehr von den Antikörpern der Mutter geschützt ist und sein eigenes Abwehrsystem noch nicht optimal aufgebaut hat.

Wird als Berechnungsgrundlage eine englische Grafschaft (etwa 1 Million Einwohner) gewählt, kommen Leukämien in den begüterten Schichten ca. 10% häufiger vor als in den ärmsten. Werden die Berechnungen auf der Basis von Steuerbezirken zusammengefasst (durchschnittlich 5000 Einwohner), macht die Differenz zwischen den begüterten und den ärmsten Schichten in Schottland sogar bis zu 50% aus. Je kleiner und *homogener* die Bezirke gezogen sind, in denen die Sozialstrukturen klassifiziert werden, desto ausgeprägter sind die Unterschiede. Nach ähnlichem Muster verläuft auch der Vergleich zwischen ländlichen und innerstädtischen Gegenden und zwischen Wohnbezirken mit lockerer im Vergleich zu dichter Bebauung. In beiden Vergleichen ist die Erkrankungsrate im ersteren Falle signifikant höher. Diese Unterschiede müssen also berücksichtigt werden, wenn man die Häufigkeit von Leukämien in der Umgebung von Kernkraftwerken mit anderen Landesteilen vergleicht.

Weitere Faktoren für Leukämieentstehung

Weiterhin konnte landesweit gezeigt werden, dass Bevölkerungsbewegungen – insbesondere die Verschiebung von städtischen Bewohnern in ländliche Gebiete – mit einer deutlich erhöhten Rate von Leukämieerkrankungen in den Altersklassen von 1 bis 4 Jahren vergesellschaftet sind. Dies ist nur zum kleinen Teil durch die meist wohlhabendere Herkunft der häufigen Wohnungswechsler bedingt. Zusätzlich wurde nachgewiesen, dass sich in der Folge solcher Migrationen die Leukämien, aber auch andere kindliche Krebsleiden zeitlich und örtlich mehr häufen, als bei rein zufälliger Verteilung zu erwarten wäre.

Für dieses mit dem Begriff *Clustering* bezeichnete Phänomen gibt es noch keine Erklärung. Es ist jedoch nicht auf die Umgebung von Kernkraftwerken beschränkt. Die Forschung geht davon aus, dass zuvor isoliert lebende Kinder in empfindlichem Alter gehäuft neuen Infektionserregern ausgesetzt werden. Dies wird auch deutlich aus der Karte in Abbildung 6, die für jeden Landkreis in Deutschland das Risiko aufzeichnet, als Kind eine Leukämie zu erleiden. Je nach Bevölkerungsstruktur kann das Risiko bis zu 4-mal höher liegen, und dies keineswegs nur in Landkreisen mit einem Kernkraftwerk. Einzelne Landkreise erreichen dabei Häufigkeiten, die mit Korrektur für die Altersverteilung 250% des landesweiten Durchschnitts übertreffen.

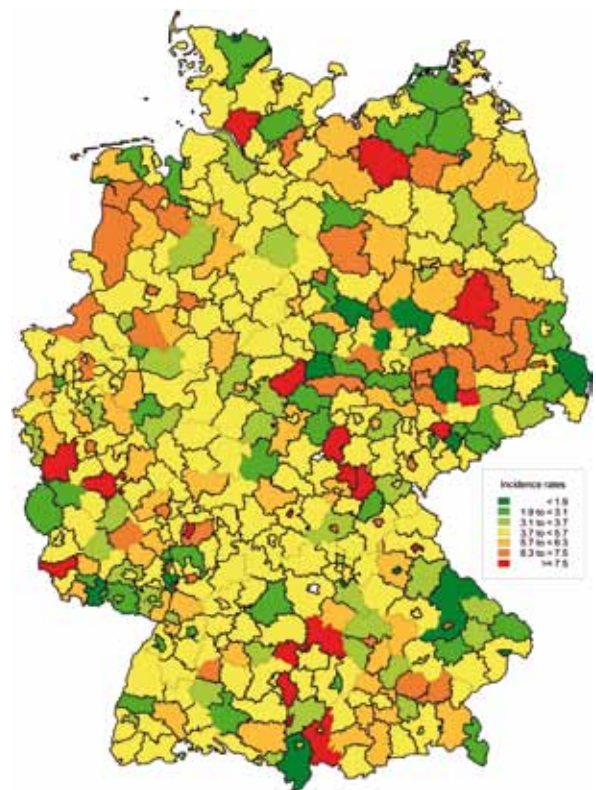


Abbildung 6: Karte mit allen deutschen Landkreisen. Die Farbabstufungen zeigen das jeweilige Risiko eines Kindes, an Leukämie zu erkranken.

Quelle: Kaatsch P., Mergenthaler A. (2008). Incidence, time trends and regional variation of childhood leukaemia in Germany and Europe. *Radiation Protection Dosimetry, Volume 132, Seite 107 – 113.*

Quellen

- Baker P., Hoel D. (2007). Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *European Journal of Cancer Care, Volume 16, Seite 355 – 363.*
- Elliot A. et al. (2006). The distribution of childhood leukaemia and other childhood cancers in Great Britain

1969 – 1993. COMARE Eleventh Report.
http://www.comare.org.uk/press_releases/documents/COMARE11thReport.pdf

- Laurier D., Bard D. (1999). Epidemiologic Studies of Leukemia among Persons under 25 Years of Age Living Near Nuclear Sites. *Epidemiological Reviews*, Volume 21, Seite 188 – 206.

6.5 Epidemiologische Studien zu anderen Ursachen

Vor diesem Hintergrund wird eine ganze Reihe von Beobachtungen plötzlich verständlich, die nach Sellafield über die letzten Jahrzehnte hinweg zusammengetragen wurden. Es erklärt das Paradox, dass in England, den USA und auch in Deutschland die Leukämiehäufigkeit auch in solchen Gegenden erhöht war, die für ein Kernkraftwerk im Planungsstadium zwar vorgesehen waren, wo jedoch nie eines gebaut wurde.

Bevölkerungsbewegungen als Erklärung

Bei der Wiederaufbereitungsanlage in Dounreay in Schottland mit einer zeitweise signifikant erhöhten Leukämierate der Umgebung fiel auf, dass diese Rate erst 10 Jahre nach der Inbetriebnahme der Anlage angestiegen war und seit Mitte der 90er-Jahre wieder scharf zurück ging. P. Kinlen, ein *Epidemiologe* des schottischen Krebszentrums, konnte dieses Phänomen glaubhaft auf die Bevölkerungsdurchmischung zurückführen, die in den Jahren zwischen 1980 und 1990 mit der Entdeckung der Ölfelder in der Nordsee und einer grossen Anzahl neuer Arbeitskräfte einherging. In all den ländlichen Gegenden, aus denen die Arbeiter rekrutiert worden waren und wohin sie monatlich aus den grossen Baustellencamps zu ihren Familien zurückkehrten, war ein deutlicher Anstieg der Leukämiehäufigkeit zu beobachten. Dazu gehörte auch die Gegend um Dounreay.

Ähnliches ereignete sich während des Zweiten Weltkrieges, als in England grössere Bevölkerungsbewegungen stattfanden: Während des Krieges wurden Kinder aus Grossstädten massenweise aufs Land in Sicherheit gebracht, um den Bombenangriffen zu entgehen. Auf den Inseln nördlich von Schottland, wohin Tausende von Militärangehörigen versetzt wurden, stieg die Häufigkeit der Kinderleukämie gar um das Vierfache. Nach dem Krieg, als die noch nicht demobilisierten Soldaten in wenig bewohnte Landstriche verlegt worden waren, stiegen dort die Leukämieraten signifikant. Um dieselbe Zeit wurden in

verschiedenen Gebieten Neugründungen von Städten mit 100'000 Einwohnern aus dem Boden gestampft. Städte, die ihre Einwohner aus den zerstörten Zentren von London und Manchester bezogen, zeigten keine erhöhte Leukämierate. Dagegen war die Krankheit in Städten um neuerstellte Industrieanlagen, in denen sich Arbeitskräfte aus den Landbezirken sammelten, deutlich gehäuft.

Leukämiecluster belegen These

Am eindrucklichsten bestätigte sich dieses Phänomen in Hongkong, wo in einem gut organisierten Gesundheitssystem etwa 10 Millionen Zuwanderer aus dem nahen Rotchina in neue Siedlungen strömten. Überall dort war die Häufigkeit der Leukämie bei Kindern signifikant erhöht. Auch das Auftreten anderer *Leukämiecluster* passt gut in dieses Bild. In den USA gab es grossen Aufruhr um die Häufigkeit von Leukämieerkrankungen in Fallon (Nevada), einer entlegenen Fliegerbasis aus dem Zweiten Weltkrieg, die 1996 zu einem grossen Schulungszentrum umgebaut wurde. Über 50'000 Soldaten wurden jährlich in diese Stadt von 8'000 Einwohnern einquartiert, was die Leukämiehäufigkeit auf das Zwölfwache ansteigen liess. Jahrelang wurde nach radioaktiven oder *toxischen* Substanzen gesucht, um das Phänomen zu erklären. Das Zusammenkommen von vielen Familien in einer abgelegenen Gegend erklärt schon zur Genüge, dass die Leukämiehäufigkeit deutlich über dem Landesdurchschnitt liegt. Ganz ähnlich lassen sich auch Berichte um erhöhte Leukämieraten um Hochspannungsleitungen in Schweden erklären. Diese werden zumeist nicht durch bewohnte Gebiete gelegt, sondern häufig nachträglich überbaut, so dass die Bewohner überdurchschnittlich viele Zuwanderer aufweisen.

Quellen

- Kinlen L. (1995). Epidemiological evidence for an infective basis in childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, Volume 71, Seite 1 – 5.

7 Zusammenfassung

7.1 Beurteilungen und Folgerungen

Das Auftreten einer Leukämie bei einem Kind ist für die Familie ein schwerer Schicksalsschlag, ungeachtet der deutlich verbesserten Behandlungsmöglichkeiten. Aber auch für die Umgebung ist es erschreckend zu beobachten, wie ein kerngesundes Kind innerhalb kurzer Zeit

offensichtlich lebensgefährlich erkrankt. Es ist daher verständlich, dass ein scheinbar gehäuftes Auftreten dieser Erkrankung weitherum grosse Emotionen schürt. Seit der Errichtung öffentlicher Gesundheitsdienste vor etwa 100 Jahren kennt die Medizingeschichte derartige gehäufte Krankheitsfälle, für die jeweils mit grossem Aufwand und viel Anteilnahme, aber mit regelmässig wenig Erfolg eine Ursache gesucht wurde.

Erst in neuerer Zeit haben über grosse Gebiete ausgedehnte und auf langzeitliche Statistiken beruhende *epidemiologische Studien* aufgezeigt, dass Leukämie nicht zufällig gestreut vorkommt, sondern eine Tendenz hat, sich unregelmässig zu verteilen, so wie die Wassertropfen auf einem gut imprägnierten Regenmantel. Die Gründe dafür sind unbekannt. Mit Sicherheit kann aber vorausgesagt werden, dass auch in Zukunft erschreckende Meldungen über derartige Häufungen die Runde machen und je nach Voreingenommenheit mit verschiedenen ursächlichen Vermutungen verknüpft sein werden.

Das Wesentliche nicht aus den Augen verlieren

Gerade in einer emotional aufgeladenen Atmosphäre ist es wichtig, die wesentlichen Eigenschaften einer Krankheit dabei nicht aus den Augen zu verlieren. Während Krebserkrankungen über die gesamte Lebensdauer kontinuierlich zunehmen, gibt es einzelne Tumore, die bei Kindern häufiger vorkommen. Dazu gehört neben Störungen der Organentwicklung und des Wachstums auch die *akute lymphatische Leukämie*, die vor allem im Alter zwischen 1 und 5 Jahren auftritt. Lymphatische Blutzellen, die sich bei dieser Art der Leukämie unkontrolliert vermehren, sind verantwortlich für die Produktion von Antikörpern, eines der wichtigsten Mechanismen unserer Immunabwehr. Als Antwort auf einen neuen, erstmals begegneten Infektionserreger werden sie in jungen Jahren zu massiver Zellteilung stimuliert und beginnen anschliessend mit der Produktion von schützenden Antikörpern. In späteren Jahren sind sie bereits in genügender Zahl vorhanden und für ihre Aufgabe gerüstet. Sie können sogleich mit ihrer Abwehrfunktion einsetzen. Das ist der Mechanismus der altbekannten Kinderkrankheiten. Bei vorbestehendem genetischem Defekt kann diese Erststimulation eine unkontrollierte Vermehrung auslösen. Daher tritt diese Krankheit am häufigsten in dieser Altersgruppe auf.

Theorie zu Risikofaktoren überzeugt

Nun aber bekommt jedes Neugeborene von seiner Mutter einen Vorrat an Antikörpern mit auf den Lebensweg, der für eine Dauer von bis zu einem Jahr vor derartigen Infektionen Schutz bietet. Infekte in dieser Lebensphase können ohne massive Stimulation des Immunsystems in milder Form beherrscht werden. Daher vermag die Theorie zu überzeugen, dass die *akute lymphatische Leukämie* der Kleinkinder die Konsequenz einer verspäteten Begegnung

mit den häufig vorkommenden Viren und Bakterien sein könnte – und zwar nicht im frühen Säuglingsalter, sondern ohne den mütterlichen Schutzschirm im Kleinkindesalter.

Diese Ansicht wird durch verschiedene, *epidemiologische* Beobachtungen zusätzlich gestützt. So kommen Kinderleukämien seltener bei ärmeren Bevölkerungsschichten in beengten städtischen Wohnverhältnissen vor. Sie treten deutlich seltener auf, wenn die Kinder schon in frühen Monaten in Kinderhorten untergebracht werden. Umgekehrt sind sie in Vorstadtgebieten und auf dem Lande häufiger, wo die Kontaktmöglichkeiten spärlicher sind und die Infektionen später übertragen werden. Als ganz besonders riskant und zu einer zeitlichen Häufung führend hat sich eine Bevölkerungsbewegung erwiesen, die zuvor abgeschottete Familien einer Vielzahl von neuen Infektionserregern aussetzt. So stieg zum Beispiel die Häufigkeit der Kinderleukämie auf den Inseln nördlich von Schottland mit dem Betrieb der Marinestützpunkte im Zweiten Weltkrieg um fast das Vierfache.

Genetische Komponente ist Vorbedingung für Leukämie

Natürlich erklärt dieser Mechanismus allein nicht das gesamte Auftreten der Kinderleukämie. Sie bleibt glücklicherweise selbst bei erhöhten Risiken eine seltene Erkrankung. Ihr Ausbrechen hängt von weiteren, zellbiologischen Fehlentwicklungen ab. Dabei muss eine genetische Komponente von Geburt an vorhanden sein. Dies zeigt die Erfahrung, dass bei der Erkrankung eines Zwillings das Leukämierisiko für den anderen Zwillings um das Zwanzigfache steigt. Mit den heutigen Methoden der Molekularbiologie lassen sich diese Vorstufen der Leukämiekrankheit nachträglich in Laborproben des Nabelschnurblutes in Einzelfällen nachweisen.

Weil diese Krankheit so selten und fleckenweise auftritt, wird es immer wieder Berichte von Häufungen geben, nicht nur in der Umgebung von Kernkraftwerken. In den weitaus meisten Fällen handelt es sich dabei um ein reines Zufallsergebnis. Die Aussage, dass die Häufung statistisch signifikant ist, bedeutet keineswegs, dass die vermutete Ursache nun auch endgültig bewiesen sei. Damit ist nur gesagt, dass bei völlig zufälliger Verteilung nur in 1 von 20 Untersuchungen ein derartiges Resultat auftreten sollte. Da aber die Verteilung der Krankheitsfälle nicht gleichmässig ist, können sogar deutlich mehr «signifikante» Resultate erwartet werden. Sie müssen jeweils einzeln auf die bekannten Risikofaktoren wie Bevölkerungsdichte, Sozialstatus und Wanderungsbewegung abgeklärt werden, bevor man sie als Ausdruck eines neuen Risikos wertet. Leider ist der Einfluss dieser Risikofaktoren zu wenig exakt zu bestimmen, um präzise mathematische Korrekturen an den beobachteten Häufigkeiten zu ermöglichen. Die

beste Sicherheit bietet daher eine erneute Erhebung der Daten in der folgenden Zeitperiode: Zufallsresultate und Wanderungsbewegungen werden sich in einer Folgestudie abschwächen oder ganz verschwinden.

Objektive Kriterien zur Bewertung anwenden

Was kann man als interessierter oder besorgter Staatsbürger in dieser von Unsicherheit geprägten Situation noch für glaubwürdig halten? Auch wenn man selbst nicht ausgebildeter *Epidemiologe* oder Strahlenphysiker ist, kann man die vielen Berichte und Studien zumindest anhand objektiver Kriterien bewerten. So sollte man zunächst nach der Quelle der Arbeit fragen. Wissenschaftliche Zeitschriften von Rang publizieren keinen Artikel, der nicht von Fachleuten genau geprüft und als methodisch einwandfrei befunden wurde. Dieser sogenannte *Peer-Review* ist ein Qualitätsstempel, auf den man vertrauen darf, denn nicht nur das Vorgehen, sondern auch die Angemessenheit der Schlussfolgerungen ist von unabhängiger Seite geprüft und akzeptiert worden. Wenn hingegen in einer neuen Studie keine Quelle einer renommierten wissenschaftlichen Zeitschrift oder anderen Publikation erscheint, ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass die Verfasser mit ihrer Arbeit der Fachkritik nicht standgehalten haben oder aber diese bewusst vermeiden wollten.

Gradmesser für Glaubwürdigkeit der Studien

Eine besondere Glaubwürdigkeit verdienen Berichte, denen nicht eine einmalige Erhebung, sondern ein kontinuierliches Überwachungs-Programm um die Kernkraftwerke zugrunde liegt. Sie sind weniger dem Zufall unterworfen, beschreiben einen längeren Zeitraum und benutzen eine konstante, standardisierte Methodik. Auch landesweite Übersichten und zusammenfassende Statistiken sind vertrauenswürdiger als Einzelfälle, die gerne wegen ihrer teils willkommenen Auffälligkeit aus dem vorhandenen Material herausgepickt werden. Der Risikovergleich mit dem Landesdurchschnitt sollte immer angegeben werden, auch wenn der primäre Vergleich mit einer Region gerechnet wurde, die nach irgendwelchen Kriterien dem Gebiet um das Kernkraftwerk besonders «ähnlich» zu sein scheint. Und generell skeptisch sollte man sein, wenn keinerlei Absolutzahlen berichtet werden. Eine Risikoerhöhung um 70% scheint zunächst eindrücklich zu sein. Erfährt man aber, dass dort im besagten Zeitraum 5 Kinder statt der erwarteten 3 erkrankt waren, so relativiert sich diese Aussage deutlich.

Ein Gradmesser für die Glaubwürdigkeit ist auch, auf welche Art und Weise die Schlussfolgerungen präsentiert werden. Wissenschaftler wollen vermeiden, dass ihnen ein Kollege mit neueren Methoden oder besseren Überlegungen einen Fehler nachweisen kann. Sie sind daher meist vorsichtig und abwägend in ihren Schlussfolgerungen.

Werden die Resultate ohne Vergleich mit früheren Befunden als endgültig und zwingend dargestellt und gar sofortige Aktionen und politische Schritte gefordert, ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass die politischen Interessen grösser sind als die wissenschaftliche Genauigkeit. Eine abwägende Beurteilung mit Diskussion der bekannten Risikofaktoren zeichnet eine überzeugende Studie aus. Jegliche Erklärungsversuche und Begründungen, die dem akzeptierten Stand der Wissenschaft und bisherigen Erfahrungen zuwiderlaufen, müssen besonders kritisch geprüft werden.

7.2 Schlussbetrachtungen

Welche Schlussfolgerungen sind aus den gesammelten Daten zu ziehen? Die Gesamtheit der Studien zeigt, dass eine Nachbarschaft zu einem Kernkraftwerk generell kein erhöhtes Leukämierisiko bedeutet. An den meisten Kraftwerkstandorten war entweder nie eine Häufung von Leukämiefällen feststellbar, oder sie liess sich bei weiterer Beobachtung nicht bestätigen. An einzelnen Standorten sind vermehrt Krankheitsfälle aufgetreten, doch deren absolute Anzahl liegt in einem Bereich, der sich auch bei anderen Risiken findet: Wohlhabende Lebensumstände, grosszügige Wohnverhältnisse und eingeschränkter Kontakt zu anderen Kleinkindern.

Es ist ein Trugschluss, die radioaktiven Emissionen eines Kernkraftwerkes für das Risiko einer Leukämieerkrankung verantwortlich zu machen. Würde nämlich der Entstehungsmechanismus der Krankheit über die *ionisierende* Strahlung laufen, müsste sich auch die erhöhte Radioaktivität aus natürlichen Quellen in grösseren Zahlen der Kinderleukämieerkrankungen niederschlagen. Die bekannten strahleninduzierten Tumoren bei Erwachsenen dürften dabei nicht ausgespart bleiben. Und auch die bekannten Reaktorunfälle mit Auswirkungen auf die Umgebung oder die erhöhte *C-14-Belastung* während der Kernwaffenversuche der 50er- und 60er-Jahre führten in keinem Fall zu einer Erhöhung der Leukämiehäufigkeit, die entsprechend den Proportionen hätte immens ausfallen müssen.

Rationale Auseinandersetzung ist hilfreich

Nach Sellafield wurde die Fragestellung zu einer möglichen Korrelation zwischen Strahlung und Kinderleukämie mit grossem Aufwand und Beharrlichkeit studiert und aufgearbeitet. Viele der neueren Erkenntnisse – der Einfluss verspätet auftretender Infektionen, die Risiken der Wanderungsbewegungen und das landesweite Auftreten der Kinderleukämie in *Clustern* – wurden bei diesen Untersuchungen zunächst vermutet und dann durch breit

angelegte, *epidemiologische Studien* gesichert. Auch wenn die anfänglichen Ängste nicht berechtigt waren, haben sie uns weiter gebracht im Verständnis dieser Krankheit. Ein Beispiel dafür, dass die rationale Auseinandersetzung mit einem Phänomen weiterführt als ideologisches Beharren auf einer vorgefassten Meinung.

Bei der Entscheidung, welche Rolle der Kernkraft zukünftig in unserer Gesellschaft zukommt, müssen viele verschiedene Aspekte sorgfältig abgewogen werden: Die Versorgungssicherheit, die Kosten, die Langzeitrisiken eines Tiefenlagers und vor allem auch die Frage, in welchem Zeitraum unsere Gesellschaft eine Umstellung ihrer Gewohnheiten noch spannungsfrei bewerkstelligen kann. Für all diese Fragen müssen die Entscheidungsträger und jeder verantwortungsvolle Bürger eine akzeptable Antwort finden. Gehört die Kinderleukämie zu den Überlegungen, welche diese Entscheidung beeinflussen sollen? Als Verfasser dieser Broschüre sind wir der Meinung, dass sie als direkte Auswirkung des Betriebs von Kernkraftwerken zu wenig gesichert ist. Und auch an den wenigen Orten, wo der Verdacht nicht eindeutig widerlegt werden konnte, ist das Risiko gering gegenüber dem Einfluss anderer, verbreiteter Lebensumstände. Wir halten es deshalb für unangebracht, derart wichtige politische Entscheidungen von nur wenig erhärteten Vermutungen abhängig zu machen.

8 Anhang

8.1 Glossar

A

Aerosol: Mischung von festen und/oder flüssigen Schwebeteilchen mit einem Gas (z.B. Feinstaub in der Luft).

Aeroradiometrie: Messung der Boden-Radioaktivität mittels Helikopter.

Akute lymphatische Leukämie (ALL): Leukämien sind Krebserkrankungen der Blutzellen, bei denen es zu einer ungebremsten Vermehrung der weissen Blutkörperchen kommt. Die akute lymphatische Leukämie ist eine Leukämie, die von bösartig entarteten Vorläuferzellen der Lymphozyten ausgeht.

Akute myeloische Leukämie (AML): Bei der akuten myeloischen Leukämie entarten die myeloischen Zellen, das heisst Vorläuferzellen von Granulozyten und Monozyten im Knochenmark.

Alpha-Strahlen: Schnell fliegende Helium-Atomkerne. Sie bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen. In der sub-atomaren Welt sind es riesige Geschosse, die überall anecken. Ihre Reichweite in der Luft beträgt etwa einige Zentimeter. Sie werden von einem Blatt Papier vollständig zurückgehalten. Im biologischen Gewebe *ionisieren* sie sehr dicht auf einer kurzen Spur (kürzer als 1/10 Millimeter).

Ankylose: Versteifung eines oder mehrerer Gelenke durch einen Krankheitsprozess.

Apoptose: Programmierter Zelltod: gewissermassen «Selbstmord» einer einzelnen Zelle durch äusseren Einfluss (z.B. durch Immunzellen) oder bei starker Schädigung der Erbinformation.

B

Benzol (engl. Benzene): Krebserregender, aromatischer Kohlenwasserstoff.

Beta-Strahlen: Schnell fliegende Elektronen. Ihre Reichweite beträgt in der Luft einige Meter und im Wasser einige Millimeter.

C

C-14: Kohlenstoff-14. Der übliche Kohlenstoff ist C-12. Sein Atomkern besteht aus 6 Protonen + 6 Neutronen. Durch Bestrahlung von Stickstoff der Luft mit Neutronen (aus der Sonne, aus Atomexplosionen oder einem Kernreaktor) entsteht C-14, eine radioaktive Form des Kohlenstoffs. Der Atomkern besteht aus 6 Protonen und 8 Neutronen. C-14 zerfällt langsam und sendet dabei einen wenig energetischen *Beta-Strahl*.

Chemotherapie: Medikamentöse Behandlung zur Bekämpfung einer Krebserkrankung.

Chromosom: Mikroskopische Strukturen in den Zellkernen, in welchen die Erbsubstanz DNS verpackt ist. Die menschlichen Zellen enthalten 46 Chromosomen.

Cluster – Clustering: (Engl., Die Traube, das Büschel) Eine eng zusammenliegende Gruppe von Punkten oder Einheiten wird als Cluster bezeichnet, wenn noch kein bekannter Mechanismus für die Anhäufung verantwortlich gemacht werden kann. So spricht man in der Astronomie von Sternclustern, in der Marktforschung von Clustern der Nachfrage, in der *Epidemiologie* bei zeitlich und örtlich zusammenfallenden Erkrankungen von Clustern.

Confidence-Intervall: Angabe der statistischen Genauigkeit, mit der ein Verhältnis (zum Beispiel ein Risiko) aufgrund der vorliegenden Zahlen berechnet werden kann. Üblicherweise wird ein tieferer und ein höherer Wert so angegeben, dass das wirkliche Risiko mit 95% Sicherheit dazwischen liegt.

D

Deterministisch: Nach genauen Regeln vorhersagbar. Beispiel: Ausgedehntes Sonnenbaden führt je nach Dauer, Witterung, Höhenlage und individueller Empfindlichkeit zu weniger oder mehr Sonnenbrand mit Rötung, Abschälen der Haut und evtl. Blasenbildung. Diese Reaktion ist voraussagbar und kann mit Erfahrung so geplant werden, dass es nicht zu schmerzhafter Rötung kommt. Im Gegensatz dazu: *Probabilistisch.*

Dosimeter: Gerät zur Messung der Strahlendosis.

Down-Syndrom (Trisomie 21): Gen-Mutation beim Menschen, bei welcher das Chromosom 21 in 3-facher Kopie vorliegt.

E

Elektromagnetische Felder/Wellen: Dazu zählen beispielsweise die Radiowellen, der Radar, die Mikrowellen, das sichtbare Licht, das Infrarot-Licht, das Ultraviolett-Licht, die Röntgenstrahlen oder die *Gammastrahlen*.

Enzym (veraltet: Ferment): Ein Eiweisskörper, der biochemische Reaktionen steuern kann.

Epidemie: Zeitlich und örtlich gehäuftes Auftreten einer Krankheit. Beispielsweise Infektionskrankheiten wie die Pest traten epidemisch auf, da die Übertragungswege günstig und die Menschen nicht immun waren. Aber auch bei nicht übertragbaren Krankheiten sprechen wir von Epidemien. Zurzeit bewirkt das Zusammentreffen von Fernsehen, Popcorn und Rolltreppen eine Epidemie von Übergewicht unter den Jugendlichen.

Epidemiologie – epidemiologische Studien: Wissenschaft, aus den Einzelfällen der Krankheiten ein gehäuftes Auftreten, die besonders betroffenen Patientengruppen und möglicherweise Ursachen für die bestimmte Krankheit herauszufinden. Dies beinhaltet die genaue Umschreibung eines Krankheitsfalles, die exakte Zählung und Auswahl einer passenden Bezugsgrösse zum Vergleich. Wird dies für eine bestimmte Fragestellung optimiert und ausgeführt, sprechen wir von einer epidemiologischen Studie.

Epizentrum: Lage auf der Erdoberfläche vertikal unterhalb des Bombenexplosionpunktes.

F

Fall-Kontroll-Studie: Eine *epidemiologische Studie*, bei der eine, aber bewusst zufällig ausgewählte Gruppe als Bezugsgrösse dient. Für seltene Krankheiten ist der Vergleich mit der Durchschnittsbevölkerung, insbesondere wenn exakte Details studiert werden, unpraktikabel. Ein Vergleich mit beispielsweise den Geschwistern der Erkrankten wird

kaum erlauben, ein spezifisches Risikoverhalten wie z.B. eine Mangelernährung zu erkennen. Wenn ich aber zufällig aus dem Telefonbuch gleichaltrige Personen befrage, kann ich bald feststellen, welche hauptsächlichsten Unterschiede zu den Erkrankten bestehen.

Fluoreszieren: «Gespeichertes Licht», welches verspätet zurückstrahlt. Stoffe, deren Moleküle durch Licht energetisch angeregt werden und bei der Rückkehr zum Normalzustand Licht aussenden, heissen Fluoreszenz-Farbstoffe.

G

Gammastrahlen: *Elektromagnetische Wellenpakete* wie Röntgenstrahlen, jedoch energetischer und durchdringender. Sie erreichen in der Luft einige 100 Meter und im Wasser bis etwa ein halber Meter.

Geiger-Müller-Zähler: Dosimeter, das einzelne Teilchen oder *Gamma-Quanten* zählt.

Genese: Als Genese wird in der Medizin die Ursache einer Störung bezeichnet. Beim Down-Syndrom zum Beispiel ist bekannt, dass 3 Kopien des *Chromosoms 21* die Erkrankung verursachen, dies ist aber erst eine Veränderung innerhalb der Genese.

Graphit: Form des Kohlenstoffes, die z.B. in Bleistiftminen zur Anwendung kommt. Wird als Neutronenbremser (Moderator) in gewissen Nuklearreaktoren (Leichtwasserreaktoren) benützt.

H

Homogen: Gleichförmig, ohne innere Unterschiede. Milch ist anfänglich homogen, bei längerem Stehenlassen setzt sich der Rahm oben ab, was sich durch homogenisieren, d.h. Verkleinern der Fetttropfchen verlangsamen lässt.

Hot-Spot-Gebiete: Orte mit lokaler Anhäufung der Radioaktivität.

I

Ionisieren: Herausreissen von Elektronen aus Atomen oder Molekülen.

Isotope: Atome des gleichen chemischen Elements (gleiche Anzahl Protonen im Kern), die sich nur durch eine andere Anzahl Neutronen im Kern unterscheiden. Zum Beispiel C-12 und C-14 sind Isotope des Kohlenstoffes.

K

Kardiovaskuläre Erkrankungen: Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems.

Karzinome: Krebsartige Erkrankung von Haut, Schleimhaut oder Drüsengewebe.

Kohorte – Kohortenstudie: Als Kohorte wird eine namentlich bekannte Gruppe bezeichnet, die über einen längeren Zeitraum verfolgt wird. Zu Beginn der *AIDS-Epidemie* wurde eine Gruppe von Neuerkrankten zu regelmässigen Kontrollen verpflichtet. So konnten die Überlebenszeit, die geläufigsten Todesursachen und häufigsten Komplikationen exakt abgeschätzt werden. Im Gegensatz dazu: *Populationsstudien*.

Kontamination: Verseuchung mit radioaktiven Substanzen.

Krebsinzidenz – Inzidenz: Als Inzidenz wird die Häufigkeit des Auftretens über einen bestimmten Zeitraum in Bezug auf die Bevölkerung bezeichnet. Motorradfahrer haben eine hohe Inzidenz von Knieverletzungen, je 100 Motorradbesitzer erleben jährlich 3 ein solches Missgeschick. Die Krebsinzidenz für die meisten Organe nimmt mit zunehmendem Alter deutlich zu.

L

Latenzzeit – Latenz: Als Latenz bezeichnet man die Zeitspanne zwischen der Einwirkung der Ursache und der erstmaligen Manifestation der Krankheit. Brustfellkrebs oder Mesotheliom kann noch nach einer Latenzzeit von über 20 Jahren nach dem letzten Einatmen von Asbeststaub auftreten.

Lymphatisches System: Teil des Abwehrsystems (Immunsystems) des Körpers, soll das Eindringen von Krankheitserregern, von Fremdpartikeln und krankhaft veränderten Körperbestandteilen verhindern.

M

Metastase: Tochtergeschwulst einer bösartigen Erkrankung.

Metastudie – Metaanalyse: Eine Metastudie ist die Zusammenfassung mehrerer, einzeln geplanter und publizierter Studien. Wenn in der PISA-Untersuchung die Lernerfolgsquote in verschiedenen Ländern verglichen wird, entspricht dies einer Metastudie. Die Metaanalyse ist das dabei angewendete Rechenverfahren, das meist graphisch das individuelle Resultat, aber auch das Gewicht der einzelnen Studie im Vergleich mit dem Gesamtergebnis darstellt.

Millisievert: 1/1000 von 1 Sievert. Die mittlere Strahlenbelastung der Bevölkerung beträgt 4 Millisievert (mSv) pro Jahr.

Morbus Bechterew: siehe *Spondylitis ankylosans*.

Mutation: Veränderung des Erbgutes.

N

Nukleinsäuren: Grosse ‚Biomoleküle‘, Speicher der Erbinformationen. Der bekannteste Vertreter ist etwa die *Desoxyribonukleinsäure (DNA)*.

P

Peer-Review: Als Peer-Review bezeichnet man die kritische Prüfung zur Qualitätskontrolle und Wertung durch Fachkollegen.

Pestizid: Chemische Substanzen, welche lästige oder schädliche Lebewesen (z.B. Insekten) beseitigen.

Populationsstudie: Als Populationsstudie wird eine Untersuchung bezeichnet, die eine Krankheit oder ein Verhalten in einer definierten Gruppe beschreibt, ohne darauf Rücksicht zu nehmen, dass sich die Gruppe selbst in ihrer Zusammensetzung ändern könnte. In einem Gymnasium werden jährlich im Durchschnitt 6% nicht versetzt, dies entspräche einer Populationsstudie. Die exaktere Beschreibung, dass von 100 neueingetretenen Gymnasiasten 20 eines der ersten beiden Jahre repetieren müssen, 5 einen der folgenden 3 Jahreskurse und 15 die Schule ohne Matura verlassen, entspräche einer *Kohortenstudie*.

Präleukämische Veränderung: Vorstufe einer definitiven krebsartigen leukämischen Veränderung.

Probabilistisch: Ein Verhalten, das nicht zwingend für den Einzelfall, nur mit einer generellen Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden kann. Beispiel: *Hautkarzinome* treten vorwiegend am Kopf, den Händen – also den unbedeckten Stellen des Körpers – auf, Fischer, Bauern und Solariumsbesucher sind mehr befallen als Durchschnittsbürger. Es ist daher einleuchtend, dass die UV-Strahlung der Sonne ursächlich ist. Dennoch kann im Einzelfall nicht vorausgesagt werden, wer nach wie viel Sonnenbestrahlung ein *Hautkarzinom* entwickeln wird. Im Gegensatz dazu: *Deterministisch*.

R

Radiographie: Momentanes Röntgenbild auf fotografischem Film.

Radioscopie: Lebendiges Röntgenbild auf dem Bildschirm.

Radium: Natürliches Element Nr. 88. Ist ein Folgeprodukt des *Urans*.

Radon: Natürliches Element Nr. 86. Es entsteht als Folgeprodukt des *Radiums* oder des *Thoriums*. Da Radon ein Gas ist, dringt es durch die Risse der Erdkruste und kann sich in Parterre-Wohnräumen und Kellern ausbreiten. Die Folgeprodukte des Radons, die selber radioaktiv sind, erteilen der Lunge bei der Einatmung des Gases eine Strahlendosis.

Regressionsanalyse: Eine Regressionsanalyse ist ein mathematisches Ausgleichsverfahren, um aus schwankenden oder nicht präzise zu messenden Werten die wahrscheinlichsten Zahlen zu gewinnen. Das Vorgehen dabei ist ähnlich dem eines Ingenieurs, der in hügeligem Gelände eine

gleichmässig ansteigende Strasse bauen will, ohne am Ende Aushub zu viel oder Aufschüttmaterial zu wenig zu haben. Dass die Strasse gleichmässig ansteigen soll, ist im Auftrag festgelegt. In der Beobachtung muss für eine Regressionsanalyse eine mathematische Modellvorstellung vorausgesetzt werden, an die die Zahlen so gut wie möglich angepasst werden.

Repräsentativ: Typisch, dem allgemeinen Durchschnitt einer Gruppe entsprechend. Beispiel: In seinem weissen Hemd, dunklem Anzug und dezenter Krawatte war Herr Muster repräsentativ für einen erfolgreichen Steuerberater.

Risikofaktor

– Medizinisch: mögliche Teilursache. Beispielsweise sind Rauchen und Übergewicht Risikofaktoren für einen Herzinfarkt.

– Physikalisch: Wahrscheinlichkeits-Koeffizient. Zum Beispiel 5% pro Sievert.

S

Sarkom: Bösartiger Tumor (Krebs), der vom Bindegewebe oder Stützgewebe (Mesoderm) ausgeht.

Spondylitis ankylosans/Morbus Bechterew: Chronische rheumatische Entzündung mit Versteifung von Gelenken (hier: besonders der Wirbelsäulengelenke).

T

Toxisch: Giftig.

Tritium-Verarbeitungsindustrie: Leuchtschrift-Verarbeitung, die früher *Radium* nutzte.

U

Uran: Natürliches Element Nr. 92. Schwermetall das üblicherweise überall in der Erdkruste vorhanden ist. In jeder Handvoll Erde befinden sich zahlreiche Uranatome. Uran ist leicht instabil und zerfällt radioaktiv. *Radium* und *Radon* sind u.a. Folgeprodukte des Uranzerfalls.

Z

Zellorganellen (mehrdeutiger Begriff, eigentlich «Orgänchen»): Spezialisierte Abteile innerhalb einer Zelle, wie z.B. Zellkern, Mitochondrien.

Zerfallsprodukt: Auch Folgeprodukt oder Tochterprodukt genannt. Nach dem radioaktiven Zerfall eines instabilen Atomkerns entsteht ein neuer Atomkern, der stabil oder instabil sein kann. Das ist das Zerfallsprodukt. Wenn es instabil ist, zerfällt es selber weiter. Beim Zerfall des *Urans* entsteht eine lange Serie von Zerfallsprodukten, die erst beim stabilen Blei aufhört.

8.2 Weiterführendes Quellenverzeichnis

8.2.1 Allgemeine Grundlagen

Strahlenbiologie und Strahlenschutz:

- Annals of the ICRP Vol. 37/2-4 (2007). ICRP Publication 103. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2.
- Hall E.J., Giaccia A.J. (2006). Radiobiology for the Radiologist. Edition: 6. Lippincott, Williams & Wilkins.
- Smith J. and Beresford N.A. (2005). Chernobyl: Catastrophe and consequences. Springer-Verlag, ISBN 3-540-23866-2.
- US National Research Council, BEIR VII Report (2006) (BEIR = Biological Effects of Ionising Radiation) Phase 2: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionising Radiation. Chapter 6: Atomic Bomb Survivor Studies.

Kinderleukämie:

- Alexander F.E., Boyle P., Carli P.-M. et al. (1999). Population density and childhood leukaemia: results of the EUROCLUS Study. European Journal of Cancer, Volume 35, Seite 439 – 444.
- Caughey R.W., Michels K.B. (2009). Birth weight and childhood leukemia: a meta-analysis and review of the current evidence. International Journal of Cancer, Volume 124, Seite 2658 – 70.
- Interdisziplinäre Leitlinie der Deutschen Krebsgesellschaft und der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie: Akute lymphoblastische (ALL) und akute myeloische (AML) Leukämie im Kindesalter: <http://www.uni-duesseldorf.de/awmf/II/025-014.htm>
- Kabuto M., Nitta H., Yamamoto S., Yamaguchi N., Akiba S., Honda Y., Hagihara J., Isaka K., Saito T., Ojima T., Nakamura Y., Mizoue T., Ito S., Eboshida A., Yamazaki S., Sokejima S., Kurokawa Y., Kubo O. (2006). Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. International Journal of Cancer, Volume 119, Seite 643 – 650.
- Michaelis J., Schüz J., Meinert R., Menger M., Grigat J.P., Kaatsch P., Kaletsch U., Miesner A., Stamm A., Brinkmann K., Kärner H. (1997). Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. Cancer Causes & Control, Volume 8, Seite 167 – 174.

- McNally R.J., Eden T.O. (2004). An infectious aetiology for childhood acute leukaemia: a review of the evidence. *British Journal of Haematology*, Volume 127, Seite 243 – 263.
- Reynolds T. (1998). Causes of childhood leukemia beginning to emerge. *Journal of the National Cancer Institute*, Volume 90, Seite 8 – 10.
- Stiller C.A., Kroll M.E., Boyle P.J., Feng Z. (2008). Population mixing, socioeconomic status and incidence of childhood acute lymphoblastic leukaemia in England and Wales: analysis by census ward. *British Journal of Cancer*, Volume 98, Seite 1006 – 1011.
- UK Childhood Cancer Study Investigators. (1999). Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. *Lancet*, Volume 354, Seite 1925 – 1931.
- Wakeford R., Little M.P. (2003). Risk coefficients for childhood cancer after intrauterine irradiation: a review. *International Journal of Radiation Biology*, Volume 79, Seite 293 – 309.

Statistik und Epidemiologie:

- Fletcher R. & S. (2007). *Klinische Epidemiologie*. H. Huber Verlag Bern.

8.2.2 Die wichtigsten epidemiologischen Studien im Überblick

Sellafield: Black D. (1984). Investigation of the possible increased incidence of cancer in West Cumbria. HMSO.
 Bihell J. et al. (1994). Distribution of childhood leukaemias and non-Hodgkin's lymphomas near nuclear installations in England and Wales. *British Medical Journal*, Volume 309, Seite 501 – 505.

Dounreay: Sharp L. et al. (1996). Incidence of childhood leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma in the vicinity of nuclear sites in Scotland, 1968 – 93. *Occupational and Environmental Medicine*, Volume 53, Seite 823 – 31.

La Hague: Viel J. et al. (1993). Childhood Leukemia Incidence in the Vicinity of La Hague Nuclear-Waste Reprocessing Facility (France). *Cancer Causes & Control*, Volume 4, Seite 341 – 343.
 Guizard A. et al. (2001). The incidence of childhood leukaemia around the La Hague nuclear waste reprocessing plant (France): a survey for the years 1978 – 1998. *Journal of Epidemiology and Community Health*, Volume 55, Seite 469 – 474.

Krümme: Grosche B. et al. (1999). Leukaemia in the vicinity of two tritium-releasing nuclear facilities: a comparison of the Krümme Site, Germany and the Savannah River Site, South Carolina, USA. *Journal of Radiological Protection*, Volume 19, Seite 243 – 252.

Schweden: Waller L. et al. (1995). Detection and assessment of clusters of disease: An application to nuclear power plant facilities and childhood leukemia in Sweden. *Statistics in Medicine*, Volume 14, Seite 561 – 564.

Frankreich: Hatchouel J. et al. (1995). Leukaemia mortality around French nuclear sites. *British Journal of Cancer*, Volume 71, Seite 651 – 653.

Kanada: McLaughlin J. et al. (1993). Childhood leukemia in the vicinity of Canadian nuclear facilities. *Cancer Causes & Control*, Volume 4, Seite 51 – 58.

USA: Jablon S. et al. (1991). Cancer in populations living near nuclear facilities. A survey of mortality nationwide and incidence in two states. *Journal of the American Medical Association*, Volume 265, Seite 1403 – 1408.

Japan: Yoshimoto Y. et al. (2004). Research on potential radiation risks in areas with nuclear power plants in Japan: Leukaemia and malignant lymphoma mortality between 1972 and 1997 in 100 selected municipalities. *Journal of Radiological Protection*, Volume 24, Seite 343 – 368.

8.3 Weiterführende Links

Behörden, Kommissionen und Fachorganisationen:

- Grundlagen zu Strahlung, Radioaktivität und Schall des Bundesamtes für Gesundheit
www.bag.admin.ch/themen/strahlung
- Internationale Kommission für Strahlenschutz
www.icrp.com
- IAEA : International Atomic Energy Agency
www.iaea.org
- WHO: Weltgesundheitsorganisation
www.who.org
- UNSCEAR: United Nation Scientific Committee for the Effects of Atomic Radiation
www.unscear.org
- OECD-NEA: Nuclear Energy Agency of the OECD
www.nea.fr
- ENSI: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
www.ensi.ch

- BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (D)
www.bmu.de
- BfS: Bundesamt für Strahlenschutz (D)
www.bfs.de
- FS: Fachverband für Strahlenschutz (D+CH)
www.fs-ev.de und www.fs-ev.ch
- ILK: Internationale Länderkommission Kerntechnik (D)
www.ilk-online.org
- ASN: Autorité de Sûreté Nucléaire (F)
www.asn.fr
- IRSN: Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (F)
www.irsn.fr und www.irsn.org
- NRC: Nuclear Regulatory Commission (US)
www.nrc.gov
- EPA: Environmental Protection Agency (US)
www.epa.gov

Forschung zur Kinderleukämie:

- Schweizer Kinderkrebsregister
www.kinderkrebsregister.ch
- Schweizer Krebsliga
www.krebsliga.ch
- Internationale Agentur für Krebsforschung
www.iacr.fr
- Information zu Kinderkrebs
www.kinderkrebsinfo.de

Epidemiologische Studien zu Kinderleukämie und Kernkraftwerken:

- Schweizer Studie zu Kinderleukämie und Kernkraftwerken – CANUPIS
www.canupis.ch
- Deutsche Studie zu Kinderleukämie und Kernkraftwerken – KiKK
www.kinderkrebsregister.de/info_kikk.html

Impressum

Herausgeber:
Forum Medizin und Energie, Postfach, 8040 Zürich
Telefon +41 43 501 18 50, www.fme.ch, kontakt@fme.ch

Autoren:
Dr. med. Karl Ledermann
Prof. Dr. med. Felix Niggli
Dr. Serge Prêtre
Dr. med. Jürg Schädelin
Dr. Daniel Frey

Redaktion:
Forum Medizin und Energie, Postfach, 8040 Zürich
Daniel Frey, Eveline Müller, Marion Münstermann

Druck:
NiedermannDruck AG, Rorschacherstrasse 290,
9016 St.Gallen, Telefon +41 71 282 48 80,
www.niedermanndruck.ch, office@niedermanndruck.ch

Bestelladresse:
Forum Medizin und Energie, Postfach, 8040 Zürich
Telefon +41 43 501 18 50, kontakt@fme.ch

2. Auflage, Juli 2010
Copyright © 2010, Forum Medizin und Energie

Über das «Forum Medizin und Energie»

Das «Forum Medizin und Energie» (FME) ist ein überparteilicher, breit abgestützter Verein. Die Mitglieder des FME sind Ärztinnen und Ärzte aus Praxis und Forschung. Es handelt sich um Allgemeinpraktiker, Fachärzte und Spezialisten aus verschiedensten Bereichen. Das FME wurde 1984 von Prof. Dr. Martin Allgöwer (1917–2007), ein bekannter Schweizer Arzt und Chirurg, gegründet. Das FME hat sich zum Ziel gesetzt, die Schnittstellen zwischen menschlicher Gesundheit und Energie ohne Vorurteile zu erforschen. Zurzeit umfasst das FME über 200 Mitglieder aus der ganzen Schweiz.

Über die Autoren

Dr. med. Karl Ledermann
Dr. Ledermann ist Facharzt für Orthopädische Chirurgie. Er ist seit der Gründung Mitglied des Forums Medizin und Energie und hat sich in dieser Zeit ein grosses Fachwissen an den Schnittstellen zwischen Medizin und Energie aufgebaut.

Prof. Dr. med. Felix Niggli
Prof. Niggli ist Leiter der Kinderonkologie am Kinderspital Zürich. Er behandelt Kinder mit Leukämieerkrankungen und ist in der Krebsforschung tätig. Als Privatdozent an der Universität Zürich ist er zudem für die Aus- und Weiterbildung von Ärzten zuständig. Felix Niggli ist Vizepräsident der Schweizerischen Pädiatrischen Onkologie Gruppe (SPOG).

Dr. Serge Prêtre
Dr. Prêtre hat ein Diplom in experimenteller Kernphysik der ETH Zürich sowie einen Dokortitel der ETH Lausanne. Er war massgeblich am Aufbau der Abteilung Strahlenschutz der HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen) beteiligt und stand dieser während mehrerer Jahre vor. Von 1995 bis 1999 war er Direktor der HSK (heute ENSI).

Dr. med. Jürg Schädelin
Dr. Schädelin ist Facharzt für Innere Medizin. Er leitete eine klinische Forschungsabteilung der Sandoz und beschäftigte sich schwerpunktmässig mit Immunologie und Infektionskrankheiten. Bei Novartis war Jürg Schädelin medizinischer Leiter der Abteilung Epidemiologie und Medikamentensicherheit.

Dr. Daniel Frey
Daniel Frey ist seit 2004 Geschäftsführer des Forums Medizin und Energie und selbstständiger Kommunikationsberater. Als Mitglied des Vorstands vertritt er das FME im Expertengremium. Daniel Frey ist promovierter Historiker.

