Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 102 (2011)
Heft: 4

Artikel: Die Tschernobyl-Katastrophe
Autor: Rüegg, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856805

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Tschernobyl-Katastrophe

Hergang, Folgen und die Rolle der Berichterstattung

Die Tschernobyl-Katastrophe von 1986 war eine beispiellose Tragödie in der zivilen Nutzung der Kernenergie mit ungeahnten Ausmassen. Das Spektrum der Berichterstattung über die Folgen der Katastrophe ist inhaltlich und qualitativ sehr breit – von wissenschaftlich fundiert bis unseriös. Bezüglich der Auswirkungen kommen die Berichte zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Ein Versuch, 25 Jahre nach dem Unfall zu einer realistischen Einschätzung der Auswirkungen zu kommen.

Walter Rüegg

Der erste Grossreaktor der Welt wurde am 26. September 1944 in Hanford, USA, in Betrieb genommen. Er diente der Produktion von Waffenplutonium (Nagasaki-Bombe). Waffenfähiges Plutonium wird in speziellen Reaktoren aus Uran hergestellt. Diese militärischen Reaktoren sind so konstruiert, dass die Brennelemente während des Betriebs ausgewechselt werden können. Dies ist notwendig, weil nach spätestens einigen Wochen Reaktorbetrieb das Plutonium aus den Brennelementen extrahiert werden muss. Bei später entnommenen Brennelementen eignet sich das erzeugte Plutonium nicht mehr für eine Bombe. Der Hanford-Reaktor hatte kein Containment und war bis 1968 ohne grössere Probleme im Betrieb.

Hergang

Der Tschernobyl-Reaktor war dem alten Hanford-Reaktor sehr ähnlich: Grafit-moderiert, wassergekühlt, mit auswechselbaren Brennelementen, ohne Containment. Insgesamt mit 190 t Uran (leicht angereichert) und 1700 t Grafit ausgestattet (Hanford: 200 t Uran, 1200 t Grafit). Der Tschernobyl-Reaktor war für die Produktion von Waffenplutonium geeignet, es wurde aber nie bekannt gegeben, ob tatsächlich solches produziert wurde.

Bei diesem Typ von Grossreaktoren gibt es Betriebszustände, die zu schnellen, kaum noch kontrollierbaren Leistungsexkursionen führen, zudem ist der Dampfblasenkoeffizient bei kleinen Leistungen positiv (mehr Leistung bei Temperaturanstieg, Lawineneffekt), mehr darüber siehe [1]. Die russischen Konstrukteure waren sich dieser Schwächen bewusst und haben die Betriebsvorschriften entsprechend angepasst. Durch eine Kette von Fehlentscheidungen, kombiniert mit den Schwächen eines solchen Reaktors, ist es trotzdem zur Katastrophe gekommen. Die nachfolgende Auflistung beschreibt 10 schwere Fehler. Wenn nur ein einziger nicht passiert wäre, hätte die Katastrophe nicht stattgefunden oder wäre weniger schlimm ausgefallen.

1. Falscher Zeitpunkt

Vor der kommerziellen Inbetriebnahme (1983) sahen die Konstrukteure einen Sicherheitstest vor, um zu klären, ob nach einer Notabschaltung die auslaufenden Turbinen noch genügend Energie liefern können, bis die Notstromgruppen anspringen. Bei einem neuen Reaktor ein harmloser Test, da nur sehr wenig radioaktives Inventar vorhanden ist. Der zweitbeste Zweitpunkt für einen solchen Test ist nach einem Revisionsunterbruch von 1–2 Monaten. Dann ist die Radioaktivität und die Nachwärme auf etwa 1 % abgeklungen. Der verhängnisvolle Sicherheitstest wurde aber am Ende einer längeren Betriebsphase durchgeführt, mit maximalem radioaktivem Inventar – dem absolut ungünstigsten Zeitpunkt.

2. Überforderte Mannschaft

Der Test war für die Tagschicht des 25. April 1986 vorgesehen, unmittelbar vor dem Revisionsunterbruch. Um 13:05 musste aufgrund erhöhter Stromnachfrage der Reaktor weiterhin Energie liefern. Erst um 23:10 erfolgte die Freigabe zur Leistungsabsenkung. Um 24:00 fand ein Schichtwechsel statt, die neue Mannschaft erwartete einen abgestellten Reaktor und eine gemütliche Nacht. Der geplante Test musste aber unbedingt noch durchgeführt werden, sonst drohten Prämienverluste. Die nicht instruierte Mannschaft, ohne Reaktorfachleute, war klar überfordert.

3. Leistungsabsenkung

Durch eine Fehlmanipulation (oder Fehler in der Elektronik) sank die Leistung auf 1 % (statt auf die geplanten 25 %). Die Operateure bemerken das beginnende Drama nicht: Bei einer solchen kleinen Leistung «vergiftet» sich ein Reaktor mit Xenon (^{135}Xe), einem starken Neutronenabsorber, das aus den Spaltprodukten entsteht. Ein sicherer Betrieb

Jane MacGregor

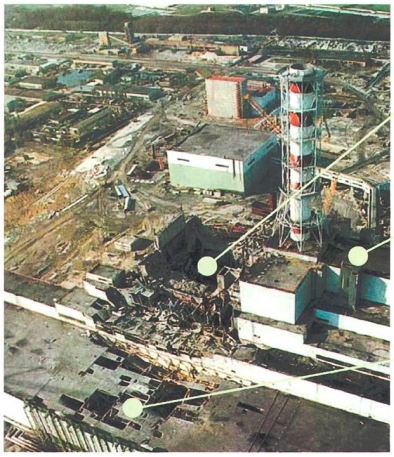


Bild 1 Man erkennt den zerstörten Reaktor von Block 4 sowie (im Vordergrund) die Turbinenhalle. Die Zerstörung beschränkte sich anfänglich auf das Dach. Die weiteren Schäden und der viele Schutt stammt vorwiegend vom Abwurf von über 5000 t Blei, Sand, Dolomit und Borkarbid und vom 10-tägigen Brand.

ist deshalb unter einer gewissen Mindestleistung nicht mehr gewährleistet. Die entsprechende Vorschrift lautet: Fällt, egal aus welchen Gründen, die Leistung unter 20 %, muss der Reaktor sofort ganz abgeschaltet werden.

4. Verletzung von Betriebsvorschriften

Statt den Reaktor abzustellen, wurde versucht, die Leistung manuell zu erhöhen. Da das Xenon stark bremsend wirkte, mussten immer mehr Steuerstäbe aus dem Reaktor entfernt werden. Eine heikle Situation: Das Xenon wirkt wie ein Bremsklotz, die herausgezogenen Stäbe bedeuten aber Vollgas. Am Schluss waren von 211 Stäben nur noch 6–8 Stäbe im Reaktor. Eine klare Missachtung der Vorschriften, die ein Minimum von 28 Stäben vorsahen. Um 01:20 wurde schliesslich nur eine Leistung von 7 % erreicht. Niemand realisierte den äusserst kritischen Zustand.

5. Hochseilakt ohne Netz

Um den Test unter solchen Bedingungen durchführen zu können, mussten alle automatischen Notabschaltsysteme (Havarieschutz) ausgeschaltet werden.

6. Positiver Dampfblasenkoeffizient

Es ist 01:23:04, der eigentliche Test beginnt: Die Turbine wird abgeschaltet. Es fliesst weniger Kühlwasser durch den Reaktor, die Temperatur steigt, das Kühlwasser beginnt nach etwa 30 s zu sieden, die Leistung beginnt immer schneller anzusteigen. Nach 6 s wird die Notabschaltung manuell eingeleitet. Der Reaktor ist «prompt kritisch» geworden, ein kaum kontrollierbarer Zustand.

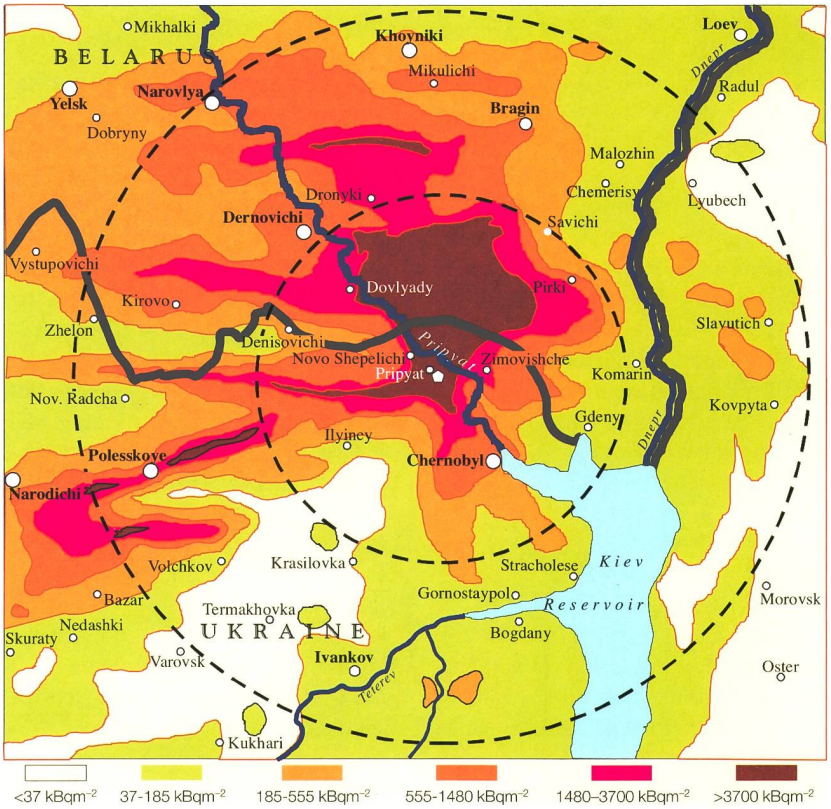
Die im Westen üblichen Leichtwasserreaktoren sind selbststabilisierend, d. h., bei steigender Temperatur bricht die Kettenreaktion von selbst zusammen (negativer Dampfblasenkoeffizient).

7. Keine schnelle Notabschaltung

Alle westlichen Reaktoren haben eine schnelle Notabschaltung, die in 1 s vollautomatisch (nicht abschaltbar) den Reaktor abstellt. Eine solche Notabschaltung hätte die Katastrophe verhindert. Beim Tschernobyl-Reaktor benötigten die voll ausgefahrenen Kontrollstäbe 15–20 s, bis sie voll eingefahren sind.

8. Kontrollstäbe mit Grafitspitzen

Um ein Maximum an Leistung herauszuholen, hatten die Kontrollstäbe Grafitspitzen. Die viel zu weit aus dem Reaktorkern herausgezogenen Stäbe tauchten zuerst mit ihrer Grafitspitze (Moderator) in den Reaktor ein und bewirkten eine zusätzliche Beschleunigung des Leistungsanstiegs: Der Reaktor explodierte innert weniger Sekunden.



UNSCEAR2000

Bild 2 Verteilung des Fallouts (^{137}Cs) in der näheren Umgebung des Unglücksreaktors. Bei den hellrot eingefärbten Gebieten (185–555 kBq/m²) ist die zusätzliche Radioaktivität vergleichbar mit der Natürlichen, bei den dunkel eingefärbten Gebieten (>3700 kBq/m²) beträgt sie ein Mehrfaches davon. Die beiden Kreise markieren eine Entfernung von 30 bzw. 60 km vom Reaktor.

9. Kein Containment

Ein modernes Containment mit Überdrucksicherungen hätte gehalten und hätte eine grossflächige Verstrahlung verhindert.

10. 1700 t Grafit

Das rotglühende Grafit, vermischt mit dem extrem heissen Brennstoff, brannte 10 Tage lang. Ein solcher Brand ist praktisch nicht löschbar. Die chemische Energie, die diese gewaltige Menge Grafit freisetzen kann, ist vergleichbar mit der Energie der Hiroshimabombe. Grosse Mengen radioaktiver Substanzen werden durch das Feuer kilometerweit hochgewirbelt und vom Wind über grosse Distanzen verfrachtet. Ohne ein solches lange andauerndes Feuer findet keine grossräumige Verteilung der Spaltprodukte statt.

Die heute üblichen Leichtwasserreaktoren haben weder Grafit noch andere leicht brennbare Substanzen.

Die Explosionen

Innert 4 s nach der Einleitung der Notabschaltung stieg die Leistung auf etwa 300 GW an, das Hundertfache der Nennleistung. Die Brennelementrohre barsten, das Kühlwasser verdampfte explosionsartig, der ganze Reaktorkern wurde zerstört. Der Uranbrennstoff heizte sich auf rund 3000 °C auf, ein Teil wurde durch die Explosionen aus dem Reaktorkern geschleudert. Die Leistungsexkursion setzte eine Energie von über 100 GJ frei, dies entspricht der Sprengkraft eines Lastwagens voll von Sprengstoff (20 bis 30 t TNT). Noch stärker war die wenige Sekunden später erfolgte Knallgasexplosion, verursacht durch das in grossen Mengen entstehende Wasserstoffgas. Das leicht gebaute Dach des Reaktorgebäudes wird zerstört, brennendes Grafit fällt mit dem Kernbrennstoff auf das Asphaltdach der Turbinenhalle und setzt es teilweise in Brand. Die extrem starke Strahlung (bis 300 Sv/h) des

Brennstoffs ist in den ersten Stunden aus kurzer Distanz (einigen Metern) innert Minuten tödlich, aber auch die gewaltige Menge von brennendem Grafit erzeugt Rauchgase, die nach wenigen Atemzügen tödlich sein können.

Notfallpläne fehlten

Tagelang versuchte man die Katastrophe geheim zu halten, auch vor der eigenen Bevölkerung. Wochenlang wurde sie dann verharmlost. Notfallpläne waren nicht vorhanden, Jodpillen nur sehr beschränkt. Dabei hätte eine einfache Warnung vor dem Konsum von Frischmilch die meisten Kinder vor einem Schilddrüsentumor bewahrt.

Die Schuldfrage

Wer ist Schuld an der Katastrophe? Die Ukrainer schieben alle Schuld auf die russischen Konstrukteure: Ein solcher Reaktortyp mit vielen Sicherheitsproblemen, ohne Schnellabschaltung und ohne Containment, hätte niemals gebaut werden dürfen. Für die Russen sind die ukrainischen Operateure die Schuldigen, sie haben dilettantisch und unter Verletzung von Betriebsvorschriften einen heiklen Test zum falschen Zeitpunkt durchgeführt. Eigentlich haben beide Parteien Recht: Nur das Zusammentreffen einer unfähigen Mannschaft mit einem nicht selbststabilisierenden Reaktor, ohne Containment, konnte zu einer solchen Katastrophe führen.

Tschernobyl hatte für den Osten die gleiche heilsame Wirkung wie der Unfall von Harrisburg für den Westen. Die Sicherheit aller Anlagen vom Tschernobyl-Typ wurde massiv verbessert: Zusätzliche Neutronenabsorber und Kontrollstäbe, verkleinerter Dampfblasenkoeffizient, ein schnelles Notabschaltsystem, Kontrollstäbe ohne Grafit und mit Sperre gegen vollständiges Ausfahren. Mit diesen Massnahmen kann eine zweite Grosskatastrophe wie bei Tschernobyl ausgeschlossen werden.

Die Folgen der Katastrophe

Nach den Abwürfen der Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki wurden sowohl von den Amerikanern als auch von den Japanern bereits einen Monat später umfassende, hochprofessionelle medizinische Untersuchungen (mit Tausenden von Fachleuten) gestartet. Man investierte Milliarden in diese wohl grössten medizinischen Studien aller Zeiten. Diese dauern heute noch an, die Resultate sind allgemein anerkannt und bilden die Grundlage unserer heutigen Strahlengrenzwerte. Die Unsicherheit über die genaue Zahl der Opfer, insbesondere der Langzeitopfer (Krebsfälle im Alter), ist relativ klein, man streitet sich etwa um einen Faktor 2.

Ganz anders die Situation nach der Katastrophe von Tschernobyl. Es fehlte sowohl der politische Wille (UdSSR-Geheimhaltungskultur) als auch das notwendige Geld, um solche systematischen Untersuchungen durchzuführen. Das Resultat: Ein Chaos von Zehntausenden meist kleinen, qualitativ oft fragwürdigen Berichten, Studien, Zeitungsartikeln, Verlautbarungen. So ist es auch nicht verwunderlich, dass die Opferzahlen zwischen 50 und 6 Millionen schwanken, um einem Faktor 100 000!

Immerhin ist man sich bei den folgenden Fakten halbwegs einig:

- Gründe und Ablauf der Katastrophe.
- Menge und örtliche Verteilung der Verstrahlung (in Bq).
- Dosisbelastung der verschiedenen Gruppen (in Sv).
- Auswirkungen bei hohen Dosen (akute Todesfälle, Schilddrüsentumore).

Völlig uneinig ist man sich bei den Langzeitwirkungen von kleinen und kleinsten Dosen, auf Millionen von Bewohnern verteilt. Der Grund: Bei solchen Dosen werden allfällige Effekte von den viel grösseren natürlichen gesundheitlichen Variationen überdeckt. Man muss Annahmen über die Wirkung von Kleinstdosen treffen. Je nach Modell können damit fast beliebige Opferzahlen errechnet werden. Wir werden weiter unten näher auf diese Problematik eingehen.

Bild 2 zeigt die Verteilung des biologisch wichtigsten Radionuklids, ^{137}Cs, in der näheren Umgebung des Reaktors. Der Fallout wurde sehr ungleichmässig verteilt, je nach Wind und Regenfall. Man gibt die Menge meist in Bq pro m² an, 1 Bq entspricht einem radioaktiven Zerfall pro Sekunde. Die reinen Zahlen sagen nicht viel aus, ein Vergleich mit der natürlichen Bodenaktivität (U, Th, ^{40}K …) ist anschaulicher. In 1 m³ Erde hat es im Durchschnitt etwa 3000 kBq radioaktive Substanzen (α-, β- und γ-Strahler). Nimmt man die obersten 33 cm des Bodens als relevant an, so erhält man einen Wert von 1000 kBq/m² als durchschnittliche, natürliche Bodenaktivität. Dieser Wert schwankt von Ort zu Ort, ein Faktor 2 ist üblich. Für die meisten Fachleute besteht kein Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher Strahlenbelastung. Wie aus **Bild 2** zu entnehmen ist, sind mehrere 100 km² massiv verstrahlt. In einem Gebiet von mehreren km² in Windrichtung neben dem Reaktor war die Strahlung während der Katastrophe bei einem Aufenthalt von wenigen Stunden tödlich (>1 Sv/h). In diesem Gebiet sind auch die Nadelbäume gestorben (roter Wald). Heute ist alles wieder grün und, zumindest oberflächlich gesehen, ein Naturparadies.

Bild 3 zeigt die Strahlung in Pripyat heute, einer immer noch unbewohnten Geisterstadt. Die Strahlung klingt recht schnell ab: Sie betrug anfänglich über 1000 µSv/h, heute misst man noch etwa

Pripyat: Krzysztof Wojciech Fornalski; Rom: Walter Rüegg

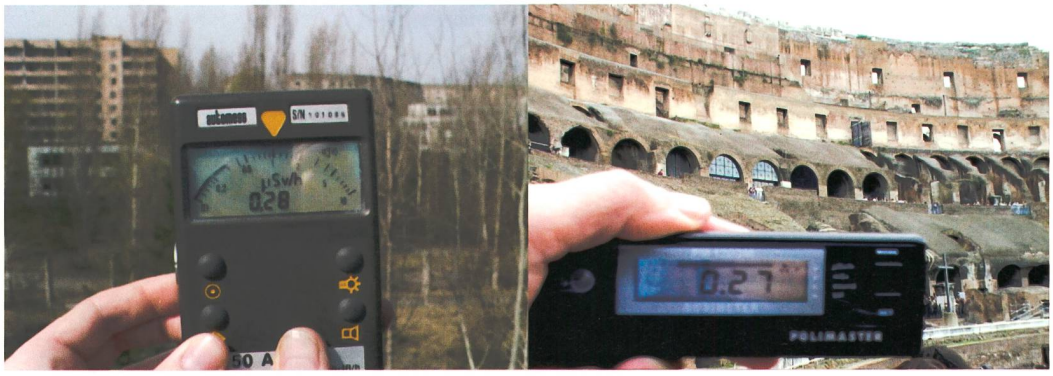


Bild 3 Strahlung in Pripyat (2008), rund 3 km vom Reaktor entfernt (links), und die natürliche Strahlung in Rom (Kolosseum).

0,3 µSv/h. In Rom strahlt es etwa genau so stark, in Orvieto (bekannt wegen seines Weissweins) etwa doppelt so stark.

Akute Schäden

Etwa 1000 Feuerwehrleute erlitten in den ersten Tagen Dosen zwischen 2 und 20 Sv (4,5 Sv ist die semiletale Dosis). 136 dieser Einsatzkräfte wurden strahlenkrank, 28 davon verstarben bis Ende 1986. Weitere 19 Leute verstarben bis 2004. Es ist nicht klar, ob die Strahlung dafür verantwortlich ist. Die Mortalitätsrate in diesen Ländern betrug zu jener Zeit bei Erwachsenen etwa 1 %/a. Von den 108 Überlebenden der Gruppe von 134 Strahlenkranken müssten also innert 17 Jahren (1987–2004) etwa 18 eine «natürliche» Todesursache haben.

Zwischen 600 000 und 800 000 «Liquidatoren» waren jahrelang mit Aufräumarbeiten, Dekontaminationen und dem Bau des Sarkophags beschäftigt. Die akkumulierte Dosis liegt im Durchschnitt um 100 mSv. An natürlicher Strahlung akkumuliert man im Laufe seines Lebens etwa 150 mSv (mit starken örtlichen Variationen: 100–700 mSv).

Die vielen Berichte über den Gesundheitszustand der Liquidatoren sind widersprüchlich. Gemäss gewissen Berichten sind inzwischen 100 000–150 000 Liquidatoren gestorben, angeblich an den Folgen der Strahlung. Bei einer Mortalitätsrate von etwa 1 %/a müssten innert 20 Jahren 120 000–160 000 «natürliche» Todesfälle vorkommen.

Weitere Gesundheitsfaktoren

Die durchschnittliche Lebenserwartung ist massiv gesunken, von ca. 64 Jahren 1987 bis auf ca. 58 Jahre 1994. Es gab viel mehr Krebserkrankungen und Herz-Kreislauf-Probleme sowie Infektionskrankheiten aller Art. Aber: Dies gilt für die gesamte ehemalige Sowjetunion, auch für das ferne Sibirien. Zudem begann die massive Verschlechterung des Gesundheitszustandes bereits vor der Katastrophe. Der Hauptgrund ist der wirtschaftliche Zusammenbruch – das Bruttosozialprodukt sank zeitweise auf etwa die Hälfte ab.

Da die oben erwähnten Krankheiten starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen sind, ist es schwierig bis unmöglich, den Einfluss der Strahlenbelastung in den verstrahlten Gebieten von den «normalen» Variationen und Einflussgrössen zu trennen. Der Torch-Report der Grünen im Europäischen Parlament [2] nennt bei 7,4 Mio. betroffenen Bewohnern eine mittlere Lebensdosis von 29 mSv, ⅔ davon von externen Strahlen, ⅓ von inkorporierten radioaktiven Substanzen in Lebensmitteln und in der Luft. Verglichen mit der immer vorhandenen natürlichen Belastung von 100–700 mSv Lebensdosis sind dies kleine Werte. Selbst in Gebieten mit sehr hoher natürlicher Radioaktivität (im Iran, in Brasilien in China und in Indien, kleinere Gebiete auch in Europa) konnte man keine negativen Effekte feststellen, trotz Lebensdosen, die zum Teil die tödliche Schockdosis (4500 mSv) überschreiten.

Missbildungen und Schilddrüsentumore

Bestrahlt man Mäuse mit mittleren bis hohen Schockdosen, kann in den nächsten Generationen eine Erhöhung der Missbildungen festgestellt werden. Beim Menschen beträgt die «natürliche» Rate etwa 4 % (Industrieländer), in arabischen Staaten bis 8 % (40–60 % der Ehen zwischen Blutsverwandten). Nach den Erfahrungen mit Mäusen erwartete man bei Nachkommen von bestrahlten Eltern in Hiroshima eine leichte Erhöhung der Missgeburtenrate. Diese konnte trotz sehr aufwendiger Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Inzwischen weiss man, dass die Intensität der DNA-Reparatur mit der Lebensspanne des Säugetiers korreliert, offenbar ist der Mensch deshalb weniger empfindlich. In Anbetracht der recht kleinen Dosen, verglichen mit Hiroshima und mit den natürlichen Dosen, erwartet man keine Erhöhung der Missgeburtenrate in den verstrahlten Gebieten um Tschernobyl.

Einigermassen einig ist man sich bei den Schilddrüsentumoren von Kindern. Diese wurden durch die Aufnahme von radioaktivem Iod-131 während der ersten paar Wochen verursacht. Da die Halbwertszeit 8 Tage beträgt, ist die Gefahr nach 1–2 Monaten vorüber. Der grösste Teil wurde durch Frischmilch aufgenommen; eine Warnung vor dem Konsum hätte die meisten Tumore verhindert. Es wurden insgesamt etwa 5000 Schilddrüsentumore der Strahlung zugeschrieben. Glücklicherweise sind diese Tumore praktisch immer gutartig (keine Metastasen) und sind relativ gut zu behandeln. Bisher starben 10 Kinder an diesem Tumor oder an Komplikationen.

Umsiedlungen

Die Evakuationen in den am stärksten betroffenen Gebieten waren sicher notwendig, vor allem betrifft dies die 45 000 Bewohner der Stadt Pripyat, 3 km vom Reaktor entfernt. Auch wenn hier die Dosen nicht genügend hoch waren, um bei gesunden Erwachsenen akute Schäden zu verursachen, so lagen sie doch deutlich über den Werten, ab denen Langzeitschäden (höhere Krebsrate im Alter) zu erwarten sind. Der Nutzen der Evakuationen in den anderen Gebieten ist aber unter Fachleuten umstritten.

Schädliche Strahlendosis

Ab welcher Strahlendosis soll umgesiedelt werden? Diese Frage ist wissenschaftlich nicht zu beantworten, so wenig wie die damit zusammenhängende Frage, ab welcher Dosis die Strahlung schädlich ist. Die Problematik ist die folgende: Wie bei jedem Giftstoff gibt es auch für radioaktive Strahlen eine untere Grenze, unter der man keine gesundheitlichen Effekte mehr sieht, weder akute noch Langzeitschäden. Bei einer Schockdosis ist diese Grenze bei 1–2 % der tödlichen Dosis, d. h. bei 50–100 mSv. A priori bedeutet dies aber nicht, dass keine Schäden existieren, sie könnten auch einfach zu klein oder zu selten sein, um beobachtet zu werden. Bei verteilter Dosis (chronische Bestrahlung) zeigt die überwältigende Anzahl der Forschungsarbeiten, dass die akkumulierte Dosis, unter der kein Schaden zu beobachten ist, wesentlich höher liegt.

«Linear No Threshold»-Hypothese

Um die Problematik der kleinen Dosen zu «lösen», hat man vor etwa 50 Jahren die LNT-Hypothese (Linear No Threshold) eingeführt. Hier nimmt man an, dass das Langzeitrisiko (Krebs) linear mit der Dosis abnimmt (d. h. halbe Dosis gleich halbes Risiko) und auch keinen Schwellenwert hat. Auch die winzigste Dosis würde so ein (winziges) Risiko verursachen. Forscher, Behörden und Umweltverbände streiten sich seit Jahrzehnten, ob die LNT-Hypothese gerechtfertigt ist [3].

Mithilfe der LNT-Hypothese kann man auch das Konzept der «kollektiven Dosis» einführen. Dies ist die Gesamtdosis einer Bevölkerungsgruppe, berechenbar als Produkt der durchschnittlichen Dosis und der Bevölkerungsgrösse. Pro Sv Schockdosis muss nach einigen Jahrzehnten Latenzzeit mit etwa 10 % zusätzlicher Krebswahrscheinlichkeit gerechnet werden (Hiroshima/Nagasaki-Erfahrungen). Pro akkumuliertes Sv an chronischer Belastung rechnet man heute (etwas willkürlich) mit 5 %. Bei kleinen chronischen Dosen (z. B. natürliche

	Tschernobyl	Hiroshima/Nagasaki	Test-Fallout	Nat. Strahlung 0,3 m tief
Hauptwirkung	Cs-137	Primärstrahlung	Cs-137	K-40, Uran, Thorium usw.
Menge (PBq)	85	0,2 (Cs-137)	1000	500 000
Strahlenkrank	134	20 000–30 000	100 (+?)[2]	0
Akut-Tote	30–50	150 000–220 000[1]	1 (+?)[2]	0
Kollektiv-Dosis (kSv-p)	200–600	300 000	5000	1,4 Mio.
Hypothetische LNT-Tote	30 000–60 000	2000–3000	250 000	70–140 Mio

Tabelle Menge und Auswirkung von Fallout/Bodenaktivität.
[1] Etwa 5–10 % aufgrund der Nuklearstrahlung.
[2] Russische und chinesische Zahlen unbekannt. 1 PBq = 10^{15} Bq.

Strahlenbelastung) dürfte diese Zahl aber viel zu hoch sein.

Oft wird vergessen, dass LNT eine Hypothese ist: Besonders bei inkorporierten radioaktiven Substanzen ist man in der Öffentlichkeit der festen Meinung, dass auch die kleinste Dosis schädlich ist. Daran ändern auch die Erkenntnisse der letzten 20 Jahre nichts. Die wohl umfassendste Arbeit darüber [4] zeigt klar eine Schwelle. Die Arbeit berücksichtigt viele der wichtigsten Forschungsarbeiten mit Tieren (Mäuse, Hunde) und auch die bisher besten Humandaten (Radium-Malerinnen in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts). Tier- und Humandaten konnten durch Normierung mit der Lebensspanne in gute Übereinstimmung gebracht werden. Überdies konnte gezeigt werden, dass Plutonium-Partikel in der Lunge ebenfalls eine Schwelle besitzen. Aber selbst wenn man LNT als richtig annimmt, werden heute die Relationen extrem verzerrt wahrgenommen. In [3] findet man einige Beispiele dafür.

Umsiedlungskriterien

Als Umsiedlungskriterium in den von Tschernobyl betroffenen Gebieten hat man eine Lebensdosisgrenze von 350 mSv festgelegt (eigentlich hat man eine Bodenkontamination von 555 kBq/m² ^{137}Cs festgelegt, woraus die Lebensdosis abgeschätzt werden kann). Die 350 mSv entsprechen etwa 0,6 µSv/h, diese Dosisleistung wird in vielen Gebieten der Erde durch die natürliche Strahlung übertroffen. Diese wirkt sowohl von aussen (vom Boden und vom Weltraum) als auch von innen (durch inkorporierte Radionuklide).

Man kann sich fragen, ob die Umsiedlungen nicht mehr Nachteile als Nutzen brachten. Namhafte Fachleute finden die Umsiedlungen unsinnig: Prof. Z. Jaworowski, ehemaliger Präsident von UNSCEAR: «The most nonsensical action, however, was the evacuation of 336 000 people …» [5]. Die UNSCEAR ist das Gremium der Vereinigten Nationen, das seit Jahrzehnten die Effekte der radioaktiven Strahlung so gründlich wie möglich studiert.

Erst bei der Anwendung des Konzepts der kollektiven Dosis wird die Argumentation der Politiker klar: Bei einer geschätzten mittleren Lebensdosis von 500 mSv würden gemäss der LNT-Hypothese und einem angenommenen Risiko von 5 %/Sv unter den 375 000 evakuierten Bewohner etwa 9400 Krebsfälle zusätzlich ausbrechen (nach einigen Jahrzehnten Latenzzeit), damit verbunden ist eine mittlere Lebenszeitverkürzung von 5 Monaten. 9400 Todesfälle, selbst wenn sie nur auf einer fragwürdigen, nicht überprüfbaren Hypothese beruhen, sind politisch ein untragbares Risiko. Anderseits: Umsiedlungen unter solchen Umständen sind unweigerlich mit massiv verschlechterten Lebensbedingungen verbunden, entsprechend leidet auch die Gesundheit, und die Lebensspanne kann sich um mehrere Jahre verkürzen.

Das grosse Dilemma der Umsiedlungen ist: Warum müssen nicht auch Hunderttausende von Finnen, von Süditalienern, Norwegern und Rumänen evakuiert werden? Auch in diesen Ländern übersteigt mancherorts die durch natürliche Strahlung verursachte Lebensdosis den Evakuationswert von 350 mSv.

Tschernobyl und Hiroshima

Die Tabelle vergleicht die Mengen von Radionukliden (in PBq = 10^{15} Bq) der verschiedenen Quellen. Die Anzahl Strahlenkranker und die der Akut-Toten sind wenig umstritten. Es fällt auf, dass die Bewohner von Hiroshima und Nagasaki sehr viel höhere Dosen (siehe Anzahl Strahlenkranke) erlitten als die Opfer von Tschernobyl. Der Vergleich der Falloutmengen zwischen Hiroshima und Tschernobyl ist irreführend. In Hiroshima verursachten die extrem starke Primärstrahlung (die bei Tschernobyl fehlte) sowie vor allem die Hitzestrahlung, die Druckwelle und die Brände praktisch alle Opfer, der Fallout war vergleichsweise unbedeutend. Bei Tschernobyl ist es gerade umgekehrt. Die Angabe der LNT-Toten (Langzeitopfer) bei Hiroshima/Nagasaki beruht auf sorgfältigen statistischen Auswertungen und ist somit «echt», die Mehrzahl dieser Opfer wurde mit sehr hohen Dosen bestrahlt. Alle anderen Angaben über LNT-Tote betreffen kleine und kleinste Dosen und sind statistisch nicht nachweisbar. Man beachte die gewaltige Anzahl LNT-Toter bei der natürlichen Strahlung. Falls man der Meinung ist, dass die Tschernobyl-Katastrophe mehrere 10 000 Opfer forderte, so hat man sich mit dem Dilemma auseinanderzusetzen, dass dann (mit gleichen Massstäben gemessen) die natürliche Strahlung weltweit um die 100 Millionen Opfer verursacht.

Berichte über Tschernobyl

Gemäss Google Scholar gibt es über 40 000 Publikationen und Zitate (Bücher, Artikel, Diplom- und Doktorarbeiten, Berichte ...) über die Tschernobyl-Katastrophe, die meisten in Russisch oder Ukrainisch. Nur ein kleiner Teil ist von guter Qualität. Zu einer guten Qualität gehören Dosisangaben, eine gute Statistik (genügend grosse Anzahl von Fällen), gute Vergleichsgruppen (mit vergleichbarem Alter und Lebensweise, aber ohne Strahlenbelastung) sowie ein Vergleich mit der natürlichen Belastung, mit dem bisherigen Wissen (u. a. Hiroshima, Tierversuche) und mit ähnlichen Arbeiten und schliesslich eine Diskussion über andere Einflussgrössen, die zu ähnlichen Effekten führen. Es gibt etwa 3000 peer-reviewed Artikel (d. h. Qualität von Fachkollegen begutachtet) in wissenschaftlichen Zeitschriften, die meisten auch wieder in Russisch oder Ukrainisch.

Auffallend ist, dass es beliebig viele widersprüchliche Resultate und Aussagen gibt. Unter den 40 000 Publikationen kann man mühelos eine grosse Menge heraussuchen, die ein rabenschwarzes Bild von den Folgen der radioaktiven Verstrahlung zeigt. Ebenso können massenweise Artikel gefunden werden, welche keine Effekte finden oder sogar positive (bessere Gesundheit bei Bestrahlten).

Tschernobyl-Forum

Die letzte grössere systematische Untersuchung wurde vom sogenannten «Tschernobyl-Forum» 2005/2006 durch-

electrosuisse VSE AES

Résumé **La catastrophe de Tchernobyl**

Déroulement, conséquences et rôle de l'information

La catastrophe de Tchernobyl en 1986 a été une tragédie sans précédent dans l'exploitation civile de l'énergie nucléaire. Cet article explique le déroulement et les raisons de la catastrophe, discute ses conséquences et décrit la communication des informations sur cet événement. L'éventail des informations sur les conséquences de cette catastrophe est très large, aussi bien sur le plan du contenu que sur celui de la qualité – il va de contributions ayant un fondement scientifique à des informations manquant totalement de sérieux. Les avis sont également très partagés quant aux répercussions. Une évaluation réaliste des conséquences est présentée. No

geführt. Dieses Forum besteht aus acht UNO-Organisationen (FAO, IAEA, OCHA, UNDP, UNEP, UNSCEAR, WHO), der Weltbank und den Regierungen von Russland, Ukraine und Weissrussland. Federführend für den Bericht über die gesundheitlichen Folgen war die Weltgesundheitsorganisation (WHO) [6]. Am 600-seitigen Bericht beteiligten sich über 100 Experten aus vielen Ländern. Die Zusammenfassung betreffend gesundheitlicher Folgen umfasst 57 Seiten [7]. Die Untersuchungen wurden entsprechend den üblichen wissenschaftlichen Standards durchgeführt: Zu jedem Punkt wurden viele Arbeiten (mit oft unterschiedlichen Aussagen) berücksichtigt, kommentiert und bewertet. Es wurde immer eine Aussage über Konsens, Uneinigkeit oder mangelhaftes Wissen gemacht. Es wurden Konsistenzchecks mit dem allgemeinen Strahlenschutzwissen (Hiroshima, Tierversuche, medizinische Erfahrungen ...) durchgeführt, ebenso wie Vergleiche mit natürlicher Strahlung. Im Bericht fehlt jegliche Polemik oder Stellungnahme für oder gegen Kernenergie (im Gegensatz zu vielen anderen Berichten).

Bei der allgemeinen Bevölkerung gibt es, mit Ausnahme der Schilddrüsentumore bei Kindern, keine zuverlässigen Anzeichen von strahlenbedingten Krebsfällen oder anderen Krankheiten in Übereinstimmung mit dem Strahlenschutzwissen. Das Risiko bei den Schilddrüsentumoren stimmt mit den Erfahrungen von Hiroshima überein. Eine Erhöhung der Missgeburtenrate aufgrund der Strahlung konnte nicht festgestellt werden, ebenfalls im Einklang mit den Erfahrungen von Hiroshima. Mit der LNT-Hypothese werden 9000 Krebsopfer in Russland, Weissrussland und der Ukraine berechnet. In Anbetracht der Millionen «normaler» Krebsfälle (mit grossen zeitlichen und örtlichen Schwankungen) wird sich diese Vorhersage wohl nie verifizieren lassen.

Gegenberichte

Der WHO-Bericht hat eine Reihe von Gegenberichten ausgelöst, beispielsweise den Torch-Bericht [2] und den Greenpeace-Bericht [8]. Der Torch-Bericht wurde von den Grünen im Europäischen Parlament herausgegeben. Er umfasst 91 Seiten, ist nüchtern formuliert und relativ ausgewogen. Der Hauptunterschied zum WHO-Bericht besteht darin, dass für chronische Belastungen ein höherer Risikofaktor benutzt wurde und dass auch der Rest der Weltbevölkerung (vor allem Europäer) mit in die Berechnungen eingeschlossen wurde. Basierend auf der LNT-Hypothese werden damit 60 000 Krebsopfer errechnet.

Der Bericht lehnt Vergleiche mit Untergrundstrahlung als «nicht angebracht» ab, anerkennt aber ausdrücklich die gleiche Schädlichkeit. Einer Diskussion über das Umsiedlungsdilemma geht man so aus dem Weg. Der Bericht anerkennt, dass keine Erbschäden/Missgeburten nachweisbar sind.

Der Greenpeace-Bericht umfasst 139 Seiten und ist wegen seiner polemischen, tendenziösen Art schwer mit den anderen Berichten zu vergleichen. Es findet eine Art «Globalablehnung» statt, ohne auf die einzelnen Darlegungen der WHO-Arbeit einzugehen. Stattdessen wird eine beeindruckende Anzahl Berichte über negative gesundheitliche Folgen aufgeführt (etwa 500). Leider ist die Qualität dieser Berichte schwer überprüfbar, die meisten sind auf Russisch oder Ukrainisch. Diese Berichte werden weitgehend unkritisch wiedergegeben, ohne Aussagen über Zuverlässigkeit und mögliche Fehler. Der Bericht enthält diverse numerische und logische Widersprüche (siehe [9]) und fällt durch klare Übertreibungen auf: beispielsweise sind «riesige Regionen» auf Jahrhunderte unbewohnbar (siehe **Bild 3**, 3 km vom Reaktor entfernt).

Schlusswort

Die natürliche Umweltstrahlung suggeriert bei einer chronischen Belastung eine Schwelle von einigen 100 mSv. Mit einer solchen Schwelle würde die gesamte strahlenbedingte Opferzahl nicht viel höher als 50 sein. Je nach Risikomodell (LNT) und weiteren Annahmen können aber auch bis 6 Millionen berechnet werden (Greenpeace). Das Grundproblem: Bei Kleindosen kann man weder deren Gefährlichkeit noch deren Ungefährlichkeit beweisen, die Effekte sind einfach zu klein. Diese Tatsache kann für alle möglichen Standpunkte benutzt werden.

Die Bevölkerung in den betroffenen Regionen um Tschernobyl herum akkumulierten im Mittel etwa 30 mSv, die Bewohner in Westeuropa weniger als 1 mSv. Selbst wenn solche Kleinstdosen mit pessimistischen Annahmen zu einem Risiko führen, müssen die Relationen berücksichtigt werden [3]. Diese hypothetischen Risiken sind so klein, dass wir sie getrost vernachlässigen können. Praktisch alle anderen Risiken unseres täglichen Lebens sind viel grösser, und wir tun gut daran, ihnen unsere Hauptaufmerksamkeit zu schenken.

Referenzen

[1] Walter Rüegg, «Wie gefährlich sind Kernkraftwerke?» Bulletin SEV/VSE 10/2010. www.electrosuisse.ch/display.cfm?id=146201.
[2] Ian Fairlie, David Sumner, The Other Report on Chernobyl (TORCH), www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/118/118499.the_other_report_on_chernobyl_torch@en.pdf.
[3] www.electrosuisse.ch/display.cfm/id/127833.
[4] Otto Raabe, Concerning the healths effects of internally deposited radionuclides, Health Phys. 2010 Mar; 98(3):515–36.
[5] http://world-nuclear.org/info/chernobyl/jaworowski.html.
[6] World Health Organisation: Health Effect of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes», ISBN 978 92 4 159417 2.
[7] http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/chernobyl_digest_report_EN.pdf.
[8] Greenpeace, The Chernobyl Catastrophe. Consequences on Human Health. 2006. ISBN 5-94442-013-8.
[9] Eike Roth, Tschernobyl: Die IAEA spricht von 56, Greenpeace von 93000 Todesopfern. Wer hat Recht? http://www.energie-fakten.de/pdf/tschernobyl-roth.pdf.

Angaben zum Autor

Dr. **Walter Rüegg** ist Kernphysiker mit einer starken Neigung zur Strahlenbiologie. Er hat 20 Jahre lang an der ETH und am PSI (damals SIN) geforscht, später in der ABB (Elektronik und Sensorik). Er war viele Jahre lang Chefphysiker in der Schweizer Armee und hat sich intensiv mit Nuklearwaffen und Radioaktivität befasst. Seit 2006 unabhängig.

Walter Rüegg, 5304 Endingen, w.ruegg@soclair.ch