

# Wie gefährlich sind Kernkraftwerke?

Autor(en): **Rüegg, Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **101 (2010)**

Heft 10

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-856133>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Wie gefährlich sind Kernkraftwerke?

## Potenzielle Gefahren und Sicherheitsvorkehrungen

Ein Gau in einem Kernkraftwerk wird oft mit apokalyptischen Szenarien in Verbindung gebracht, vergleichbar mit den Auswirkungen einer Atombombe. Kein Wunder, dass Kernkraftwerke bei Risikoumfragen meist an erster Stelle stehen. Besonders seit Tschernobyl erwecken Kernkraftwerke in der Bevölkerung grosse Ängste. Ist dies gerechtfertigt? Was sind, nüchtern betrachtet, die wirklichen Risiken? Können diese überhaupt abgeschätzt werden?

### Walter Rüegg

In den westlichen Industrienationen gab es seit Beginn der kommerziellen Kernenergienutzung vor 55 Jahren trotz 440 Kernreaktoren bisher keinen einzigen Unfall mit schweren Personenschäden. Eigentlich ein unglaublich gutes Resultat, aber ist dies nur Zufall? Tschernobyl hat die Verwirrung eher vergrössert. Bei keiner anderen Grosskatastrophe herrscht eine derartige Kontroverse über die Anzahl Opfer. Bei Hiroshima/Nagasaki streitet man sich um etwa einen Faktor 2, bei Tschernobyl gehen die Angaben von 50 Toten bis 6 Millionen.

### Reaktorsicherheit

In einem Kernreaktor werden Atomkerne, meist Uran-235 (U-235) oder Plutonium-239 (Pu-239), durch langsame Neutronen in zwei Spaltprodukte zerlegt. Neben sehr viel Wärmeenergie entstehen bei jeder Spaltung 2 bis 3 schnelle Neutronen. Diese können, unter geeigneten

Bedingungen, neue Kerne spalten: Eine selbsterhaltende Kettenreaktion entsteht. Langsame Neutronen spalten U-235 oder Pu-239 sehr viel besser als schnelle. Diese müssen deshalb stark abgebremst (moderiert) werden, bei den ersten Kernreaktoren (und in Tschernobyl) benutzte man dazu Graphit, heute vorwiegend Wasser. In einem Kernreaktor sind die spaltbaren Kerne nur in kleiner Konzentration (weniger als 1%) vorhanden, zudem verlaufen die kernphysikalischen Prozesse millionenfach langsamer ab als in einer Bombe.

Selbst mit voller Absicht kann deshalb kein Kernreaktor dieser Welt auch nur annähernd wie eine Nuklearbombe explodieren. Unkontrollierte Leistungssteigerungen («Leistungssexkursionen») sind bei gewissen Reaktortypen allerdings möglich. Diese können im Extremfall eine Explosion verursachen, deren Stärke einige Dutzend Tonnen TNT erreichen

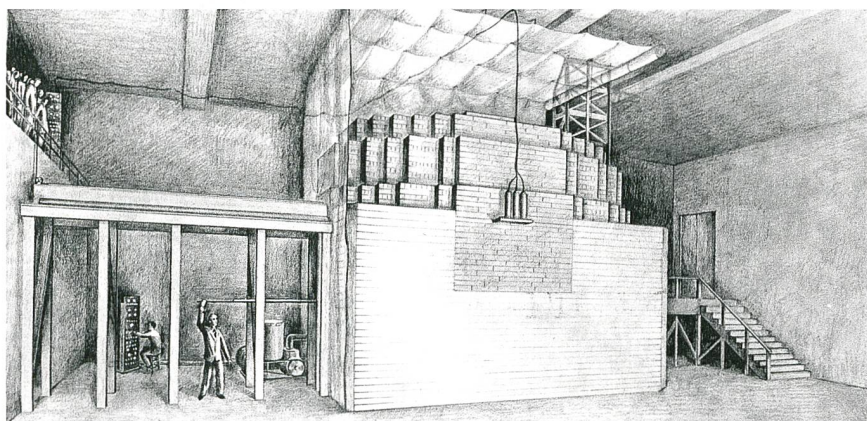
kann. Ob bei einem Reaktortyp eine gefährliche Leistungssexkursion möglich ist, hängt von seinem Verhalten bei einer Temperaturerhöhung ab. Vor allem ist es aber entscheidend, was beim Sieden oder beim Verlust des Kühlmediums geschieht. Bei einem graphitmoderierten Kernreaktor mit Wasser als Kühlmittel (Tschernobyl) ist dieses für die Neutronen eher ein Hindernis, besonders bei kleinen Leistungen. Wird ein solcher Reaktor zu heiss, beginnt das Wasser zu sieden. Die Dampfblasen führen zu einem höheren Neutronenfluss (positiver Dampfblasenkoeffizient), dadurch werden mehr Kerne gespalten, die Leistung steigt lawinenartig an. Wenn keine schnell wirksame Notabschaltung eingreift, wird der Reaktorkern, wie in Tschernobyl geschehen, innert Sekunden zerstört.

### Sicherheit beim weltweit ersten Kernreaktor

Der erste Kernreaktor der Welt, mit Graphit als Moderator (1942, Chicago, **Bild 1**) wurde ohne Abschirmung gebaut. Als er das erste Mal in Betrieb genommen wurde, befanden sich 50 der besten Physiker und Ingenieure ihrer Zeit wenige Meter neben dem Reaktorkern. Die Physiker waren sich ihrer Sache (zu Recht) sicher, der Reaktor verhielt sich gutmütig und war einfach zu regeln. Ein einziger, von Hand bedienter Steuerstab genügte, um die Kettenreaktion mit 40 t Uran sicher zu steuern. Trotzdem war Fermi, der wohl brillianteste Kernphysiker aller Zeiten, sehr vorsichtig. Er liess drei verschiedene, voneinander unabhängige Notabschaltungen einbauen:

- Automatische Abschaltung bei zu hohem Neutronenfluss mittels eines schweren, neutronenabsorbierenden Steuerstabs.
- Manuelle Notabschaltung mit einem weiteren Steuerstab.
- Einrichtung zum Fluten des Reaktorkerns mit einem starken Neutronenabsorber, manuell ausgelöst.

Jedes dieser drei Notabschaltsysteme wäre in der Lage gewesen, den Reaktor innert 1–3 s abzuschalten; eine selbst nach heutigen Massstäben vorbildliche Vorkehrung. Der Tschernobyl-Reaktor verfügte über kein einziges schnelles Notabschaltsystem.



University of Chicago

**Bild 1** Erster Kernreaktor, von Fermi am 2. Dezember 1942 in Chicago in Betrieb genommen (Chicago Pile 1). Drei unabhängige Notabschaltungsmechanismen garantierten die Sicherheit der 50 Wissenschaftler.

In Gegensatz zu den früher oft benutzten graphitmoderierten Reaktoren verhalten sich die heutigen wassermoderierten Leistungsreaktoren (Leichtwasserreaktoren) selbststabilisierend. Ein Verlust oder ein Sieden des Kühlwassers führt zu weniger moderierten Neutronen, die Kettenreaktion bricht zusammen, der Reaktor schaltet sich sozusagen selber ab. Eine zu einer Explosion führende Leistungsexkursion ist bei solchen Reaktoren unmöglich.

Ein frisch abgeschalteter Leistungsreaktor ist aber trotzdem alles andere als harmlos. Durch den radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte erzeugt er weiterhin eine beachtliche Wärmemenge, unmittelbar nach dem Abschalten etwa 5% der Nennleistung. Die Produktion dieser Nachwärme nimmt zwar rasch ab, nach einer Stunde auf ca. 1%, trotzdem muss der Reaktor gekühlt werden. Ist überhaupt kein Kühlwasser im Reaktorkern vorhanden (eine sehr extreme Situation) und versagen gleichzeitig sämtliche Notkühlsysteme, kann bereits nach kurzer Zeit die Temperatur so hoch steigen, dass es zu ersten Schäden kommt. Gelingt es

nicht, die Kühlung wenigstens rudimentär wiederaufzunehmen, beginnt der Kernbrennstoff zu schmelzen (Kernschmelze). Beim bisher schwersten Unfall mit einem Leichtwasserreaktor (Harrisburg) dauerte es etwa 2 h, bis die ersten Schäden an den Brennstoffumhüllungen auftraten und etwas später Teile des Kerns schmolzen.

Eine Kernschmelze stellt noch keine Gefahr für die Umgebung dar. Erst wenn sämtliche Barrieren und Rückhaltesysteme versagen (oder, wie bei Tschernobyl, nicht vorhanden sind), kann Radioaktivität in die Umgebung entweichen. Eine der grössten Gefahren geht von einer Dampfexplosion oder von einer (chemischen) Wasserstoffexplosion aus. Verdampft viel Kühlwasser, kann der Dampfdruck bei sehr hohen Temperaturen so stark ansteigen, dass eine mechanische Struktur (z. B. das Druckgefäss) explosionsartig versagt. Allerdings kann eine solche Dampfexplosion nur vorkommen, wenn gleichzeitig alle Überdruckventile versagen. Auch für eine chemische Explosion braucht es hohe Temperaturen: Ab ca. 900°C kann sich aufgrund einer

Reaktion der Zirkonummantelung mit dem Kühlwasser Wasserstoffgas bilden. Vermischt mit dem Sauerstoff der Luft, entsteht das hochexplosive Knallgas. Um dieses zu verhindern, haben alle heutigen Leistungsreaktoren mehrere Vorrichtungen gegen Knallgasexplosionen (katalytische Rekombinatoren, Glühzünder, Stickstofflutanlagen). Zudem ist ein modernes Containment (die massive Schutzhülle um einen Reaktor) auch für den Fall einer sehr grossen Explosion mit einer unrealistisch grossen Menge Wasserstoff ausgelegt (Berstdruck zwischen 8 und 12 at). Um bei noch grösseren Drücken das Containment vor einem Bruch zu schützen, öffnen sich automatisch Sicherheitsventile. Die austretenden Gase werden filtriert (Verhinderung von Austritt radioaktiver Substanzen).

### Sicherheitsvorkehrungen

Ein heutiger Reaktor besitzt eine ganze Reihe von Barrieren, welche verhindern, dass bei einem Unfall radioaktives Material an die Umgebung abgegeben wird (**Bild 2**).

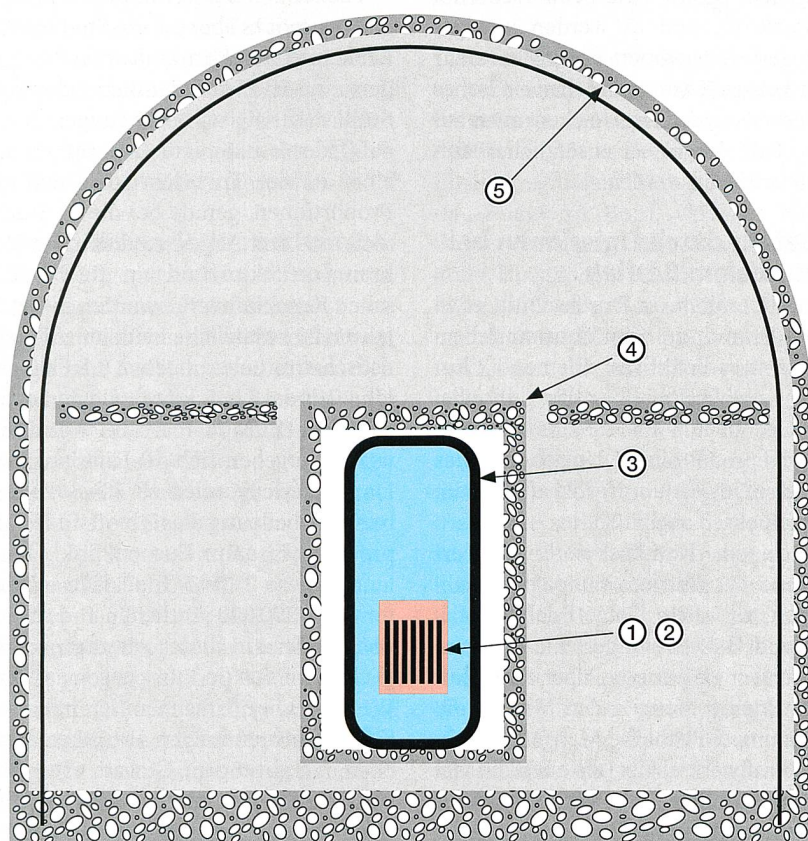
#### Erste Schutzbarriere

Die allererste Schutzbarriere stellt der Kernbrennstoff selber dar. Bei praktisch allen heutigen Leistungsreaktoren wird das Uran in seiner oxidierten Form ( $UO_2$ ) eingesetzt. Dieses keramische Material ist extrem hochschmelzend (2880°C) und vollständig wasserunlöslich. Bei einer Beschädigung oder Zerstörung der Brennelemente bleiben die meisten hochradioaktiven Spaltprodukte in der Uranoxidmatrix gefangen, selbst wenn der ganze Reaktor in Stücke gerissen wird. Nur ein Teil der meist kurzlebigen Edelgase (Xenon, Krypton) kann die Matrix verlassen.

Wenn der Kernbrennstoff für längere Zeit stark erhitzt wird (oder gar schmilzt), können auch die leicht flüchtigen Elemente wie Jod oder Cäsium in grösseren Mengen entfliehen. Hingegen ist es selbst bei einem lange andauernden Brand praktisch nicht möglich, dass die hochschmelzenden, schwer flüchtigen Elemente wie z. B. Plutonium, Strontium oder das Uran selber in grösseren Mengen das Reaktorgebiet verlassen.

#### Zweite Schutzbarriere

Die zweite Schutzbarriere stellt die gasdichte Umfüllung der Brennstäbe dar, in der Regel eine Zirkonlegierung mit Festigkeitseigenschaften ähnlich wie Stahl. Zirkon ist für Neutronen weitge-



**Bild 2** Schematische Darstellung der verschiedenen Schutzbarrieren eines heutigen Kernreaktors.  
 1: Brennstoff in Keramikform, 2: gasdicht verschweisste Hüllrohre der Brennstäbe,  
 3: Reaktordruckbehälter, 4: Betonabschirmung,  
 5: Stahlsicherheitsbehälter mit Stahlbetonhülle (Containment).

Wikipedia, Stefan-Xp

hend transparent. Allerdings ist diese Barriere bei einer heftigen Explosion oder bei einer Kernschmelze praktisch ohne Nutzen.

#### Dritte Schutzbarriere

Viel wichtiger ist die dritte Barriere, das massive Reaktordruckgefäss (fehlte in Tschernobyl), manchmal auch Primär-Containment genannt. Dieser Behälter aus hochfestem Stahl umschliesst den ganzen Reaktorkern. Mit einer Wandstärke von typisch 15–25 cm hält er hohe Drücke und Temperaturen aus. Beim bisher schwersten Unglücksfall mit einem Leichtwasserreaktor (Harrisburg) hielt das Druckgefäss sowohl dem Dampfdruck als auch der Kernschmelze stand.

#### Vierte Schutzbarriere

Die nächste Barriere ist die Betonabschirmung (Strahlenschutz) um den Reaktorkern, typisch 2–3 m dick. Da es sich nicht um eine rundum geschlossene Konstruktion handelt, wirkt sie als Barriere nicht besonders gut. Sie schützt aber den Reaktor vor massiven Einwirkungen von aussen.

#### Fünfte Schutzbarriere

Die letzte Barriere ist das Containment, bestehend aus einem gasdichten Stahlsicherheitsbehälter von 3–4 cm Wandstärke und einer etwa 1,2–2,6 m dicken Eisenbetonhülle, Durchmesser 30–60 m. Dieser von aussen gut sichtbare Bunker umfasst den ganzen Reaktor mit vielen Hilfs- und Noteinrichtungen. Bei neueren Generationen (EPR) werden sogar zwei Containments den Reaktor umhüllen. Der Tschernobyl-Reaktor besass kein Containment.

#### Inhärent sichere Reaktoren

Es ist möglich, inhärent sichere Reaktoren zu bauen. Diese können auch im schlimmsten Fall nicht schmelzen, da die Leistungsdichte im Reaktorkern zu klein ist (kleine bis mittelgrosse Reaktoren, typisch 20 MW). Bei einer Störung gehen solche Reaktoren auch ohne aktive Kühlung und Eingriffe von aussen in einen sicheren Zustand über.

Einen anderen Weg beschreiten die sogenannten Hochtemperaturreaktoren. Diese verwenden Materialien, die extreme Temperaturen aushalten, z. B. Karbid, und kühlen den Reaktor mit Gas. Im Störfall genügt die natürliche Konvektion zum Kühlen (Kugelhaufenreaktor), auch ein solcher Reaktor kann nicht

schmelzen. Es ist anzunehmen, dass in 20 oder 30 Jahren inhärent sichere Grossreaktoren der Standard sein werden.

#### Schnelle Brüter

Ein anderer Typ von Reaktoren, die schnellen Brüter, sind sicherheitstechnisch wesentlich heikler als die normalen Leichtwasserreaktoren. Sie können benutzt werden, um aus Natururan oder Thorium neuen Brennstoff zu «erbrüten». Mit Brutreaktoren könnte man die Energiebedürfnisse der Menschheit viele 1000 Jahre lang stillen.

Die Brutreaktoren heissen «schnell», weil sie mit schnellen (nicht moderierten) Neutronen arbeiten müssen, um aus Natururan (U-238) via Neutroneneingang Pu-239 zu «erbrüten». Je leichter ein Element ist, desto besser wirkt es als Neutronenabbremsler (Moderator). Deshalb darf kein Wasser im Reaktorkern sein. Man benutzt als Kühlmittel flüssige Metalle (Natrium oder Blei), die alles andere als einfach zu beherrschen sind.

Im Vergleich mit Leichtwasserreaktoren sind schnelle Brutreaktoren sicherheitsmässig sehr anspruchsvoll: Die Leistungsdichte ist höher, der Dampfblasenkoeffizient positiv (wie beim Tschernobyl-Reaktor), und es werden weniger verzögerte Neutronen erzeugt (Gefahr einer Leistungsexkursion). Um ein hohes Sicherheitsniveau zu erreichen, muss auf jeden Fall ein grosser zusätzlicher Aufwand betrieben werden.

#### Gefahr durch Emissionen bei normalem Betrieb

Kohle enthält im Durchschnitt etwa 1 ppm Uran und 3 ppm Thorium (ebenfals ein radioaktives Element). Ein 1-GW-Kohlekraftwerk entlässt aus diesem Grunde um die 20 t radioaktives Material pro Jahr in die Umgebung. Dies ist viel mehr, als ein Kernkraftwerk im Normalbetrieb abgibt.

Auch ein Kernkraftwerk emittiert während des Betriebs radioaktive Substanzen, vor allem einige Edelgase, Tritium und C-14. Besonders die Edelgase sind schwer zu filtern, über die Abluft finden kleine Mengen den Weg in die Umgebung. Sowohl die Mengen, die ein Kohlekraftwerk abgibt, als auch die viel kleineren Mengen eines Kernkraftwerks sind aber winzig im Vergleich zu dem, was in der Natur an radioaktiven Elementen vorkommt. Die Edelgase haben kaum eine biologische Wirksamkeit, sie werden weder von Pflanzen noch von Tieren aufgenommen. Im Gegensatz

dazu dringt sowohl C-14 als auch Tritium in unseren Nahrungskreislauf ein. Beide Substanzen werden aber auch fortlaufend von den kosmischen Strahlen in vergleichsweise gewaltigen Mengen erzeugt und kommen deshalb überall vor. In unserem Körper befinden sich beachtliche Mengen von beiden Stoffen, im Durchschnitt etwa 4000 Bq C-14 und etwa 25 Bq Tritium (1 Bq ist ein Zerfall pro s). Eine noch grössere Quelle von C-14 und von Tritium stellten die Testexplosionen in den 1950er- und 1960er-Jahren dar, die Konzentration an C-14 wuchs auf der Nordhalbkugel für einige Jahre auf etwa das Doppelte an. Eine Auswirkung auf die Gesundheit, z. B. Erhöhung der Leukämieraten, konnte aber nicht festgestellt werden. In Anbetracht der winzigen Strahlendosen ist dies auch nicht zu erwarten.

Das Gleiche gilt auch für die Umgebung eines Kohle- oder Kernkraftwerks. Die gemessenen Dosiswerte sind sehr viel kleiner als die natürlichen Belastungen. Ein gesundheitlicher Schaden kann mit bestem Wissen und Gewissen ausgeschlossen werden.

#### Leukämien bei Kernkraftwerken

Wie steht es aber um die Studien über Leukämien um Kernkraftwerke? Besonders eine 2007 veröffentlichte deutsche Studie (KiKK) wirbelte einigen Staub auf. Jeder Leukämiefall ist tragisch und einer zu viel. Trotzdem sollte man die Proportionen, gerade bei dieser Studie, nicht aus den Augen verlieren: Im Umkreis von 5 km rund um die 16 deutschen Kernkraftwerke wurden innert 23 Jahren 20 zusätzliche Leukämiefälle statistisch ermittelt, d. h. etwa 0,8 Fälle pro Jahr (Kinder bis 5 Jahre). Umgerechnet auf ganz Europa (ca. 200 Kernkraftwerke), ergeben sich 10 Fälle pro Jahr. Da Kinderleukämien zu 70–80% heilbar sind, bedeutet dies 2 bis 3 Todesfälle pro Jahr in ganz Europa (inkl. Russland). Diese 2 bis 3 Todesfälle müssen mit etwa 200 000 jährlichen Todesfällen von Kindern in dieser Altersklasse verglichen werden (in Europa, gemäss einer WHO-Studie); Ursachen: Krankheiten, Stürze, Verbrennungen, Ertrinken, Ersticken, Vergiftungen, Gewalt usw. Man kann sich fragen, ob es richtig ist, Millionen auszugeben, um herauszufinden, ob wirklich ein (im Verhältnis winziges) Risiko um Kernkraftwerke vorhanden ist. Da ein grosser Teil dieser 200 000 Todesfälle vermeidbar ist, ist es wohl sinnvoller, sich darauf zu konzentrieren.

Wer sich übrigens die Mühe nimmt, die Originalstudie durchzulesen, wird feststellen, dass die Autoren ihre Ergebnisse sehr vorsichtig interpretieren: Der Zufall, die Datenselektion oder andere Faktoren (z.B. Sozialstatus) könnten auch solche Resultate produzieren. Gerade Leukämien sind bekannt dafür, dass sie in «Clustern» auftreten. So variiert z.B. in Berlin die Leukämierate von einem Stadtkreis zum andern um bis zu einem Faktor 5 [2], Ursache unbekannt (man vermutet Mikroepidemien mit einem noch unbekanntem Erreger).

### Umfassendste Untersuchung

Zweifellos fördern starke Strahlendosen das Auftreten von Leukämien. Die beste Leukämiestatistik aller Zeiten ist die äusserst genaue Untersuchung der etwa 50 000 bestrahlten Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Bei einer knapp tödlichen Schockdosis betrug die Leukämierate etwa 3%. Bei einigen % der tödlichen Dosis zeigten sich aber überraschende Effekte: Die Leukämierate war kleiner als bei den Unbestrahlten. Ähnliche Resultate zeigten sich in Tierversuchen. Mehr über solche Effekte in [3].

Weltweit wurden im Zusammenhang mit Kernkraftwerken über 50 Leukämiestudien durchgeführt. In der überwiegenden Anzahl der Fälle zeigten sich keine Effekte. Diese sind bei den extrem kleinen Dosen auch nicht zu erwarten.<sup>1)</sup>

### Horrorszenario Kernschmelze

Bei heutigen Leichtwasserreaktoren ist der schlimmste Unfall eine Kernschmelze. Dass aber eine grössere Menge radioaktiver Substanzen alle Barrieren überwindet und das Kraftwerkgelände verlässt, ist bei der heutigen Generation von Leichtwasserreaktoren nur bei Extremszenarien denkbar (grosser Meteorit, Volltreffer einer grossen Nuklearbombe, Vulkanausbruch direkt unter dem Reaktor, Terrorakt).

Weltweit gibt es um die 1000 Reaktoren, darunter etwa 440 in Kernkraftwerken. Es gab bis 1979 im Westen 8 Kernschmelzunfälle. Zusätzlich wurden an Experimentierreaktoren für Sicherheitsstudien bewusst einige Kernschmelzen herbeigeführt.

Der schwerwiegendste Unfall fand 1979 in Harrisburg, USA, statt. In diesem Kraftwerk wurde aufgrund einer Kette von technischen Fehlern und Fehlinterpretationen [1] die Reaktorkühlung für mehrere Stunden vom Be-

dienpersonal ausgeschaltet. Knapp die Hälfte des Reaktorkerns schmolz, die Schmelze konnte aber den massiven Reaktordruckbehälter nicht durchdringen. Aber ohne massive Beschädigung des Containments wären auch nicht grössere Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung entwichen. Eine Wasserstoffexplosion liess den Druck zwar kurzzeitig massiv ansteigen, auf das Containment hatte dies aber keinen Einfluss. Ganz ohne Folgen für die Umgebung blieb der Vorfall aber nicht: Durch Fehlmanipulationen und aufgrund der dazumal fehlenden Filter gelangten radioaktive Gase nach aussen, allerdings in einer Menge, welche verglichen mit den natürlich vorkommenden radioaktiven Substanzen klein war. Etwas Gutes hatte Harrisburg: Der Schreck darüber wirkte nachhaltig; die Sicherheitsvorkehrungen und -vorschriften aller westlichen Reaktoren wurden überprüft und z.T. massiv verbessert. Ein ähnlicher Unfall kann heute nach bestem Wissen ausgeschlossen werden. Vor Harrisburg gab es im Westen insgesamt 8 Kernschmelzunfälle (davon 2 in zivilen Anlagen), nachher keinen einzigen mehr.

### Katastrophe unwahrscheinlich

Auch wenn bei einem Flugzeug viele redundante Sicherheitsmassnahmen existieren, gibt es doch eine Reihe von Einzelereignissen (Versagen der Motoren, Feuer an Bord, vereister Flügel, Strukturversagen, Explosionen ...) die unter Umständen zu einer Katastrophe führen können. Bei einem KKW mit mehrfach gestaffelten passiven und aktiven Sicherheitsmassnahmen ist eine Katastrophe, ausgelöst durch ein einziges Ereignis, schwer vorstellbar.

In westlichen Kernkraftwerken kann man bisher auf rund 10 000 Reaktorbetriebsjahre zurückblicken. Viele theoretische und experimentelle Analysen ermöglichen das Abschätzen der Wahrscheinlichkeit eines Unfalls relativ gut. Bei der ersten Generation von zivilen Leistungsreaktoren (bis etwa 1970) betrug die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze etwa 0,001/J, d.h. alle 1000 Betriebsjahre musste man damit rechnen. In der Tat gab es während den etwa 3000 zivilen Reaktorbetriebsjahren bis 1970 zwei Kernschmelzvorgänge. Bei den heutigen Reaktoren ist diese Wahrscheinlichkeit kleiner als  $10^{-4}$ /J. Bei etwa 500 Leistungsreaktoren bedeutet dies, dass höchstens alle 20 Jahre ein Kernschmelzeereignis auftritt.

Seit 31 Jahren gab es im Westen keinen einzigen solchen Vorgang.

Ein Kernschmelzvorgang bedeutet aber noch lange nicht, dass gefährliche Mengen radioaktiver Stoffe in die Umgebung gelangen. Damit dies geschieht, müssen sowohl das Reaktordruckgefäss als auch das Containment stark beschädigt werden. Die Wahrscheinlichkeit dafür beträgt heute bei einem gut gewarteten westlichen Reaktor etwa  $10^{-7}$ /J, also muss, bei 500 Reaktoren, alle 20 000 Jahre mit einem solchen Ereignis gerechnet werden. Bei den in Bau befindlichen Reaktoren der neusten Generation liegt diese Wahrscheinlichkeit dank zusätzlichen Sicherheitsmassnahmen bei weniger als  $10^{-8}$ /J. Also wird selbst bei 1000 Reaktoren höchstens alle 100 000 Jahre eine solche Katastrophe, verursacht durch technisches oder menschliches Versagen, zu erwarten sein. Ein brutaler Gewaltakt von aussen ist in diesen Abschätzungen aber nicht berücksichtigt.

### Ausseneinwirkung und Gefahren

Sowohl gewisse Naturphänomene als auch menschliche Einwirkung – absichtlich oder fahrlässig – können Reaktoren beschädigen und unter Umständen zu Gefahren führen.

#### Erdbeben

Ein extrem starkes Erdbeben könnte einen Reaktor so stark beschädigen, dass alle Notkühlssysteme versagen und eine Kernschmelze eintritt. Diese könnte langsam in den Boden dringen. Eine weiträumige Verstrahlung grösseren Ausmasses, wie bei Tschernobyl, ist nicht möglich. Dazu fehlen die extreme Aufheizung des Kernbrennstoffs durch die Leistungsexkursion, die Explosionen (Verteilung des heissen Kernbrennstoffes) und der 10-tägige Graphit-Brand.

#### Vulkanausbruch

Viel wirksamer wäre ein Vulkanausbruch direkt unter dem Reaktor oder der Absturz eines grossen Meteoriten auf den Reaktor, alles extrem unwahrscheinliche Ereignisse. Eher vorstellbar ist ein Volltreffer einer grossen Wasserstoffbombe, diese würde das radioaktive Inventar eines Kernreaktors noch gründlicher als beim Tschernobyl-Unfall über weite Gebiete verstreuen. Trotzdem ist dies kein besonders attraktives Ziel. Modellrechnungen zeigen, dass ein Einsatz einer solchen Bombe über einer Grossstadt sehr viel mehr Opfer und Schaden an-

richten würden. Eine «kleine» Bombe, etwa wie bei Hiroshima eingesetzt, kann den Reaktorkern nicht beschädigen.

### Waldbrände

Auch ein grosser Waldbrand in der Umgebung eines Kernkraftwerks ist nicht in der Lage, eine Katastrophe auszulösen. Selbst wenn ausserhalb des Containments Gebäude in Brand geraten (sehr unwahrscheinlich, schon wegen dem Sicherheitsabstand zum Wald und der sehr gut ausgestatteten Betriebsfeuerwehr), ist der Reaktor wie in einem massiven Bunker gut geschützt. Das Feuer hat keine Chance, durch das Containment zu dringen.

### Flugzeugabsturz

Gelingt es, was extrem schwierig ist, mit einem abstürzenden Flugzeug im richtigen Winkel das Kernkraftwerk auf wenige Meter genau zu treffen, so könnte in einem älteren Containment durch ein schweres Triebwerk ein Loch geschlagen werden. Der Reaktorkern ist aber zu gut geschützt (meterdicke Betonabschirmung, Druckbehälter), um ernsthaft beschädigt zu werden. Es ist praktisch unmöglich, dass der nachfolgende Treibstoffbrand (er würde vorwiegend ausserhalb des Containments stattfinden) sämtliche Sicherheitssysteme ausser Betrieb setzt und eine Kernschmelze provoziert.

Bei allen modernen Kraftwerken sind redundante Sicherheitssysteme (Notkühlungen) schwer verbunkert, es ist kaum vorstellbar, dass alles durch einen Brand in kurzer Zeit zerstört werden kann. Selbst wenn eine Kernschmelze auftritt

und das Reaktordruckgefäss beschädigt ist: Die Schmelze wird ihren Weg in die Tiefe suchen und, zumindest im Vergleich mit Tschernobyl, keine grössere Menge Spaltprodukte weiträumig an die Umgebung abgeben können.

### Terroristische Angriffe

Theoretisch könnten Terroristen versuchen, ein Kernkraftwerk zu erstürmen. Mit sehr viel Fachwissen, Aufwand (lastwagenweise Sprengstoff, schweres Material und Waffen) und Zeit könnten sie versuchen, eine Kernschmelze herbeizuführen, gleichzeitig sämtliche massiven Rückhaltesysteme zu sprengen oder zu zerstören (Druckgefäss, Reaktorabschirmung, Containment) und die Schmelze dazu zu bringen, möglichst viele hochradioaktive Elemente freizugeben.

Die dazu benötigten materiellen und personellen Ressourcen (sicher über 100 Leute, darunter Experten und Spezialisten) und die notwendigen Detailkenntnisse des Reaktors und aller Sicherheitseinrichtungen dürften die Möglichkeiten sämtlicher Terrorgruppen bei Weitem übersteigen. Die Erfolgsaussichten für eine grossräumige Verstrahlung durch einen Terrorakt sind bei einem modernen Reaktor so klein, dass wohl keine Terroristengruppe dies ernsthaft in Betracht zieht. Für Terroristen gibt es attraktivere Ziele. Zum Beispiel, ein grosses, vollgetanktes Flugzeug in eine Massenveranstaltung abstürzen zu lassen.

### Gefahren durch Treibstoffe

Sehr attraktiv für Terroristen sind auch Transporte von flüssigen Brennstoffen. Ständig durchqueren Benzintransportzüge dicht bevölkertes Gebiet. Ein Zug mit 35 Zisternenwagen voll von Benzin hat eine Energie, welche etwa einer halben Hiroshima-Bombe entspricht. Auch ohne einen Terrorakt entgleist alle paar Jahre ein solcher Zug, einige Tanks brechen auf, und ein Grossfeuer entsteht (1989 Ural/Russland: 575 Tote, 2004 Iran: 300 Tote, 2008 Viareggio/Italien: 31 Tote). Während eines starken Sturms könnte ein solches Ereignis unvorstellbare Folgen haben.

Noch viel öfters gibt es Unglücke mit Lasttankwagen, teilweise mit über 100 Toten. Tankschiffe mit Flüssiggas oder Benzin bergen ein noch viel verheerenderes Zerstörpotenzial. Ein Rheinschiff voll von Benzin besitzt ein Mehrfaches an Energie als die Hiroshima-Bombe, und die ganz grossen Flüssiggastanker übertreffen sogar eine moderne Wasser-

### Hinweis

#### Tschernobyl-Katastrophe

Auf die Tschernobyl-Thematik wird hier aus Platzgründen nur beschränkt eingegangen. Ein Beitrag, der sich detailliert mit der Tschernobyl-Katastrophe auseinandersetzt, wird in der Oktober-2011-Ausgabe des Bulletins SEV/VSE folgen.

stoffbombe. Entsprechend apokalyptisch sind die Worst-Case-Szenarien.

### Das Leben ist gefährlich

Die Wahrscheinlichkeit, durch ein Unglück zu sterben, beträgt im Westen etwa 1%. Die Wahrscheinlichkeit, durch eine Naturkatastrophe zu sterben, liegt weltweit um 0,1%. Technische Grosskatastrophen kommen vergleichsweise viel seltener vor und mit meist viel kleineren Opferzahlen. Noch viel weniger wahrscheinlich sind heute Kernkraftwerkunfälle; die Wahrscheinlichkeit, dadurch zu sterben, ist, selbst bei äusserst pessimistischen Annahmen (alles Tschernobyl-Unfälle), höchstens 0,00001%. Von einem Meteoriten getötet zu werden, ist viel wahrscheinlicher (etwa 0,0001%). Trotzdem steht die Kernkraft bei Risikoumfragen meist an erster Stelle. Man kann sich fragen, ob ein solches Fokussieren auf die Risiken bzw. die Sicherheit von KKW's vernünftig ist. Immerhin kostet dieses extreme Sicherheitsstreben unzählige Milliarden, Geld, welches bei vielen anderen, riskanteren Systemen wesentlich besser angelegt wäre.

### Referenzen

- [1] Guido Santner, Wie Notkühlssysteme eine Kernschmelze verhindern. Bulletin SEV/AES 4/2009, 9–13.
- [2] www.mortalitaet.nicoleueberschaer.de.
- [3] Walter Rüegg, Wie gefährlich sind radioaktive Strahlen? Bulletin SEV/AES 4/2009, 15–19.

### 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

<sup>1)</sup> Eine gute, wissenschaftlich fundierte Übersicht über die Problematik der Kinder um Kernkraftwerke findet man auf [www.fme.ch/cms/fileadmin/Webmaster/Dataien/AGKIS\\_Flyer\\_FME\\_Downloadversion\\_\\_8\\_Dez\\_09\\_.pdf](http://www.fme.ch/cms/fileadmin/Webmaster/Dataien/AGKIS_Flyer_FME_Downloadversion__8_Dez_09_.pdf).

### Résumé

#### A quel point les centrales nucléaires sont-elles dangereuses?

#### Risques potentiels et mesures de sécurité

Surtout depuis Tchernobyl, les centrales nucléaires suscitent de grandes craintes parmi la population. Ces craintes sont-elles justifiées? Quels sont, objectivement, les risques réels? C'est de ces questions que traite cet article, dans lequel les risques potentiels sont détaillés et présentés dans le contexte d'autres sources de danger. Les mesures de sécurité des centrales nucléaires sont expliquées et les probabilités de survenance de situations critiques sont indiquées. No