Kernkraftwerke als Sicherheitsproblem

Autor(en): **Baumgartner, G. / Glauser, E. / Heimgartner E. / Schneider, Th.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95 (1977)**

Heft 44: **SIA-Heft, 5/1977: Sicherheit der Kernkraftwerke**

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73482

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

System Flugwesen: Mensch – Flugzeug – Geschwindigkeit/Höhe, dem *System Chemie:* Mensch – Anlage – Prozess.

Wie bereits erwähnt, stellt das Kernkraftwerk ebenfalls ein solches System dar, bestehend aus: Mensch – Anlage – Wärmeerzeugung/Strahlung. Für den Aussenstehenden erscheinen die oben erwähnten Systeme oft sehr komplex und sind für ihn nicht genügend durchschaubar. Dies erzeugt eine gewisse Unsicherheit, wenn nicht gar Unbehagen auch bei technisch versierten, aber auf dem speziellen Gebiet unerfahrenen Ingenieuren oder Architekten.

In der mit der vorliegenden Nummer beginnenden Artikelserie unternehmen deshalb Fachleute aus den verschiedensten Gebieten der Nukleartechnik den Versuch, ihren in anderen Gebieten tätigen Kollegen die Sicherheitsproblematik von Kernkraftwerken anschaulich darzustellen. Im Zeitraum von etwa einem halben Jahr werden deshalb im Rahmen dieser Serie Beiträge zu den in der Tabelle aufgeführten Themen erscheinen.

Die Diskussion um die Risiken der Kernenergie hat in den letzten Jahren weltweit zum Teil geradezu groteske Formen angenommen. Zahllose Autoren haben aus diesem Grunde vermehrt mit aufklärenden Beiträgen die Diskussionen auf eine sachliche Ebene zurückzuführen versucht. Auch den Verfassern der vorliegenden Artikelserie dürfte nicht gelingen, was Hunderte vor ihnen vergeblich versucht haben. Das einzige, das von dieser Serie erwartet werden darf, ist, dass einige Leser dieses Blattes ihre Einstellung für oder gegen die Kernenergie mit einem besseren Verständnis der Probleme zu rechtfertigen vermögen.

Der Vorstand der FII dankt allen Verfassern und Mitarbeitern dieser Publikationsserie für ihren Beitrag zum Zustandekommen des Vorhabens. *Emil Jehle*, Pratteln

Kernkraftwerke als Sicherheitsproblem

Von **G. Baumgartner, E. Glauser, E. Heimgartner** und **Th. Schneider**, Zürich

Sicherheit von Kernkraftwerken: Man müsste sich eigentlich fragen, ob eine Publikation zu diesem Thema heute noch sinnvoll ist. Was gibt es dazu überhaupt noch zu sagen, was nicht schon vor dem Hintergrund jeder denkbaren sozialen, politischen und wissenschaftlichen Geisteshaltung gesagt worden ist? Die Diskussion eines jeden auch noch so kontroversen Gesprächsthemas müsste sich einmal erschöpfen, nachdem alle Sachverhalte geklärt und damit der Ermessensspielraum und die verschiedenen Standpunkte klar dargelegt wurden. Die Diskussionen sind aber offensichtlich nicht erschöpft und gehen unermüdlich weiter.

Ein Beitrag zum Problem der Sicherheit von Kernkraftwerken muss sinnvollerweise mit einer Klärung des Begriffs «Sicherheit» beginnen. Da Sicherheitsprobleme in vielen Bereichen menschlicher Betätigung in den letzten Jahren ein so breites Interesse gefunden haben, könnte man an sich vermuten, der Begriff sei genügend geklärt und es hätten nur die spektakulären technischen Entwicklungen der letzten Jahre die Kontroverse um die Sicherheitsfrage ausgelöst. Dass weder das eine noch das andere vollends zutrifft, bedarf keines besonderen Hinweises.

Seit Beginn des industriellen Zeitalters haben viele technische Schöpfungen den Menschen mit zusätzlichen und neuartigen Risiken belastet. Doch das Erstaunen und die Bewunderung der neu geschaffenen technischen Möglichkeiten vermochten diese Risiken offenbar stets zu kompensieren, selbst wenn sie als solche erkannt wurden. Diese bis noch vor wenigen Jahren ungetrübte Begeisterung hat zumindest den Industrienationen vieles von dem gebracht, was ihren Lebensstandard charakterisiert, den sie nicht ganz ohne Stolz mit dem Adjektiv «hoch» versehen.

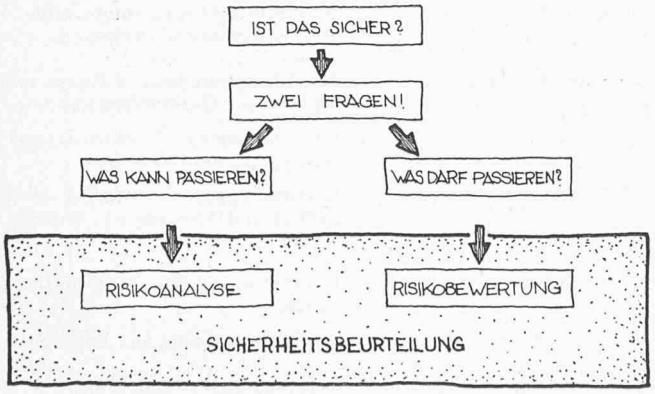


Bild 1. Grundmodell der Sicherheitsbeurteilung. Auflösung des Gesamtproblems in Teilprobleme

Auch die Entwicklung der Kernenergie wurde von dem noch unerschütterten Machbarkeitsglauben der vergangenen Jahrzehnte getragen und nach dem technischen Durchbruch als die «noch gerade rechtzeitige» Lösung der Energieprobleme gefeiert. Was hat nun wirklich dazu geführt, dass gerade die Kernenergie praktisch von heute auf morgen zum Gegenstand schärfster Kritik wurde? Liegt der Grund tatsächlich in den Unterschieden zur konventionellen, d.h. nicht nuklearen Technik, also z.B. der enormen Grösse dieser Anlagen, der besonderen Art der Gefährdung oder der Vermutung, die technischen Probleme seien heute noch nicht bewältigt? Oder liegt der Grund nicht eher auf energiepolitischer oder rein politischer Ebene?

Sicherheit in der Technik

Sicherheit und Risiko

Das Problem der Sicherheit technischer Anlagen ist zwar heute sehr aktuell, klare und allgemein anerkannte *begriffliche und methodische Grundlagen zur Lösung von Sicherheitsproblemen fehlen* jedoch weitgehend. Dieser Mangel hatte so lange keine untragbaren Folgen, als die auf Erfahrung beruhende Sicherheitstechnik einigermassen mit der Entwicklung der technischen Systeme und deren Gefahren Schritt halten konnte.

Immer mehr rücken aber heute Anlagen in den Vordergrund, bei denen ein Versagen zwar äusserst unwahrscheinlich ist, dieses seltene Ereignis jedoch zu ausserordentlich schwerwiegenden Folgen führen kann. Diese Art von Gefahr stellt in verschiedener Hinsicht Probleme. Einmal ist eine rein empirische Sicherheitstechnik offensichtlich nicht geeignet, um solche Systeme zu planen. Man kann es sich hier ja gar nicht leisten, Erfahrungen zu sammeln. *Aber auch in der gefühlsmässigen Bewertung solcher Gefahren ist man weit-*

gehend überfordert. Die an sich schon nicht sehr solide Vorstellung des Begriffes «sicher» gerät hier erst recht ins Wanken.

Ein zentrales Problem der Sicherheitsbeurteilung technischer Systeme besteht darin, dass in der Regel *zwischen dem technischen und dem nichttechnischen Teil einer Sicherheitsbeurteilung zuwenig unterschieden* wird. Bild 1 soll diese Zweiteiligkeit illustrieren. Dabei wird von der Frage «Ist das sicher?», wie sie der Laie normalerweise stellt, ausgegangen.

Heute werden im allgemeinen beide Fragen, welche in Bild 1 formuliert sind, im rein technischen Bereich behandelt, d.h. ohne Einbezug der Öffentlichkeit, politischer Gremien usw. Wer aber der Frage der Risikobewertung und damit der Frage *«Was darf passieren?»* oder eben *«Wie sicher ist sicher genug?»* etwas weiter nachgeht, sieht rasch, dass dies niemals eine rein technische Frage sein kann. Damit kann es aber auch kaum Aufgabe technischer Experten allein sein, die Antwort auf diese Frage zu geben.

Bis heute haben sich Diskussionen um die erforderliche Sicherheit meistens auf der Ebene der Sicherheitsmassnahmen abgespielt. Erfahrung in der *Formulierung von eigentlichen Sicherheitszielen* sind spärlich. Die Kernenergie gehört dabei zu den Bereichen, die als erste nach expliziten Sicherheitszielen gesucht haben. Da aber in den meisten übrigen Bereichen der Technik analoge Ansätze fehlen, sind die Vergleichsmöglichkeiten bis heute sehr beschränkt.

Wichtig ist es, dass die sicherheitsmässige Bewertung eines technischen Systems nie rein objektiv sein kann, da *immer Wertvorstellungen dabei im Spiel* sind. Die Forderung nach Objektivität oder Rationalität hat deshalb hier deutliche Grenzen. Eher realistisch ist hingegen wohl die Forderung nach Transparenz, also insbesondere die Bekanntgabe der Motive, die einen bei der Bewertung der Sicherheitsfrage bei solchen Systemen leiten.

Dass die Forderung nach absoluter Sicherheit kaum sinnvoll ist, sieht man rasch ein, wenn man sich mit Problemen dieser Art näher befasst. Damit wird aber *Sicherheit eine Frage des Masses.* Als geeignete Grösse, welche die Funktion eines solchen Masses übernehmen soll, wird heute der Risikobegriff betrachtet. Die «Sicherheit» eines Systems wird also an seiner «Unsicherheit» gemessen. Diese Risikogrösse R hängt von der Wahrscheinlichkeit w und den Auswirkungen A möglicher Schadenereignisse ab.

Risiko $R = f(w, A)$

Das Beispiel von Bild 2 soll dies kurz illustrieren. Es werden hier drei Munitionsdepots gezeigt, bei denen drei ganz verschiedene Objekte im Falle eines Explosionsereignisses exponiert wären. Einer zunehmenden Zahl exponierter Personen steht eine abnehmende Expositionszeit gegenüber. Im ersten Fall a ist z.B. bei einer Explosion stets mit einem Opfer zu rechnen, im andern Extremfall können zwar maximal 100 Personen betroffen sein, dies aber nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 1%.

Um Sicherheit aber wirklich messen zu können, müssen die beiden Grössen w und A miteinander zu einer Grösse verknüpft werden. Normalerweise wird diese Verknüpfung mit dem Produkt $R = w \cdot A$ definiert. In der Statistik häufiger Ereignisse, z.B. bei Verkehrsunfällen hat, dieses Produkt eine ganz bestimmte Bedeutung. Es gibt den mittleren zu erwartenden Schaden je Ereignis bei einer Grosszahl von Ereignissen an. Bei seltenen oder gar sehr seltenen Ereignissen wird diese Bedeutung gegenstandslos. Die Definition $R = w \cdot A$ ist in diesem Fall höchstens eine *subjektive Konvention.* Sie würde bei den Munitionsdepots in Bild 2 zu einem in allen Fällen gleichen Risiko führen. Dass diese Definition aber in Wirklichkeit mit Vorsicht anzuwenden ist, zeigt auch das

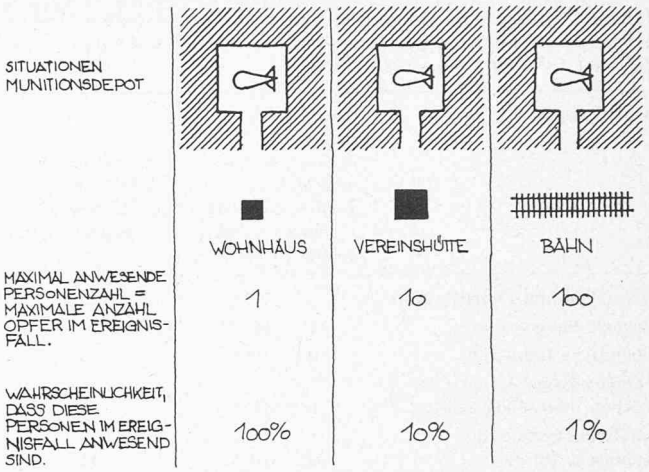


Bild 2. Beispiel für unterschiedliche Situationen bezüglich Ausmass und Wahrscheinlichkeit eines Schadenereignisses

Beispiel von Bild 3. Hier wird zwar ein Los gezeigt, mit dem man gewinnen kann, während Sicherheitsprobleme Lose sind, mit denen wir eine Verlustchance eingehen. Das Phänomen, das gezeigt werden soll, tritt jedoch in genau gleicher Weise auf und kann an diesem «Gewinnlos» vielleicht besser verstanden werden als an einem «Verlustlos». Kann man mit einem solchen Los beliebig oft an einer Lotterie teilnehmen, so ist leicht einzusehen, dass der mittlere Gewinn schliesslich 5000 Franken sein wird. Kaum jemand würde aber 5000 Franken ($= w \cdot A$) für dieses Los bezahlen, wenn er nur einmal an einer solchen Lotterie teilnehmen kann.

Es soll hier nicht näher auf die Hintergründe und Konsequenzen dieses Effektes eingegangen werden. In der formalen Entscheidungstheorie wird er als *«Risikoaversion»* bezeichnet. Das Einführen einer solchen Risikoaversion – eine rein subjektive Grösse – bewirkt z.B. dass ein Ereignis mit 100 Opfern nicht gleich bewertet wird wie 100 Ereignisse mit einem Opfer. Somit werden also die Risiken aus den drei Fällen in Bild 2 unterschiedlich empfunden.

Bei der Angabe von Risiken ist stets zwischen zwei verschiedenen Standpunkten zu unterscheiden. Als *individuelles Risiko* wird das Risiko einer einzelnen Person verstanden; z.B. infolge einer bestimmten Gefahr, tödlich zu verunfallen. Als *Gruppenrisiko* wird das Gesamtrisiko der betroffenen Gruppe, bzw. der Gesellschaft als ganzer verstanden. Dass diese beiden Werte weitgehend unabhängig voneinander sind, hängt einerseits damit zusammen, dass beim Gruppenrisiko die Anzahl der Betroffenen ins Spiel kommt, beim individuellen Risiko hingegen nicht (Tabelle I).

Anderseits spielt hier die Tatsache, dass ein bestimmtes Gruppenrisiko praktisch nie gleichmässig über die angesprochenen Gruppen verteilt ist, eine massgebende Rolle (Bild 4). So geht z.B. aus der in der Statistik angegebenen Anzahl Opfer in einer Explosivstoffabrik nicht hervor, dass das individuelle Risiko der einzelnen Angestellten dieser

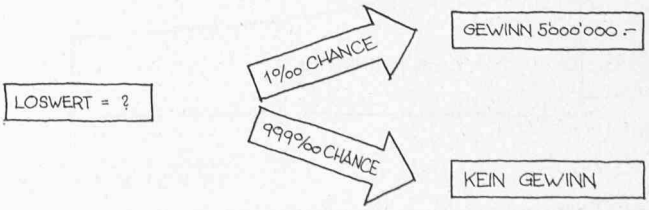


Bild 3. Lotterielos als Beispiel für die Bewertung von Risikosituationen. Wert des Loses als Mass für die subjektive Bewertung eines Risikos

Tabelle I. Gegenüberstellung des mittleren individuellen Risikos der Beschäftigten und des Gruppenrisikos der Gesellschaft in der Schweiz für einige Arbeitsgattungen

Arbeitsgattung	*Jährliche Unfalltodeswahrscheinlichkeit für den einzelnen Vollbeschäftigten = mittleres individuelles Risiko*	*Anzahl Tote pro Jahr für die ganze Schweiz = Gruppenrisiko*
Holzfällen und Holztransport	$6 \cdot 10^{-3}$	2
Engeres Baugewerbe	$1 \cdot 10^{-3}$	204
Chemische Industrie	$0{,}3 \cdot 10^{-3}$	17
Fabrikmässige Betriebe der mechan. Metallbearbeitung	$0{,}1 \cdot 10^{-3}$	10
Kaufmännische und technische Büros	$0{,}05 \cdot 10^{-3}$	16

Fabrik unter Umständen mindestens um einen Faktor 1000 verschieden sein kann.

Die Ermittlung des Risikos in der *Risikoanalyse* kann je nach System sehr kompliziert sein. In erster Linie betrifft dies die Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten. Aber auch die Abschätzung der möglichen Auswirkungen eines Schadenereignisses kann in vielen Fällen zu erheblichen Schwierigkeiten führen, da die notwendigen technischen Grundlagen sehr oft unvollständig sind. Eine gedankliche Gliederung der Risikoanalyse, die sich in vielen Anwendungsbereichen als nützlich erwiesen hat, ist in Bild 5 dargestellt.

Die *Risikobewertung* als zweiter Schritt einer Sicherheitsbeurteilung stellt ein ausserordentlich komplexes Problem dar. Einerseits kommen hier sehr vielschichtige Gesichtspunkte ins Spiel, die z.T. nur indirekt mit dem technischen Sicherheitsproblem eines Systems zu tun haben. Anderseits kann eine Risikobewertung letztlich nur auf subjektiven Wertvorstellungen beruhen, die naturgemäss sehr verschieden sein können und sich nur schwer gegenüberstellen lassen.

Aber schon die Fragestellung der Risikobewertung an sich, nämlich die Frage nach dem *unvermeidbaren Restrisiko,* dem *akzeptierbaren oder zulässigen Risiko,* schockiert heute oft noch. Hier kann nun allerdings festgestellt werden, dass eine offene Diskussion der Risikobewertung bisher stets zu einer Verbesserung der Sicherheit geführt hat. Die einzige Alternative zu einer Diskussion dieser Fragen wäre es, Systeme zu entwickeln und damit Risiken zu erzeugen, ohne sie zu kennen und bewusst zu beurteilen. Es ist zwar eine Tatsache, dass manch einer höhere Risiken akzeptiert, solange er sie nicht erkennt, hingegen bei einmal ermittelten Risiken strengere Massstäbe anlegt. Ob dies vernünftig ist, darf sicher in Frage gestellt werden. Man muss gleichzeitig aber anerkennen, dass Sicherheitsprobleme auch rein emotionale Komponenten haben, wie z.B. Angst. Angst ist aber kaum eine Grösse, die stets proportional zu messbaren Risiken sein wird, und doch ist sie vielleicht ein sehr wichtiger Aspekt der Lebensqualität.

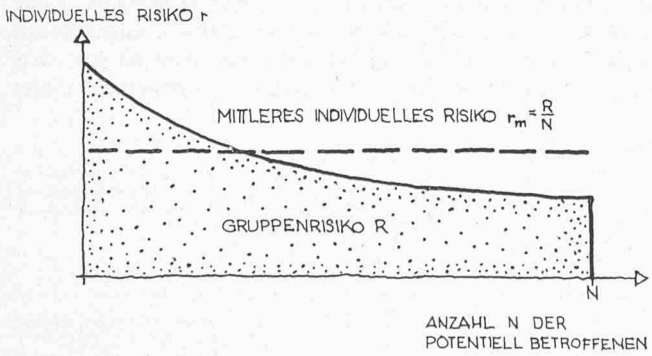


Bild 4. Verteilungsfunktion des individuelen Risikos über eine betroffene Personengruppe. Fläche unter der Kurve entspricht dem Gruppenrisiko

Die verschiedenen Überlegungen, welche die Bewertung von Risiken beeinflussen, können vereinfachend in vier Gruppen gegliedert werden:

- Risikovergleiche
- Risiko/Nutzen-Überlegungen
- Risiko/Kosten-Überlegungen
- psychologische, politische, rechtliche Überlegungen usw.

Risikovergleiche sind natürlich deshalb sehr aufschlussreich, weil Sicherheit immer eine relative und nie eine absolute Grösse sein wird. Risikovergleiche allein können aber niemals die Basis für die Bewertung von Risiken darstellen. Nicht nur müsste sonst die heutige Realität als absurd bezeichnet werden, was ja kaum weiterhelfen würde. Vielmehr sieht man rasch ein, dass eine Sache noch lange nicht sinnvoll zu sein braucht, bloss weil das Risiko kleiner ist als ein anderes vorhandenes Risiko.

Massgebend dafür, ob man ein Risiko eingeht, ist wohl in mindestens so hohem Masse der *Nutzen,* den man sich als Gegenleistung verspricht. Nutzengrössen sind aber meist noch schwieriger zu erfassen und zu bewerten als Risikogrössen, da hier die Wertmassstäbe noch weiter auseinandergehen. Wer dies nicht einsieht und anerkennt, wird aber der Sicherheitsproblematik wohl ebenso wenig gerecht wie derjenige, der die technischen Zusammenhänge eines Sicherheitsproblems nicht überblickt.

Die Stellung von *Risiko/Kosten-Überlegungen* erkennt man rasch, wenn man sich vor Augen hält, dass *jedes* System mit mehr Geld noch sicherer gemacht werden kann. Wo hier die sogenannte «vernünftige» Grenze liegt, ist meist gar nicht leicht zu entscheiden.

Psychologische, politische, rechtliche Aspekte usw. wurden z.T. bereits mehrfach erwähnt. Dass sie das Sicherheitsproblem massgebend beeinflussen, ist unbestreitbar. Offen ist nur, wieweit diese Zusammenhänge erkannt werden und wie tolerant man im Bereich von Wertvorstellungen ist. Es kann niemandem verboten werden, aus Angst oder anderen, scheinbar irrationalen Beweggründen eine Sache abzulehnen, wenn er bereit ist, die Konsequenzen auf sich zu nehmen.

Solange ein Risiko überblickbar erscheint, weitgehend freiwillig getragen wird und man den Nutzen der Tätigkeit schätzt und unmittelbar spürt, werden vielleicht hohe Risiken akzeptiert. Wenn ein Risiko jedoch in seinem Ausmass unerfassbar, weitgehend von andern auferlegt erscheint und man an der Notwendigkeit einer Aktivität zweifelt und bereit ist, darauf zu verzichten, dann wird vielleicht überhaupt kein Risiko akzeptiert.

Anwendung des Risikokonzeptes auf Kernkraftwerke

Wie hoch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke auch immer gesteckt werden, absolut kann auch hier die Sicherheit nie sein. Selbst wenn die Anlagen fehlerfrei berechnet und konstruiert sind, bleibt ein gewisses Risiko. Wie bei anderen Bauwerken müssen auch hier bei der Planung bestimmte Lasten festgelegt werden, auf welche das Bauwerk anschliessend bemessen wird.

Beispiele: Hochhaus – Wind
Brücke – Erdbeben
Staudamm – Erdrutsche

Jede Anlage ist damit primär sicher für Lasten, auf die sie ausgelegt wurde. Diese können bei KKW zwar hoch angesetzt werden, eine Überschreitung, obwohl äusserst unwahrscheinlich, ist jedoch denkbar (z.B. Erdbeben). Aus dieser

Tatsache abzuleiten, ein System könne nicht als «sicher» bezeichnet werden, ist aber kaum vernünftig, ausser man wolle überhaupt alle Systeme als «unsicher» bezeichnen.

Die bei der Planung von Kernkraftwerken angewandte *quantitative Methodik* zur Erfassung von Risiken, bei welcher die verschiedenen Einflüsse nach ihrer Wahrscheinlichkeit und ihren Auswirkungen beurteilt werden, ist, bei konsequenter Anwendung, an sich das beste Instrumentarium, das uns heute zur Behandlung der obigen Problematik zur Verfügung steht. Die letzte führt insbesondere zu einem sehr hohen Stand an Kenntnis der Zusammenhänge, die für viele andere technische Systeme heute bei weitem noch nicht erreicht wurde.

Auf der anderen Seite muss man klar sehen, dass auch das beste Instrument seine Grenzen hat. Die Zusammenhänge in Systemen, wie sie Kernkraftwerke darstellen, sind derart kompliziert, dass die Modelle zu deren Erfassung stets mehr oder weniger vereinfachend sein werden. Eine ständige Verbesserung unter Berücksichtigung der laufend gewonnenen Erfahrungen und besseren Grundlagen kann aber schliesslich zu einem sehr hohen Grad an Zuverlässigkeit führen.

Eine Grundschwierigkeit besteht allerdings bei Systemen mit sehr kleiner Ereigniswahrscheinlichkeit. Gerade die geringe Ereigniswahrscheinlichkeit führt ja dazu, in vielen, entscheidenden Fragen gar keine Erfahrungen sammeln zu können. Eine eigentliche Bestätigung der theoretischen Modelle ist daher hier sehr schwierig.

Im *Bereich sehr kleiner Wahrscheinlichkeiten* lässt uns aber auch unsere intuitive Beurteilungsfähigkeit im Stich. Ob eine Wahrscheinlichkeit 10^{-6} oder 10^{-8} pro Jahr ist, kann auch nicht durch Diskussion ermittelt werden, und doch sind gerade solche Fragen wesentlich. Die theoretischen Modelle, die zur Lösung dieser Probleme angewendet werden, werden aber nie eine vollständige Simulation der Wirklichkeit darstellen oder gar eine Prophezeiung zukünftiger Ereignisse erlauben.

Nicht nur die Ermittlung der Ereigniswahrscheinlichkeit ist bei Kernkraftwerken besonders komplex. Auch die *Quantifizierung der möglichen Auswirkungen* eines Ereignisses bringt verschiedene, erhebliche Schwierigkeiten mit sich, reicht doch ihr Spektrum von den recht gut erfassbaren und beurteilbaren unmittelbar tödlichen Wirkungen der Radioaktivität bis zu den schwer erfassbaren, langfristigen Wirkungen, wie z.B. Krebserkrankungen und genetischen Schäden.

Noch vielschichtiger wird das Problem, wenn man daran denkt, dass es gleichzeitig um eine ganze Reihe verschiedener Fragen geht: radioaktive Strahlung im Normalbetrieb, Austritt von Radioaktivität bei zufälligen Störfällen (interne, externe), Sicherheit gegen absichtliche Eingriffe usw.

Die bisher mangelnde grundsätzliche Auseinandersetzung mit dem Sicherheitsproblem in der Technik haben die Kernkraftwerke insbesondere bei der Risikobewertung zu spüren bekommen. Solange in anderen Bereichen hier nicht nachgezogen wird, fehlt für eine Beurteilung der hierfür erarbeiteten umfangreichen Grundlagen die Vergleichsbasis. Das Problem ist noch zusätzlich erschwert worden, indem während der Diskussion von Sicherheitsfragen auch Fragen über Energiepolitik, Umweltschutz und Wachstumsschranken in höchstem Masse aktuell wurden. Da aber Sicherheitsfragen eben unter anderem auch Risiko/Nutzen-Fragen sind, *kann und darf man diese verschiedenen Probleme nicht voneinander isolieren.*

Immerhin hat die Kernkraftwerk-Problematik nicht nur im technischen Bereich, sondern auch in den weniger rationalen Bereichen viele wichtige Denkanstösse geliefert und auf der Suche nach möglichen Lösungen etwelche Schritte vorwärts geführt. Nicht zuletzt profitieren heute manche, weniger problematische Gebiete in hohem Masse von diesen Erkenntnissen.

Bild 5. Gedankliche Gliederung der Risikoanalyse in drei Hauptschritte

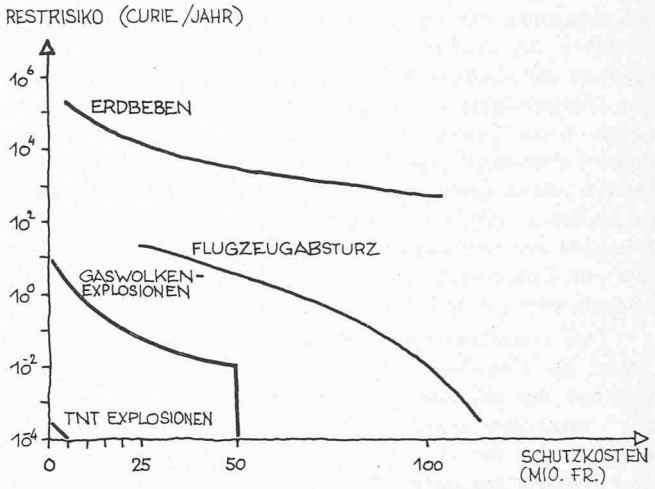


Bild 6. Vergleich der Beziehung zwischen Restrisiko und Schutzkosten für Erdbeben, Flugzeugabsturz und äussere Explosionen bei Kernkraftwerken. Das Restrisiko ist ein Mass für das verbleibende Risiko nach erfolgten Schutzmassnahmen (Curie ist eine Mengeneinheit der Radioaktivität)

Ausgewogenheit des Sicherheitskonzeptes

Weit weniger kompliziert als die Frage nach dem erforderlichen Sicherheitsniveau ist die Frage nach der *Ausgewogenheit* verschiedener Teilrisiken. Bei so teuren und komplizierten Anlagen ist es besonders wichtig, die verfügbaren Mittel ausgewogen zur Verbesserung der Sicherheit einzusetzen. Das Optimum wird dann als erreicht betrachtet, wenn man die Sicherheit einer Anlage nicht mehr erhöhen kann, indem man Geld von einer Sicherheitsmassnahme zu einer anderen verschiebt. Man hat dann für das gesamthaft investierte Geld die höchste Sicherheit, bzw. die erforderliche Sicherheit möglichst wirtschaftlich erreicht.

Wirtschaftlich denken hat hier nichts damit zu tun, dass auf Kosten der Sicherheit gespart wird. Auch sehr sichere Systeme können mehr oder weniger wirtschaftlich erstellt werden.

Eine solche wirtschaftliche Optimierung ist natürlich nur möglich, wenn ein *klares, quantitatives Risikomodell* vorliegt, das eine vergleichende Beurteilung verschiedener Teilrisiken erlaubt. Eine Untersuchung dieser Art wurde z.B. für die äusseren Einwirkungen Erdbeben, Flugzeugabsturz sowie Gas- und Explosivstoffexplosionen durchgeführt. Bild 6 zeigt das Restrisiko bezüglich dieser Einwirkungen in Abhängigkeit des investierten Sicherheitsaufwandes. Man erkennt aus dieser Figur leicht, dass die *Kostenwirksamkeit* bei den verschiedenen untersuchten Einflüssen sehr unterschiedlich ist. Auch hier ist wieder zu bemerken, dass neben dem eigentlichen Optimierungseffekt, den solche Betrachtungen haben, der tiefere Einblick in die Zusammenhänge, der bei den entsprechenden Untersuchungen gewonnen wird, ebenso bedeutsam ist wie der Gewinn an Wirtschaftlichkeit.

Sicherheit von Kernkraftwerken

Grundsätzliches

Kernkraftwerke stellen wie alle Energieerzeugungsanlagen eine Gefährdung für die Umwelt dar, indem von diesen Anlagen sowohl im Normalbetrieb wie auch bei Störfällen schädigende Einflüsse ausgehen können. Die Kernanlagen unterscheiden sich von den vor allem im Ausland weitverbreiteten konventionellen thermischen Kraftwerken durch die besonderen Eigenschaften des *nuklearen Brennstoffes*. Die Wärme wird nicht durch eine Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt, sondern durch Kernspaltung. Währenddem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe Sauerstoff aus der Umgebung verbraucht und Kohlenoxide und andere Produkte wieder abgegeben werden, entstehen bei der *Kernspaltung* Spaltprodukte, die wiederum zerfallen und auch nach der Unterbindung der Kettenreaktion *radioaktive Strahlung* aussenden. Die Spaltprodukte gefährden bei zu intensiver Strahlung das Leben in der Umwelt in verschiedenem Masse. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber manch anderen Gefährdungen besteht jedoch darin, dass die Bedrohung durch die menschlichen Sinne nicht direkt wahrgenommen werden kann. Die Intensität der radioaktiven Strahlung ist dagegen, im Gegensatz zur Konzentration einiger gefährlicher chemischer Substanzen, sehr gut und einfach messbar.

Das *Sicherheitsproblem der Kernenergie* besteht somit im *Schutz der Umgebung vor schädlicher, radioaktiver Strahlung* während des gesamten Brennstoffkreislaufes, d.h. während der Uranerzgewinnung, der Brennstoffherstellung, de Kraftwerkbetriebs, der Wiederaufbereitung sowie der Zwischen- und Endlagerung aktiver Produkte.

Die anschliessenden Ausführungen beschränken sich jedoch auf die Sicherheitsprobleme während des Betriebes eines Kernkraftwerkes.

Sicherheitsprobleme

Die Kernkraftwerke können wie alle konventionellen thermischen Kraftwerke in einen *primären Bereich der Dampferzeugung* und einen *sekundären Bereich der Stromerzeugung* unterteilt werden (Bild 7). Die Umwandlung der thermischen Energie aus der Form von gesättigtem oder überhitztem Wasserdampf in elektrische Energie durch Turbinen und Generatoren ist bei den konventionellen Kraftwerken und den Kernkraftwerken ähnlich. Die zusätzlichen und vielfach auch neuartigen Sicherheitsprobleme der Kernkraftwerke sind vorwiegend durch die Verwendung von Uran als *nuklearem, spaltbarem Brennstoff* begründet. Diese Sicherheitsprobleme sollen daher im folgenden bevorzugt behandelt werden.

Tabelle II. Maximale Jahresdosen in der Umgebung der Kernkraftwerke Beznau I und II zufolge gasförmiger und flüssiger Radioaktivitätsabgaben im Betriebsjahr 1976. Zum Vergleich sind die für Abgaben an die Umwelt maximal zulässigen Dosiswerte gemäss Schweizerischer Strahlenschutzverordnung (SSVO) sowie die natürliche Umweltstrahlenbelastung angegeben. Die von der Beörde festgelegten Abgabewerte führen zu bedeutend tieferen Jahresdosen als den Grenzwerten gemäss SSVO

	Maximale Jahresdosen in Millirem (Millirem: Einheit für die Schädlichkeit einer Strahlung auf den Menschen)	
	Gasförmige radioaktive Abgaben	*Flüssige radioaktive Abgaben* (Annahme: Ganzes Trinkwasser aus Vorfluter)
Kernkraftwerke Beznau I und II:		
Ganzkörperdosis	0,25	0,03
Schilddrüsendosis	1,4	
Schweizerische Strahlenschutzverordnung	50	50
Natürliche Strahlung	150 (80 bis 400)	

Beim Kernkraftwerk wird die thermische Energie durch die Spaltung von Uran im Kernreaktor erzeugt. Durch die von freien Neutronen hervorgerufene Kernspaltung fliegen die dabei entstehenden Spaltprodukte auseinander, bis sie auf andere Atome stossen, an die sie ihre kinetische Energie als Wärme abgeben. Die Kernspaltung von Uran erzeugt selbst wiederum Neutronen und unterhält damit die Kettenreaktion. Daneben entstehen radioaktive Spaltprodukte und Transurane, die nach dem Gesetz der Halbwertzeit selbständig weiter zerfallen. Die Kettenreaktion der Uranspaltung im Reaktorkern wird durch neutronenabsorbierende Steuerstäbe kontrolliert.

Das in Brennstoffelementen enthaltene Uran gibt die erzeugte Wärme über die Brennstoffhülle an das umgebende, gasförmige oder flüssige Kühlmittel ab. Bei den am stärksten verbreiteten Leichtwasserreaktoren ist das Kühlmittel gewöhnliches Wasser, das direkt im Reaktordruckgefäss verdampft wird (Siedewasserreaktor) oder seine Wärme in einem Wärmetauscher zur Dampferzeugung abgibt (Druckwasserreaktor). Der Wasserdampf dient zum Antrieb der Turbinen, wird anschliessend wieder zu Wasser kondensiert und im geschlossenen Kreislauf zurückgeführt.

Für die Kernkraftwerke ergeben sich folgende Sicherheitsprobleme:

- Verhinderung der Abgabe von grösseren als für die Umwelt zumutbaren Mengen von Radioaktivität aus kontrollierbaren Bereichen des Kernkraftwerkes während des Betriebes
- Hinreichende Einschränkung der Auswirkungen auf die Umwelt bei Störfällen. Das Auftreten solcher Ereignisse muss hinreichend unwahrscheinlich sein. Aus diesem Grund werden auch seltene interne und externe Einwirkungen bei der Projektierung berücksichtigt.

Die im Kernbrennstoff enthaltene Radioaktivität kann aus verschiedenen Gründen und auf unterschiedlichen Wegen in die Umgebung gelangen. Im Normalbetrieb diffundieren bei undichten Brennstoffhüllrohren gasförmige Spaltprodukte in das Kühlmittel. Bei dessen kontinuierlicher Reinigung und Entgasung fallen radioaktive Abwässer und Abgase an. Sie werden in Aufbereitungsanlagen so weit behandelt (dekontaminiert), dass sie mit kleineren als den behördlich festgelegten Grenzwerten an die Umgebung abgegeben werden können. Bei störungsfreiem Betrieb der Anlagen werden allerdings bedeutend tiefere als die *höchstzulässigen Abgabewerte* eingehalten (Tabelle II).

Die *Dichtheit der Brennstoffhüllrohre* unter allen Betriebsbedingungen ist für die Beschränkung der an die Umgebung abgegebenen Aktivität von fundamentaler Bedeutung. Werden mit der kontinuierlichen oder periodisch durchgeführten Überwachung zu hohe Aktivitätsabgaben festgestellt, so sind die defekten Brennelemente auszuwechseln.

Bei *Beeinträchtigung des Kühlkreislaufes* kann die geordnete Abfuhr der im Brennstoff erzeugten Wärme gestört werden. Bei schwerwiegenden Störungen überhitzt sich der Brennstoff, was zu einer Überbeanspruchung und Zerstörung der Brennstoffhüllen führen kann. Als Extremfall ist denkbar, dass sich das im Reaktorkern enthaltene Uran so stark erhitzt, dass es sämtliche umgebenden Hüllen durchschmilzt und die im Kern enthaltene Aktivität zu einem wesentlichen Teil in die Umgebung entweicht. Das technische Sicherheitsproblem besteht nun darin, die im Reaktorkern erzeugte thermische Energie unter allen Störfallbedingungen zuverlässig abzuführen. Dazu genügt es nicht, nur den Reaktor abzuschalten und damit die nukleare Kettenreaktion zu unterbinden, sondern es ist auch die nach dem Abschalten anfallende *Nach-*

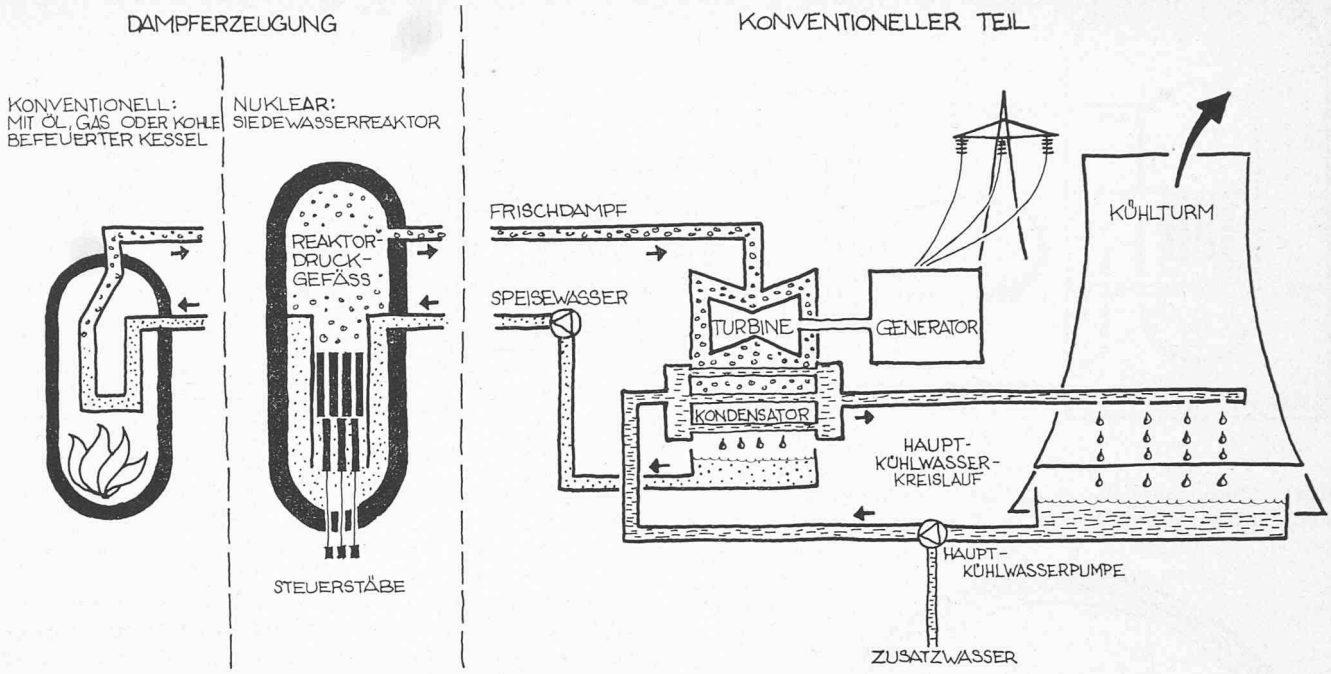


Bild 7. Prinzipdarstellung von thermischen Kraftwerken. Im fossilen Kraftwerk wird die thermische Energie durch Verbrennung von Öl, Kohle oder Gas erzeugt, im Kernkraftwerk durch Kernspaltung. Allen Typen gemeinsam ist die Gewinnung von elektrischem Strom mit Dampfturbinen und Generator

zerfallswärme abzuführen. Diese rührt aus dem weder physikalisch noch chemisch beeinflussbaren Zerfall der Spaltprodukte her und beträgt im ersten Augenblick rund sieben Prozent der vollen thermischen Leistung, nimmt aber im Laufe der Zeit stark ab. Die nukleare Sicherheit des Kraftwerkes ist somit von der *Wirksamkeit der Reaktorschnellabschaltung* und der *Wärmeabfuhrsysteme* auch unter ungünstigen Bedingungen abhängig.

Selbst bei dem äusserst unwahrscheinlichen Ausfall aller Sicherheitssysteme, wenn also der Kern nicht mehr gekühlt würde, kann das im Reaktorkern enthaltene Uran nicht wie eine Atombombe explodieren. Dazu ist die Anreicherung an spaltbarem Uran 235 viel zu gering. Zudem sind die physikalischen Bedingungen für eine Zündung nicht vorhanden.

Auslösung von Störfällen

Systeme für die Wärmeabfuhr

Die im Kernreaktor anfallende Wärme ist durch verschiedene Kühlsysteme zuverlässig an die Umgebung abzuführen. Jedes Kühlsystem, sowohl das normale Betriebssystem (Bild 8) wie auch die Notkühlsysteme (Bild 9) bestehen aus hintereinandergeschalteten, in der Regel geschlossenen Kühlkreisen und endet in einer «letzten Wärmesenke». Üblicherweise werden die Atmosphäre oder Gewässer (Flüsse, Seen und das Grundwasser) als Wärmesenke benutzt.

Die Wärmeabfuhrsysteme bestehen aus verschiedenen mechanischen Komponenten, vor allem aus Rohrleitungen, Pumpen, Wärmetauschern und Ventilen sowie den zugehöri-

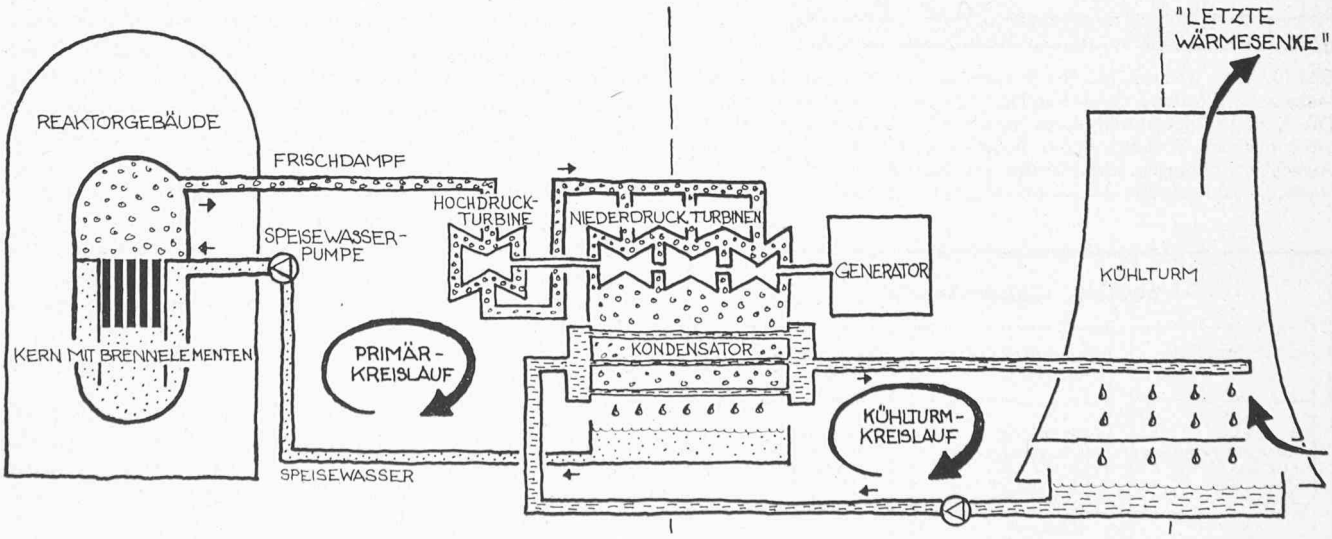


Bild 8. Kühlkreisläufe während des Leistungsbetriebes eines Kernkraftwerkes. Der Wasserdampf des Primärkreislaufes wird in der Turbine entspannt und nach der Kondensierung wieder in den Reaktor zurückgeführt. Die Wärme aus dem Hauptkondensator wird dem Kühlturmkeislauf übergeben. Der Kühlturm ist das Bindeglied zwischen den Wasserkreisläufen und der Atmosphäre als «letzte Wärmesenke»

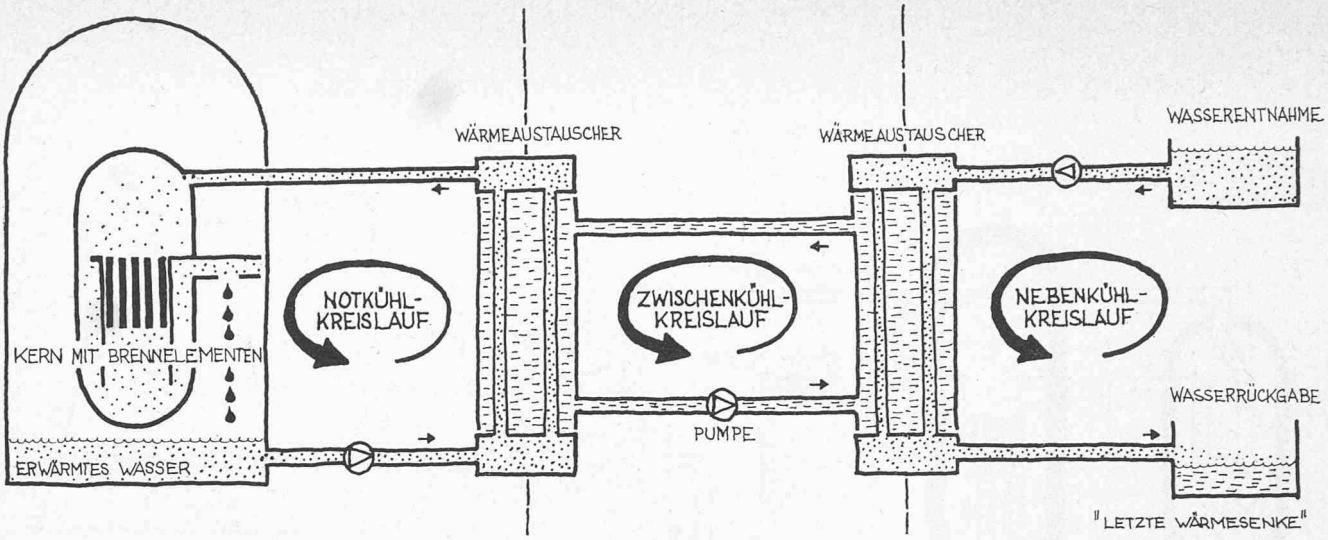


Bild 9. Kühlkreisläufe für die Nachwärmeabfuhr. Durch die mehrfache Trennung der Wasserkreisläufe wird die Gefahr der Verbreitung von Radioaktivität aus dem Kernreaktor stark verringert

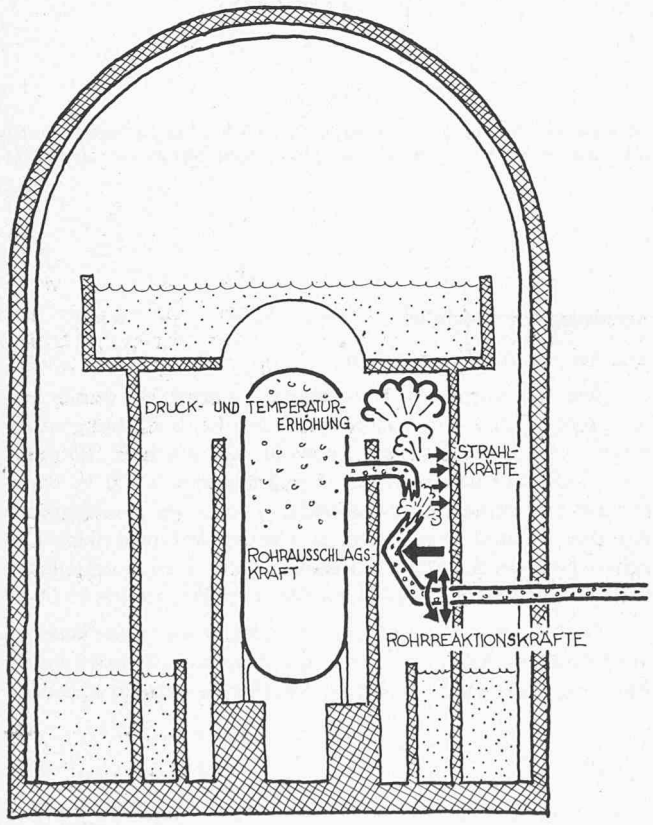
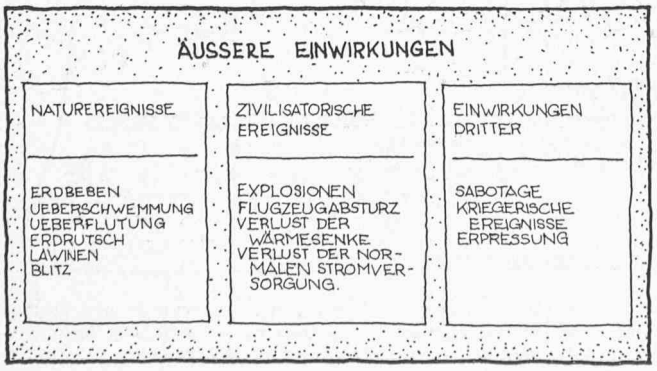


Bild 10. Die Anlagen des Reaktorgebäudes werden auf die Auswirkungen des grössten anzunehmenden Unfalles ausgelegt. Dazu gehören Druck- und Temperaturerhöhung innerhalb der Sicherheitshülle infolge ausströmenden Wasserdampfes, Reaktionskräfte an Fixpunkten und Ausschlagsicherungen, Strahlkräfte auf Bauteile und Komponenten sowie Ausschlagskräfte des herumschlagenden Rohres



gen Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen. Die Notsysteme umfassen zusätzlich separate Stromversorgungsgruppen. Als *Wärmeübertragungsmittel* wird in den meisten Fällen *Wasser* verwendet. Die Funktionsfähigkeit der zumeist sehr komplexen Wärmeabfuhrsysteme kann durch verschiedene Störfälle gefährdet sein, die ihren Ursprung in inneren oder äusseren Ereignissen haben.

Innere Ereignisse

Als innere Ereignisse werden alle Ursachen betrachtet, die im Kraftwerk selbst ihren Ursprung haben und zu Störfällen insbesondere in den Wärmeabfuhrsystemen führen können. Sie umfassen unter anderen:

- mechanische Fehler oder Schäden an *Komponenten* infolge Überbeanspruchung, Konstruktions- und Herstellungsfehlern, unsachgemässer Wartung, mangelhafter Kontrollen oder Alterung
- Störungen in der elektrischen *Stromversorgung*
- Störungen der *Steuerung, Regelung* und *Überwachung* des Reaktors und der Wärmeabfuhrsysteme.

Im weiteren sind auch anlageninterne Brände, Kurzschlüsse, Explosionen sowie Bedienungsfehler (menschliches Versagen) als mögliche Störfallursachen zu berücksichtigen.

Die Auslegung der sicherheitstechnisch bedeutenden Anlageteile auf diese inneren Ereignisse erfolgt in der Regel auf Grund einer *deterministischen Betrachtungsweise,* indem verschiedene Störfallhypothesen (Auslegungsunfälle) festgelegt werden. Sie müssen unter Berücksichtigung spezieller Sicherheitskriterien, beispielsweise unvorhergesehene Nichtverfügbarkeit von einzelnen Systemen, in aller Konsequenz beherrschbar sein (Bild 10). Bei der Annahme der *Auslegungsunfälle* werden nicht vornehmlich die Ursachen dieser Störfälle betrachtet, sondern die denkbar ungünstigsten Unfallbedingungen angenommen, die dann ein ganzes Spektrum möglicher Ursachen abdecken. Als einer der wichtigsten Auslegungsunfälle wird ein *vollständiger Rohrleitungsbruch im Primärsystem* mit nachfolgendem Kühlmittelverlust postuliert.

Äussere Einwirkungen

Unter äussere Einwirkungen fallen alle Ereignisse, die ihre Ursache nicht im Kraftwerkbetrieb selber haben. Sie umfassen Naturereignisse, zivilisatorische Ereignisse sowie die Einwirkungen von Drittpersonen (Bild 11, 12).

Bild 11 (links). Die auf ein Kernkraftwerk wirkenden äusseren Einwirkungen werden als Ursache von möglichen Störfällen berücksichtigt

Die sicherheitstechnisch relevanten Anlageteile eines Kernkraftwerkes sind grundsätzlich gegen alle äusseren Einwirkungen zu schützen, die allein oder in Kombination mit anderen das Gesamtrisiko über ein bestimmtes Mass erhöhen können. Für jede der zahlreichen Einwirkungen werden die an einem Kraftwerkstandort vorhandenen Gefährdungen ermittelt. Vielfach ist für die Auslegung des Kernkraftwerkes das grösstmögliche Ereignis, beispielsweise die maximale Überflutungskote, bei Talsperrenbruch, zugrundezulegen. Bei Gefährdungen, für die eine statistisch genügende und zuverlässige Datenbasis vorhanden ist, z.B. für Erdbeben und Flugzeugabsturz, werden dagegen die massgebenden Auslegungsgrössen *probabilistisch* ermittelt, wobei die Ereignisstärke in Abhängigkeit der mittleren Wiederkehrperiode als Grundlage für die Festlegung der *Auslegungsbelastung* bestimmt wird.

Schutzmassnahmen

Verteilung der Radioaktivität im Kernkraftwerk

Der *weitaus grösste Teil* der in einem Kernkraftwerk enthaltenen *Aktivität* ist im *verbrauchten nuklearen Brennstoff* enthalten. Ein bedeutender Teil davon befindet sich in den Brennelementen im Reaktorkern (rund 10^{10} Curie), ein geringerer Teil in den abgebrannten Brennelementen (rund 10^{9} Curie), die im Brennelementlagerbecken unter Wasser gelagert und gekühlt werden (Bild 13). Von den weiteren Strahlungsquellen im Kernkraftwerk weisen die Filterbehälter der Reinigungsanlagen demgegenüber bedeutend geringere Radioaktivitäten auf (total ungefähr 10^{4} Curie). Allerdings sind diese Strahlungsquellen nicht an den eingeschlossenen Brennstoff gebunden, sondern sie werden in den Filterharzen der Reinigungsanlagen angeschwemmt und müssen daher konditioniert und als mittelaktive Rückstände gelagert werden. Schliesslich können auch Schutzkleidungen und Werkzeuge in geringfügigem Masse radioaktiv verunreinigt werden. Diese werden mit den schwachaktiven Abfällen im Rückstandlager aufbewahrt.

Schutzmassnahmen gegen den Austritt von Radioaktivität

Die stärkste Gefährdung geht von der im Reaktorkern an den Brennstoff gebundenen Aktivität aus. Das sichere Abschalten des Reaktors und die zuverlässige Nachwärmeabfuhr sind die Hauptaufgabe von mehreren Sicherheitssystemen (siehe dazu auch [1]).

Unter Normalbedingungen ist der stark strahlende, gebrauchte Brennstoff an das feste Brennstoffgefüge gebunden und in den Hüllrohren aus Zirkaloy eingeschweisst. Im Kernkraftwerk wird der Brennstoff nie aus seiner Hülle entfernt, sondern nach genügender Abkühlung einer Wiederaufbereitungsanlage zugeführt (Bild 14).

Die nicht an den Brennstoff gebundene Aktivität ist in fester Form vor allem an die Filterharze in der Reinigungsanlage, in flüssiger Form vornehmlich an das Primärkühlmittel gebunden. Infolge der Entgasung des Kühlmittels und Aktivierung der Luft fallen auch radioaktive Gase und Edelgase an. Der Schutz gegen Austritt von festen und flüssigen Aktivitätsträgern wird prinzipiell durch mehrere Massnahmen realisiert. Vorerst sind alle aktiven Stoffe in den *Behältern oder Rohrleitungen* der verschiedenen Betriebs- und Notsysteme eingeschlossen. Als weiterer Schutz ist das *Gebäude mit seinem Entwässerungssystem* anzusehen. Dies ist einerseits der Primärkreis, der wesentliche Mengen von Radioaktivität enthalten kann und daher durch eine Sicherheitshülle umgeben ist, anderseits schützt in Gebäuden mit weniger Radioaktivität eine dichte Schutzschicht an Boden und Wänden vor der Weiterverbreitung von Leckagen. Als letzte, unabhängige

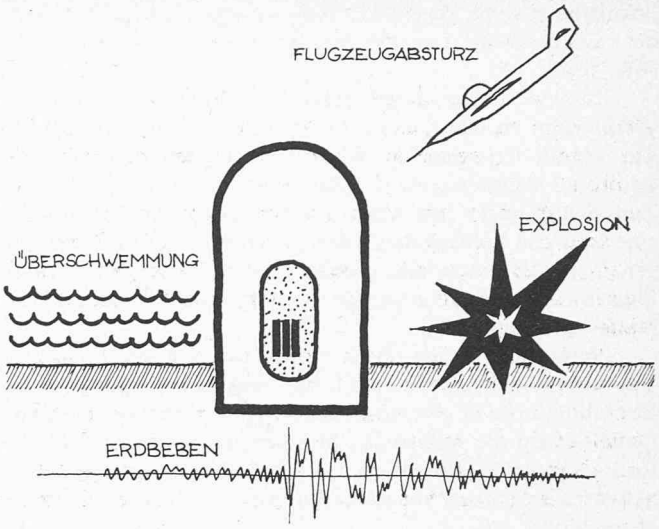


Bild 12. Die Bauwerke und Ausrüstungen einer Kernanlage werden auf sehr selten auftretende, extreme Ereignisse bemessen

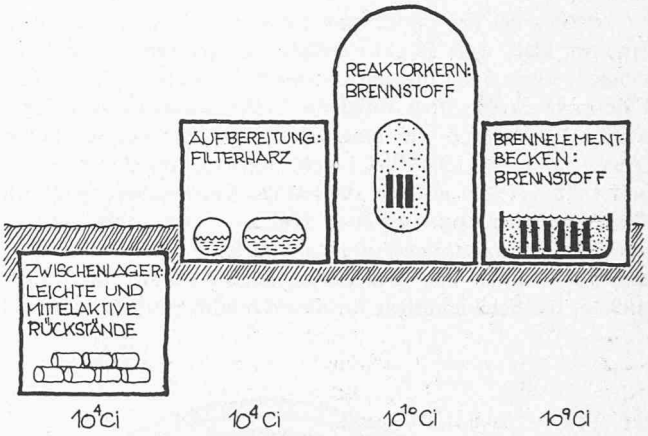


Bild 13. Die Radioaktivität gemessen in Curie (Ci) ist im Kernkraftwerk vornehmlich an den Brennstoff im Reaktorkern und im Brennelementlager gebunden. Geringere Mengen fallen in den Reinigungsanlagen an

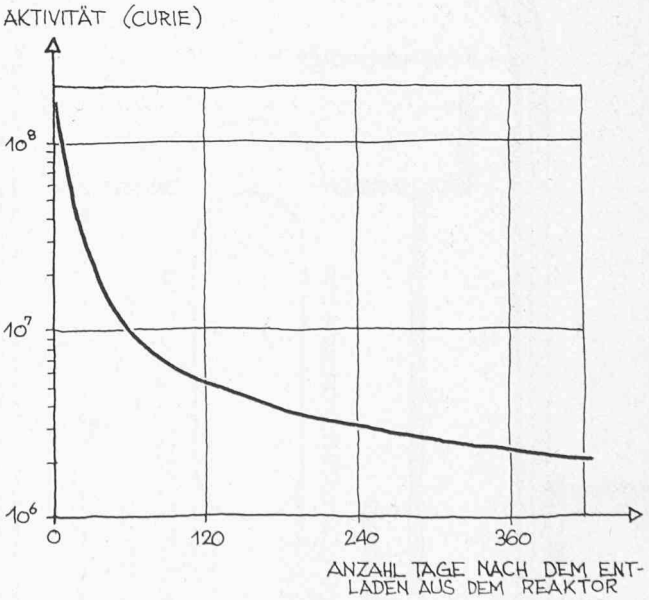


Bild 14. Abnahme der Radioaktivität beim verbrauchten Brennstoff. Jedes Jahr wird im Kernreaktor ungefähr ein Drittel des nuklearen Brennstoffes ersetzt. Bei dessen Lagerung sinkt die Strahlungsintensität innerhalb des ersten Jahres auf rund ein Prozent des Anfangswertes

Schutzmassnahme gegen den Austritt von Radioaktivität ist die *geschlossene Grundwasserschutzwanne* zu betrachten (Bild 15).

Zumindest *eine* dieser Schutzvorkehrungen ist *dauernd überprüfbar*. In den meisten Fällen sind dies die Rohrleitungen und die freistehenden Behälter, bei einbetonierten Behältern wird dagegen eine der Bauwerksbarrieren kontrolliert. Zum Schutz gegen den Austritt von radioaktiven Gasen wird eine mögliche Leckage durch das umgebende Gebäude zurückgehalten und durch das gegenüber der Aussenwelt geringfügigen Unterdruck erzeugende Ventilationssystem der Abluftreinigung zugeführt.

Nebst Gefährdung durch radioaktive Spaltprodukte und Transurane sind Personal und Umgebung auch vor der direkten Bestrahlung durch eine genügende *Abschirmung* zu schützen. Dazu werden die wichtigsten Strahlenquellen wie das Reaktordruckgefäss, das Brennelementlagerbecken sowie das radioaktive Zwischenlager vor allem durch Beton- und Stahlwände abgeschirmt.

Rasmussen-Studie

Vorgeschichte

Bereits bei der Einführung der kommerziellen Kerntechnik war klar, dass Reaktorunfälle mit grossen Schadenwirkungen, wenn auch unwahrscheinlich, so doch denkbar sind. Eine erste Studie über mögliche Unfallfolgen (WASH 740) wurde 1957 durch die amerikanische Atomenergiebehörde (AEC) für einen 150-MW_e-Leichtwasserreaktor durchgeführt und später (1965) auf die 1000-MW_e-Klasse übertragen [2]. Diese Studien gingen von einer *fünfzigprozentigen Freisetzung des gesamten Spaltproduktinventars* im Falle eines Schmelzens des Reaktorkerns aus (grösster denkbarer Unfall) und untersuchten die Schadenfolgen für diese Unfallhypothese. Obwohl die ermittelten Schäden beträchtlich waren, erwies sich der Einfluss dieser Untersuchungen auf die öffentliche Meinung über das Unfallrisiko von Kernkraftwerken als recht bescheiden.

Mit der Intensivierung der Diskussionen um die Sicherheit von Kernkraftwerken wurde klar, dass das *Fehlen von begründeten Versagenswahrscheinlichkeiten im Bericht WASH 740* seine Aussagekraft wesentlich einschränkte. Deshalb wurde Anfang der 70er Jahre von der Atomenergiebehörde (AEC) eine neue Reaktorsicherheitsstudie mit dem Ziel in Auftrag gegeben, die durch den Betrieb von Kernkraftwerken verbundenen Risiken (als Funktion der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Schadenfolgen) systematisch zu untersuchen. Diese Studie wurde von einem Team unter der Leitung von *Norman C. Rasmussen* vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) durchgeführt und 1974 als WASH 1400 [3] im Entwurf sowie im Herbst 1975 in der endgültigen Fassung durch die Atomenergiebehörde veröffentlicht.

Eine analoge Studie ist im Frühjahr 1976 in *Deutschland* durch den Bundesminister für Forschung und Technologie in Auftrag gegeben worden *(Deutsche Reaktorsicherheitsstudie)*, da sich die deutschen Kernanlagen gegenüber den amerikanischen Referenzanlagen in einigen wesentlichen Punkten (vor allem in den Sicherheitssystemen) unterscheiden. Die Untersuchungen bedienen sich der von Rasmussen verwendeten Methodik und sollen Ende 1978 ihren Abschluss finden.

Methodik und Schwerpunkte der Ermittlung des Unfallrisikos

Um das Unfallrisiko zu ermitteln, sind wie erwähnt Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen möglicher Störfälle zu untersuchen. Da sich zudem in den über 100 der heute betriebenen Kernanlagen keine Störfälle mit unzulässiger Freisetzung von Radioaktivität an die Umgebung ereigneten, müssen diese Unfallrisiken theoretisch erfasst werden. Die dabei verwendete Methodik basierte auf Verfahren, wie sie im letzten

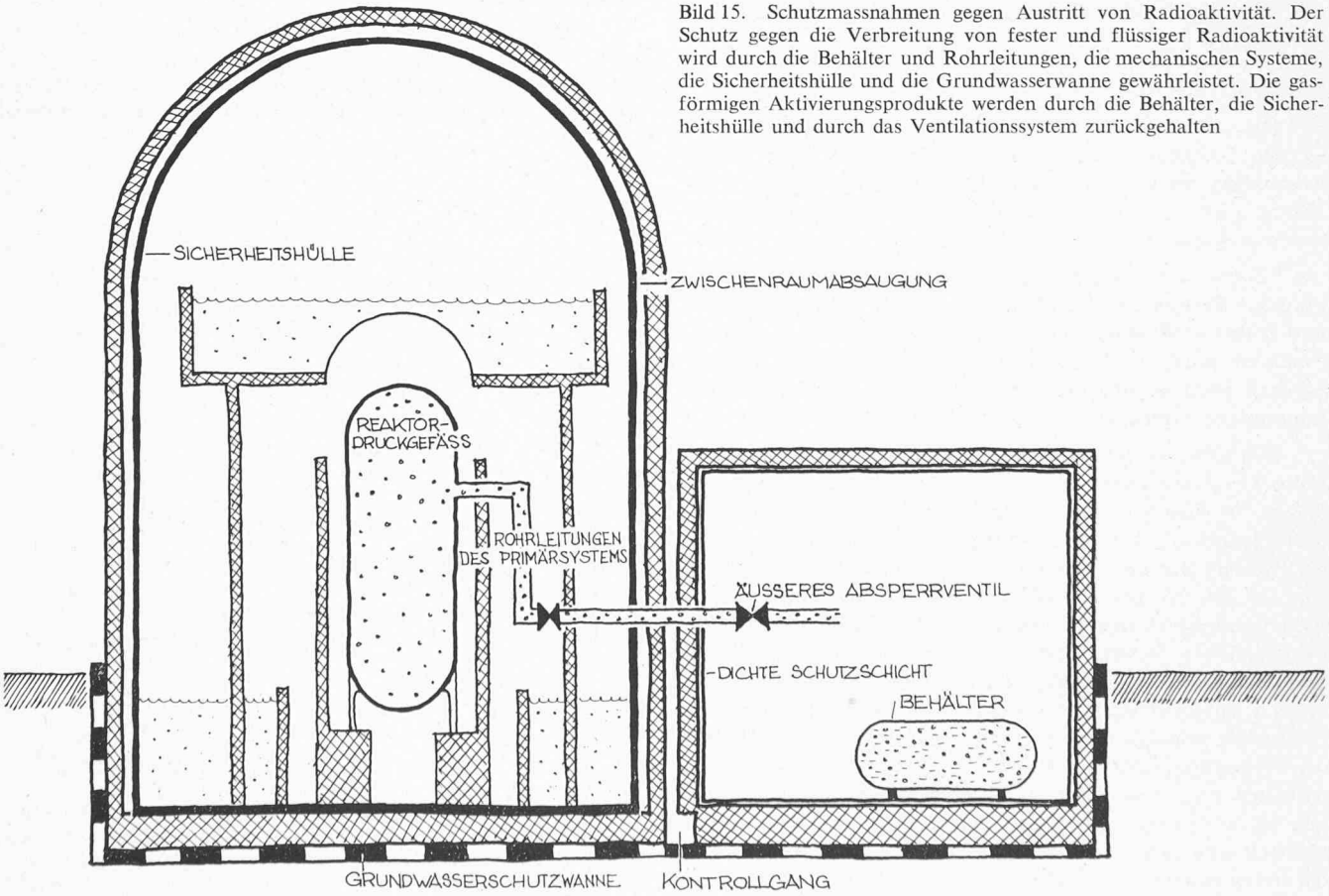


Bild 15. Schutzmassnahmen gegen Austritt von Radioaktivität. Der Schutz gegen die Verbreitung von fester und flüssiger Radioaktivität wird durch die Behälter und Rohrleitungen, die mechanischen Systeme, die Sicherheitshülle und die Grundwasserwanne gewährleistet. Die gasförmigen Aktivierungsprodukte werden durch die Behälter, die Sicherheitshülle und durch das Ventilationssystem zurückgehalten

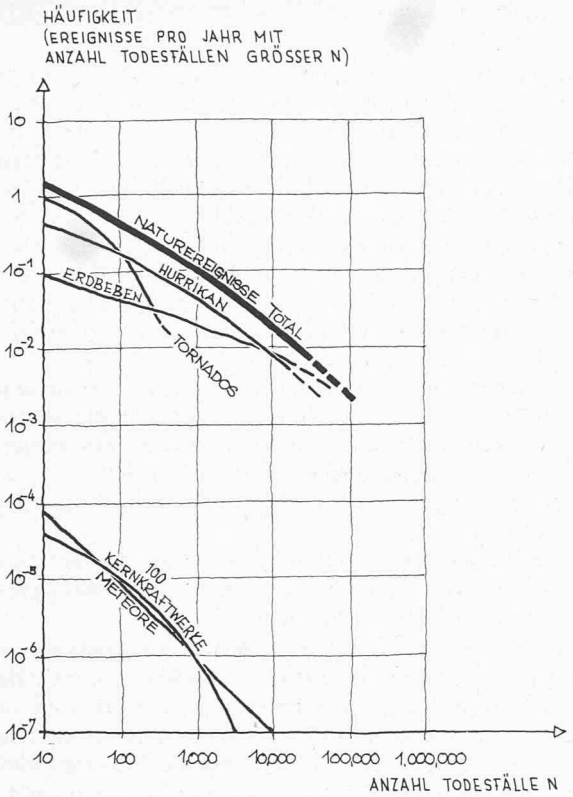


Bild 17. Beziehung zwischen Häufigkeit und Folgen von Naturkatastrophen im Vergleich zu nuklearen Unfällen (USA). Bei einem Bestand von 100 Kernkraftwerken ist im Mittel höchstens alle 100 000 Jahre mit einem Unfall mit 100 oder mehr Todesopfern zu rechnen. Gleich schwere Vorfälle infolge Erdbeben sind rund 5000mal wahrscheinlicher, infolge irgendeiner Naturkatastrophe rund 50 000mal wahrscheinlicher

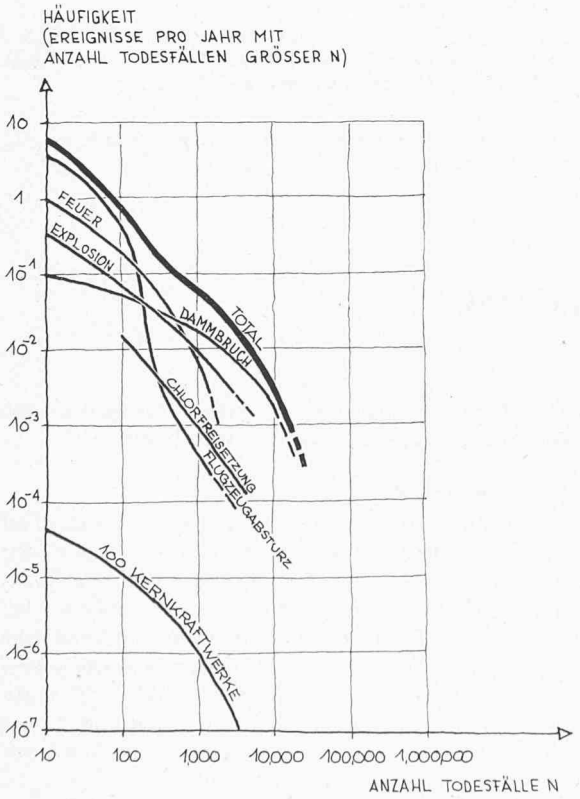


Bild 18. Beziehung zwischen Häufigkeit und Folgen von durch Menschen bewirkten grossen Unfällen im Vergleich zu nuklearen Unfällen (USA)

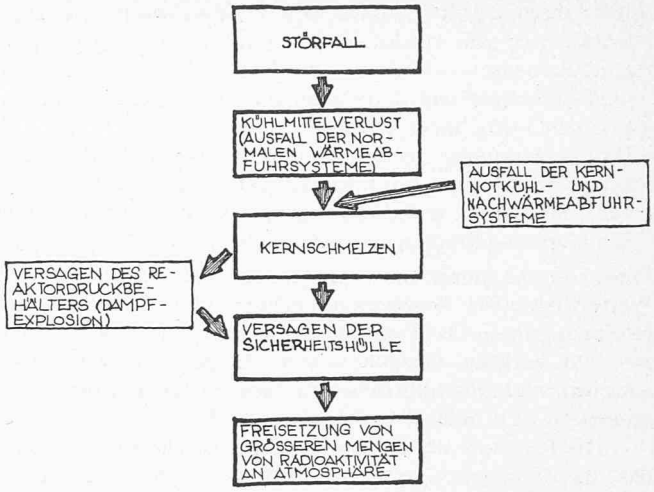


Bild 16. Typische Ereignisketten mit grossem Beitrag zum Unfallrisiko. Ein Ausfall sämtlicher Wärmeabfuhrsysteme kann zu einem Schmelzen des Reaktorkerns führen. Für die Freisetzung grösserer Mengen von Radioaktivität an die Atmosphäre ist zudem ein Versagen der Sicherheitshülle erforderlich

Jahrzehnt in den *USA* für die *Raumfahrt* und die *Landesverteidigung* entwickelt wurden. Die Verfahren arbeiten mit *Ereignisbäumen* und *Fehlerbäumen* und eignen sich besonders für Störfallanalysen komplexer Systeme. Die Bestimmung möglicher Ereignissequenzen eines postulierten Störfalles in den betrachteten Referenzanlagen erfolgte dabei durch Ereignisbaum-Analysen, die Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum durch Fehlerbaum-Analysen (siehe dazu auch [1]). Die so bestimmte Radioaktivitätsfreisetzung und die Wahrscheinlichkeit der dieser Freisetzung zugrunde liegenden Unfallabläufe bildete die Basis für die Ermittlung des Unfallrisikos für die Bevölkerung unter Berücksichtigung möglicher Wetterverhältnisse, Bevölkerungsverteilungen und Vorwarnzeiten für Evakuierungsmassnahmen.

Die *Reaktorsicherheitsstudie* zeigte, dass zur Freisetzung eines grösseren Betrages von Spaltprodukten ein *Schmelzen des Reaktorkerns* eintreten muss. Zur Verhütung eines solchen Unfalles ist der Reaktor wie erwähnt mit einer Reihe von Sicherheitssystemen ausgestattet, welche die Überhitzung des Kernbrennstoffes vermeiden und die Freisetzung von Radioaktivität aus dem Brennstoff unter Kontrolle halten sollen. Nur das Versagen mehrerer dieser Systeme kann zu einem Kernschmelzen führen, wobei die Ereignisketten mit dem grössten Beitrag an das Unfallrisiko vereinfacht wie in Bild 16 gezeigt dargestellt werden können.

Resultate der Studie

Die wichtigsten Resultate der Reaktorsicherheitsstudien können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der *schwerste Reaktorunfall* wird durch einen Bruch des Reaktorkühlsystems ausgelöst, dem ein Schmelzen des Reaktorkerns und ein Versagen des Sicherheitsbehälters folgt. Damit dieser Ablauf überhaupt möglich wird, müssen alle Notkühlsysteme ausfallen
- Es ist im Mittel mit einem *Kernschmelzunfall in 20000 Betriebsjahren* zu rechnen. Allerdings sind nur bei einem von zehn solchen Unfällen erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit für ein Schmelzen des Reaktorkerns mit katastrophalen Auswirkungen auf die Umgebung ist nochmals um mehrere Grössenordnungen niedriger
- Für den Unfall mit den grössten Auswirkungen und einer errechneten mittleren Wiederkehrperiode von mehr als

10^9 Jahren wurden – unter der Voraussetzung von einer Vorwarnzeit von mindestens 1,5 Stunden und erfolgreichen Evakuierungsmassnahmen – die Folgen auf mehrere Tausend Soforttote und Sofortkranke und mehrere Milliarden Franken Sachschaden errechnet
- Die Auswirkungen der Spaltproduktfreisetzung für kritische Ereignisketten sind für folgende Kategorien ermittelt worden: Soforttote und -kranke, Spätschäden (Krebs- und Schilddrüsenerkrankungen), genetische Folgen, Sachschäden.

Diesen Berechnungen liegen Annahmen über wahrscheinliche Wettverhältnisse, Bevölkerungsdichten und Evakuierungserfolge zugrunde. Der *Vergleich der Erwartungswerte für Soforttote* mit anderen Gruppenrisiken infolge von Naturkatastrophen oder zivilisatorischen Ereignissen mit grossen Konsequenzen ist in Bild 17 und 18 dargestellt.

Die Resultate der Reaktorsicherheitsstudie zeigen somit, dass das Gruppenrisiko (für Soforttod) aus dem Kernkraftwerkbetrieb um Grössenordnungen kleiner ist gegenüber anderen Risiken mit grossen potentiellen Auswirkungen, denen der Mensch normalerweise ausgesetzt ist. Diese Aussage würde somit auch bei relativ grossen Streuungen der Resultate erhalten bleiben (Rasmussen gibt Fehler an, die höchstens eine Grössenordnung erreichen). Ob das nukleare Risiko jedoch akzeptiet werden kann, lässt die Studie offen, da diese Antwort von einer breiteren Gesellschaftsschicht gegeben werden muss und dabei nicht allein auf Risikovergleichen basieren wird.

Einige abschliessende Bemerkungen

Es ist unbestritten, dass mit der Rasmussen-Studie die Analyse der Sicherheit der Kernkraftwerke wesentlich gefördert wurde. Erstmals liegen systematisch ermittelte, quantitative Angaben über das Unfallrisiko bei Kernkraftwerken vor. Zweifellos entspricht die Studie zudem dem heutigen Stand der Wissenschaft und ist mit Bezug auf Methodik und Detail der Bearbeitung sicher das Optimum, was man zur Bestimmung des nuklearen Unfallrisikos beitragen kann. Wie wirklichkeitsnah jedoch die ermittelten Resultate sind, bleibt vermutlich für längere Zeit ungewiss, ist doch dabei einerseits das Fehlen genügend grosser Zeitspannen als Basis der Studie, anderseits die grosse technologische Komplexität von Kernanlagen in Betracht zu ziehen.

Bei der Wertung der ermittelten Resultate sind einige der grundlegenden Annahmen und Einschränkungen der Studie besonders zu beachten:

- Sabotage als Initialereignis möglicher Störfälle wurde nicht berücksichtigt. Dies einerseits, weil die erwarteten Auswirkungen einer erfolgreichen Sabotage bedeutend kleiner sind als die als Folge anderer Störfälle maximal ermittelten Schäden und anderseits, weil keine Methode für das Erfassen von Wahrscheinlichkeiten für willkürliche Akte vorliegt.
- Die Studie geht von erfolgreichen Evakuierungsmassnahmen und den zur Verfügung stehenden Vorwarnzeiten aus. Sie stützt sich auf amerikanische Erfahrungswerte, was vor allem bei der Übertragung der ermittelten Unfallrisiken auf andere Länder berücksichtigt werden muss.
  Es muss jedoch hinzugefügt werden, dass eine Evakuierung der Bevölkerung keineswegs das einzige Schutzmittel ist, das gegen die allenfalls rasch wirksam werdenden Srtahlengefahren eingesetzt werden kann; bereits normal gebaute Häuser und besonders Keller bieten einen sehr wirksamen Strahlenschutz.
- Der Risikovergleich geht von Soforttoten und Sachschäden aus. Nicht in den Vergleich miteinbezogen wurden Spätschäden durch radioaktive Strahlung.

Trotz diesen Einschränkungen bleiben die wesentlichen Aussagen der Reaktorsicherheitsstudie bestehen, wobei die verschiedenen getroffenen Annahmen sich hauptsächlich in einem grösseren Streubereich der Resultate auswirken. Die Interpretation dieser Studie und letztlich die Haltung jedes einzelnen zum nuklearen Risiko wird somit nicht unwesentlich davon abhängen, ob es sich beim Betrachter um einen technologischen Optimisten oder eher einen Pessimisten handelt.

Literaturverzeichnis

[1] *Wenger H.:* «Sicherheitskonzepte und Sicherheitsmassnahmen bei Kernkraftwerken», Schweizerische Bauzeitung, Heft 44, 1977.

[2] *WASH 740:* «Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants». United States Atomic Energy Commission, 1957.

[3] *WASH 1400:* «Reactor Safety Studies – An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants». United States Nuclear Regulatory Commission, October 1975.

Adresse der Verfasser: *Basler & Hofmann*, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich.

Sicherheitskonzepte und Sicherheitsmassnahmen

Von **Hans Wenger**, KKW Beznau

Die Sicherheit eines Kernkraftwerkes umfasst ein *sehr weites Spektrum der gesamten heutigen Technik*. Es gelangen dabei Konzepte und Lösungen zur Ausführung, die in den verschiedenen Sparten der Technik sehr wohl bekannt sind, die aber nun im Gesamtrahmen eines Kernkraftwerkprojektes häufig in einer Art und Weise integriert werden, wie sie sonst in der übrigen Anwendung der Technik nicht üblich sind. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass ein Verständnis des komplexen Gebietes der Sicherheit eines Kernkraftwerkes selbst schon für einen Fachmann einer bestimmten Sparte der Technik schwierig ist und um so mehr für einen Laien oft nicht mehr erfassbar ist. Dies dürfte ein wesentlicher Grund sein, dass bei Diskussionen über die Sicherheit von Kernkraftwerken sehr grosse Meinungsverschiedenheiten anzutreffen sind.

Die im folgenden Artikel dargestellten Überlegungen und Begründungen versuchen, die grundlegenden Gedanken, die hinter dem Sicherheitsdenken bei Projektierung, Bau und Betrieb eines Kernkraftwerkes stehen, zu erläutern.

Leichtwasserreaktor-Typen

Entsprechend dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik und der zur Verfügung stehenden Form von Kernbrennstoffen wurden eine Vielzahl von möglichen Reaktortypen untersucht und zum Teil auch verwirklicht. Bei dieser Entwicklung haben vor allem folgende Faktoren eine ausschlaggebende Rolle gespielt: *Nationale Forschungsprogramme und Anwendungsgebiete, Verfügbarkeit von angereichertem Uran* und *verfügbare nationale Finanzmittel*. Aus der Vielzahl möglicher Reaktortypen werden heute nur noch *drei Grundtypen* weltweit kommerziell verwendet:

- Leichtwasser-Reaktoren,
- Schwerwasser(moderierte) Reaktoren,
- Gasgekühlte Reaktoren.