Sicherheit von Kernreaktoren zur Energieerzeugung - Rückblick und Ausblick

Autor(en): **Fuchs, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 23

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77117

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

Literatur

[1] *Franck, E.:* Risikoanalysen von der Planung bis zum Betrieb. «Maschinenschaden», Heft 3/1988, S. 97–105

[2] *Häusermann, R.:* Störung, Unfall, Katastrophen. «OUTPUT», Heft Nr. 11/1987, S. 5–6

[3] *De Senarclens, M.:* Sicherheit im Kernkraftwerk. «Schweizerische Arbeitgeber-Zeitung» 14, 3. April 1986, S. 240–241

[4] *Kececioglu, D.:* Maintainability Engineering. The George Washington University, Tucson, Arizona 1979

beit mit gegenseitiger Überwachung. Erst dadurch ist die Anlagensicherheit gewährleistet. Im Sinn des «Human Engineering» ist berücksichtigt, dass die Sicherheitsstandards so angesetzt sind, dass eine Fehlhandlung oder Sabotage von einzelnen die übergeordneten Schutzziele nicht in Frage stellen.

Die Lehre aus Three Mile Island für Betreiber: Heute steht fest, dass die mangelnde Vertrautheit (Ausbildung) der Mannschaft und des Managements mit dem Anlageverhalten die Grundursache für das Kernschmelzen war. Die passiven Schutzmassnahmen und die Umhüllung des Reaktorgefässes nach damaligem Sicherheitsstandard genügten dagegen. Die Anlage musste «abgeschrieben» werden. Die Erfahrung, die aus diesem ungewollten «Experiment» gewonnen wurde, hat die nachfolgenden Sicherheitsstandards im «Führen» von Kernkraftwerken beeinflusst.

Ausblick

Die Grundausrüstung eines Kernkraftwerks mit Leichtwasserreaktor ist heute ausgereift. Sie stellt den Stand höherer Ingenieurkunst dar. Wir sprechen nicht gerne von «High-Tech» in den Kernkraftwerken, wir haben sie schon [2, 3]. Punktuelle technische Verbesserungen sind wohl denkbar, aber nur nach reiflicher Überlegung und Abwägung auf die Auswirkung der gesamten Sicherheit; denn nicht alles, was vordergründig (spontan) als Verbesserung erscheint, ist tatsächlich eine. Zur Erreichung der gewünschten Sicherheit ist der Einzel-Mensch wohl das schwächste Glied. Das Team aber ist stark genug, um die heutigen LWR sicher zu meistern und beides zu ereichen: Sicherheit und Energieproduktion. Persönlich wünsche ich mir für die Schweiz, dass die «Konsumenten» von Sicherheit, Vergnügen, Nahrung, Freiheit usw. auch an den aufopfernden Einsatz der Ingenieure denken, wenn sie einerseits die technischen Einrichtungen kritisieren und anderseits davon profitieren.

Als Ingenieure und Fachleute müssen wir uns täglich den Gesetzmässigkeiten der Natur unterwerfen. Die heutigen Sicherheitsstandards berücksichtigen diese Gesetzmässigkeiten, soweit sie heute erfasst und erforscht sind. Die Sicherheitsstandards und die Kernkraftwerke sind evolutionäre «Schöpfungen», um die Kernspaltung für friedliche Zwecke zu nutzen. Als Mensch und auch als Ingenieure bleibt es unsere Verantwortung, den Missbrauch zu verhindern und die Bevölkerung darüber aufzuklären. Vergessen wir dabei aber nicht: Die Technik hat die Tücke, dass der Glaube allein nicht genügt, sondern das Können, mit ihr umzugehen, im Glauben an die Schöpfung.

Als Ingenieur möchte ich abschliessend dazu aufrufen, dass andere Industrien ihre Sicherheitsstandards unter Einbezug der Schadstoffe und Risiken überprüfen und wo nötig anpassen. In einigen Gebieten gäbe es mit wenig Kostenaufwand eine qualitative Verbesserung, vorausgesetzt die Investitionen werden wirklich getätigt, statt in Form von hohen Versicherungsprämien das Gefühl der Unsicherheit zu befriedigen. Es ist ja ein durchwegs gangbarer Weg, beides mit Vernunft zu tun [1].

Adresse des Verfassers: *Rudolf Häusermann,* dipl. Ing. ETH, Kernkraftwerk Leibstadt AG, 4353 Leibstadt.

Fortschrittliche Kernreaktoren

Sicherheit von Kernreaktoren zur Energieerzeugung – Rückblick und Ausblick

Die grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke ergeben sich einerseits aus der grossen Energiemenge, die bei der Kernspaltung frei wird, und anderseits aus der Radioaktivität der Spaltprodukte. Vorausschauende Sicherheitsmassnahmen haben trotz anfänglicher Reaktortypenvielfalt und Lerneffekten zu einer – trotz Tschernobyl – sehr guten Sicherheitsbilanz geführt. Darauf beruhend laufen Entwicklungen, die der aus Gründen der Umwelt- und Ressourcenschonung erwünschten stärkeren Rolle der Kernenergie entgegenkommen.

VON HANS FUCHS, BADEN

Kernreaktoren: grundlegende Vorgänge und Sicherheitsanforderungen [1–3]

Kernspaltung

In einem Kernreaktor wird Energie hauptsächlich aus der Spaltung des Uran-Isotops 235 gewonnen. Aus dem Uran entstehen Bruchstückpaare wie z.B. ein Krypton- und ein Barium-Isotop oder ein Brom- und ein Lanthan-Isotop. Die Bruchstücke (Spaltprodukte) enthalten den überwiegenden Teil der freiwerdenden Energie; sie werden auf kürzester Entfernung abgebremst und erwärmen das umgebende Uran (den «Brennstoff»). Die Wärme wird vom Kühlmittel abgeführt und in einer Dampfturbine in mechanische Energie und dann Elektrizität umgewandelt.

Kettenreaktion

Neben den Spaltprodukten entstehen bei jeder Spaltung zwei bis drei Neutronen, die eine hohe Geschwindigkeit aufweisen und deshalb nur selten weitere Spaltungen verursachen. Werden diese schnellen Neutronen in einem Moderator abgebremst, so können sie – als nunmehr «thermische» Neutronen – mit grösserer Wahrscheinlichkeit weitere Spaltungen von Uran 235 auslösen. In einem Gebilde mit der richtigen Zusammensetzung von Uran-Brennstoff, Moderator und Kühlmittel kann damit

eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion stattfinden, sofern das Gebilde (Kernreaktor) die erforderliche minimale Grösse aufweist. Im Beharrungszustand (im sogenannten «kritischen» Zustand) erzeugt jeweils gerade ein bei der Spaltung entstehendes Neutron eine weitere Spaltung, so dass man von einer kontrollierten Kettenreaktion spricht. Die weiteren ein bis zwei bei einer Spaltung entstehenden Neutronen werden vom (nicht direkt spaltbaren) Uran-Isotop 238, von den Hüllen der Brennstäbe, vom Kühlmittel, Moderator, Struktur- und Abschirmmaterial sowie von den Regelstäben absorbiert. Der Verlauf der Kettenreaktion (und damit der Energieproduktion in Form von Wärme) hängt von der Stellung der Regelstäbe, der Temperatur des Kühlmittels, Brennstoffs usw. ab.

Steuerung

Die Steuerung des Reaktors wird durch die Tatsache erleichtert, dass etwa 0,7% der Spaltneutronen nicht wie die übrigen sofort, sondern stark verzögert emittiert werden. Aus diesem Grund beträgt die Zeit zwischen zwei Generationen von Spaltungen etwa 0,1 s, was den Einsatz normaler Regeltechnik für die Beeinflussung der Reaktorleistung gestattet. Begeht man die «Todsünde», den Reaktor so zu gestalten/verändern, dass er ohne die verzögerten Neutronen kritisch wird (d.h. die Kettenreaktion aufrecht erhält), dann beträgt die Zeit zwischen zwei Generationen nur noch 0,001 s - wodurch dann selbst bei kleinen Zuwächsen von Generation zu Generation ein sehr rascher Leistungsanstieg möglich wird, der zur Überhitzung und Zerstörung des Reaktors führen kann.

Damit ergibt sich eine erste Sicherheitsanforderung:

- Ein Reaktor ist so auszulegen, dass eine unkontrollierte Kettenreaktion nicht auftritt; d.h., ein rascher Anstieg der Zahl der Kernspaltungen und damit eine Überhitzung der Brennstoffhüllen und des Urans muss vermieden werden. Bei potentiell gefährlichen Störungen muss der Reaktor jederzeit sicher abgeschaltet werden können (Unterbruch der Kettenreaktion, «Scram»).

Konzentrierte Energie

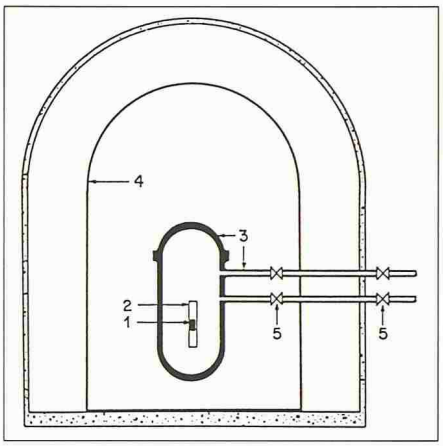
Weitere Forderungen ergeben sich ebenfalls aus der Natur des Spaltprozesses: Der Spaltung von 1 g Uran 235 entspricht ein Wärmeäquivalent von fast 1 MW-Tag oder von rund 2700 t Steinkohle, was eine Chance und ein Risiko bedeutet.

Chance deshalb, weil
- der Brennstoffvorrat eines Kernreaktors für mehrere Jahre in einem kleinen Saal Platz findet
- ein Kernkraftwerk mit einer Brennstoffladung etwa ein Jahr lang betrieben werden kann.
- wegen der geringen involvierten Stoffmengen die nukleare Energieerzeugung praktisch ohne Beeinträchtigung der Umwelt erfolgen kann.

Risiko deshalb, weil
- eine selbsterhaltende Kettenreaktion nur bei einer mindestens «kritischen» Grösse des Reaktors möglich ist - das bedeutet aber, dass im Gegensatz zu fossilen Kraftwerken nicht nur der laufende Brennstoffbedarf zugegeben wird, sondern dass im Reaktor eine Jahresproduktion an Energie steckt, die bei einer unkontrollierten Kettenreaktion teilweise frei werden könnte
- trotz des Abschaltens des Reaktors und damit der Verhinderung weiterer Kernspaltungen noch etwas Wärme produziert wird, und zwar wegen der Radioaktivität vieler Spaltprodukte. Diese sogenannte *Nachwärme* beträgt kurz nach dem Abschalten einige Prozent der vorherigen Reaktorleistung, nach etwa 3 Stunden weniger als 1 Prozent
- die radioaktiven Spaltprodukte zwar im wesentlichen im Brennstoff haften, aber bei Überhitzungen teilweise daraus freigesetzt werden könnten.

Neben die bereits genannte Sicherheitsanforderung (sicheres Abschalten) treten aus diesen Gründen zwei weitere:

- sichere *Abfuhr der Nachwärme*
- *Zurückhaltung der Radioaktivität*



1 UO_2-Brennstoffpillen. Keramikähnliches Material mit hohem Schmelzpunkt und hohem Rückhaltevermögen für Spaltprodukte
2 Brennstoff-Hüllrohr. Hält gasförmige und leichtflüchtige Spaltprodukte zurück
3 Druckführende Umhüllung des Reaktorkreislaufes (Reaktordruckbehälter und Rohrleitungen). Hält aktiviertes Kühlmittel zurück
4 Primärcontainment (Sicherheitsbehälter). Hält Spaltprodukte nach einem Kühlmittelverlust-Störfall zurück
5 Absperrventile. Schliessen Leitungen durch den Sicherheitsbehälter ab und gewährleisten dessen Integrität bei einem Kühlmittelverlust-Störfall

Bild 1. Darstellung der verschiedenen Schutzbarrieren

Die wichtigsten Reaktortypen

Vielfältige «Bausteine»

Die Haupt-«Bausteine» eines Kernreaktors wurden bereits genannt: der «Brennstoff», das Kühlmittel und der Moderator. Am Anfang der Reaktorentwicklung stand nur Natururan mit einem Gehalt von 0,7% U-235 zur Verfügung, so dass man nur mit Hilfe von sehr wenig neutronenabsorbierenden Materialien wie Graphit oder schwerem Wasser (D_2O) Reaktoren bauen konnte. Mit einer Anreicherung von rd. 3% U-235 liess sich dann auch gewöhnliches Wasser (H_2O) als Moderator/Kühlmittel einsetzen. Die Palette der möglichen Bausteine war damit gross geworden:

- *Brennstoff:* Uran (natürlich oder angereichert) in Form von metallischen Legierungen, Oxid oder Karbid, z.T. zusammen mit Plutonium
  «Exoten»: wässrige Suspension von Uran, Salzschmelzen
- *Moderator:* D_2O, Graphit, H_2O
  kein Moderator: schneller Reaktor
  «Exoten»: Beryllium, Zirkonhydrid
- *Kühlmittel:* Luft, CO_2, Helium, D_2O, H_2O
  Natrium (v.a. für schnelle Brüter)
  «Exoten»: Terphenyle, Salzschmelzen

Ausleseprozess

Von den vielen möglichen Kombinationen «starben» in der Folge die meisten wegen Korrosions- oder anderen Materialproblemen, Schwierigkeiten im Betrieb, fehlenden Entwicklungsgeldern, Kosten usw. Zu nennen sind etwa der organisch-gekühlte und -moderierte Reaktor, der Salzschmelzenreaktor, der wässrige homogene Reaktor, die Kombinationen Graphit-Natrium, D_2O-CO_2, Graphit-Luft, ferner verschiedene dampfgekühlte Systeme und die gas- und dampfgekühlten schnellen Brüter. Dabei spielten z.T. Sicherheitsprobleme auch mit, z.B. beim luftgekühlten, graphitmoderierten Typ, wie Windscale, bei dampfgekühlten Varianten oder bei D_2O-CO_2 wie Lucens.

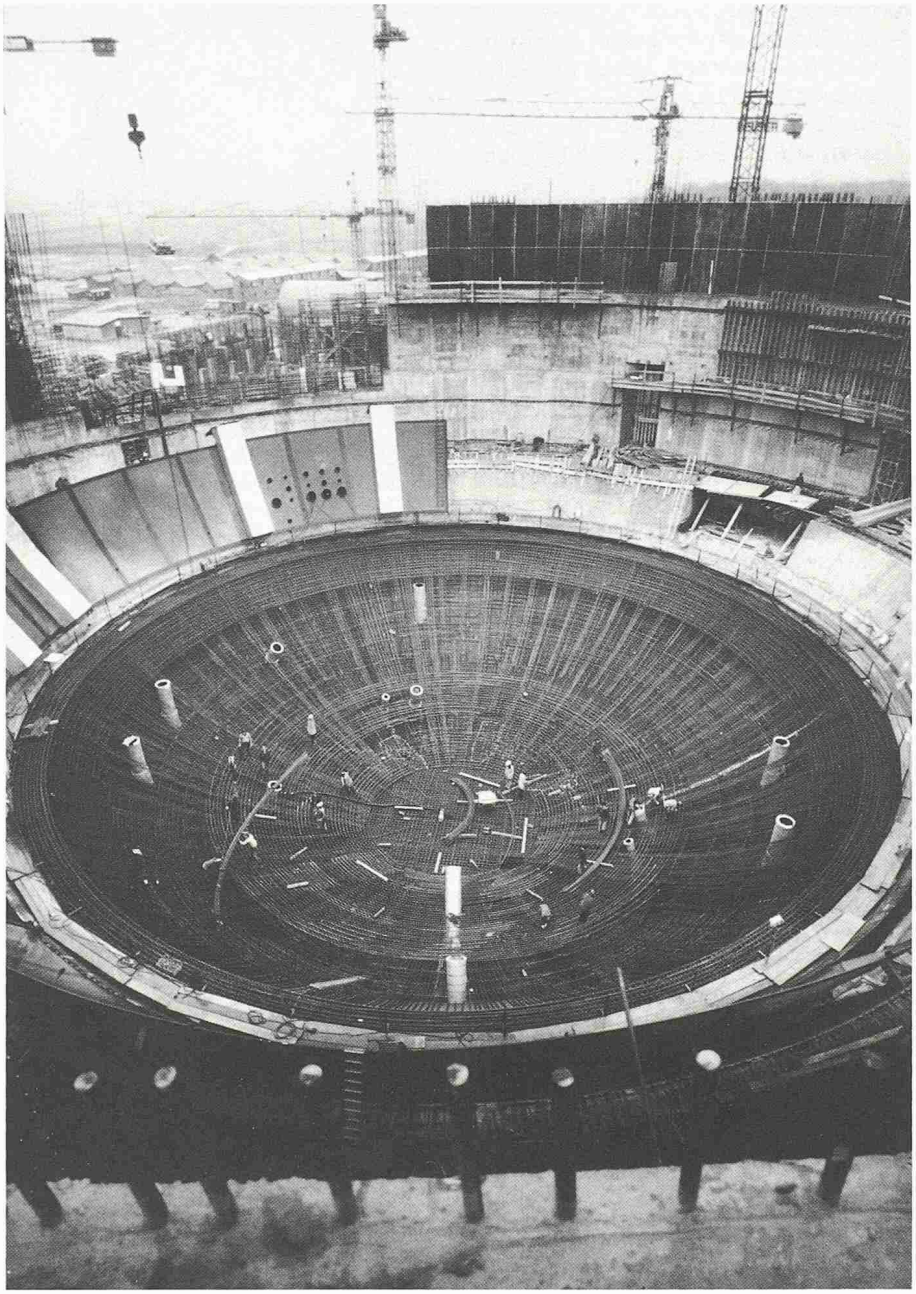


Bild 2. Bau des Containments für das KKW Gösgen, Stand Januar 1975

Die Hauptlinien

Die 1956 mit Calder Hall begonnene Linie der Gas(CO_2)-Graphit-Reaktoren (auch «Magnox»-Linie genannt nach dem Material der Brennstoff-Hüllrohre) wurde vorwiegend in Grossbritannien und Frankreich gebaut. Die englische Weiterentwicklung («Advanced Gas Cooled Reactor», AGR) ist in den letzten Jahren durch Druckwasserreaktoren abgelöst worden. Eine andere (nicht eben zahlreiche) gasgekühlte Linie stellt der *Hochtemperaturreaktor* dar, der mit Helium gekühlt wird und dessen Brennstoff in Form von keramisch beschichteten Partikeln vorliegt.

Der *Schwerwasser-Typ* wurde v.a. von Kanada konsequent gebaut und zwar als D_2O-moderierter und mittels Druckröhren D_2O-gekühlter Reaktor («Candu»). Exportanlagen finden sich in Indien, Pakistan, Argentinien, Korea und Rumänien. Ähnliche Anlagen deutscher Provenienz besitzt Argentinien. Wegen der Möglichkeit, Natururan zu verwenden, haben sehr viele Länder D_2O-Reaktoren entwickelt – aber (wie Schweden oder die Schweiz) später aufgegeben.

Ironischerweise ging der erste kleine Leistungsreaktor 1954 in Obninsk (UdSSR) in Betrieb, und zwar ein H_2O-gekühlter, graphitmoderierter *RBMK-Reaktor*. Nach Tschernobyl erscheint ein Weiterbau dieser spezifisch russischen Linie eher unwahrscheinlich. Mit angereichertem Uran werden die *Leichtwasserreaktoren* betrieben. H_2O dient sowohl als Moderator wie als Kühlmittel. Beim *Druckwasserreaktor* wird Dampf erst im Dampferzeuger produziert, während beim *Siedewasserreaktor* der Druck von rund 70 bar Sieden im Kern zulässt. Die grösste Verbreitung hat weltweit der Druckwasserreaktor gefunden, wobei dazu weniger die frühe Anwendung in Unterseebooten als vielmehr die einfache Technologie und die verschiedenen Entwicklungen in den USA, Frankreich, Deutschland, Japan und der UdSSR beigetragen haben.

Zu erwähnen bleibt der *schnelle Brutreaktor*, der sich in Demonstrationsanlagen bewährt hat und der durch Umwandlung des Uran 238 in spaltbares Plutonium gestattet, 50 bis 60mal mehr Energie zu gewinnen, als dies mit den vorerwähnten «thermischen» Reaktoren möglich ist.

Erfüllen der Sicherheitsanforderungen [5-7]

Vorbeugen

Schon in den vierziger Jahren – also nur wenige Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung durch *Hahn* und *Strassmann* im Jahre 1938 – kannte man das Gefahrenpotential radioaktiver Spaltprodukte und die eingangs erwähnten grundlegenden drei Sicherheitsanforderungen. Man konnte daher schon beim Bau der ersten Kernkraftwerke primär das Motto «Der kluge Mann baut vor» befolgen und vorbeugende Massnahmen treffen. Dies bedeutete gewissermassen eine Umkehr der bisherigen «Sicherheitsphilosophie», die – etwa bei Dampfkesseln oder im Bergbau – von der schlichten Weisheit «Durch Schaden wird man klug» ausgegangen war [4]. Die neue «Philosophie» zielte darauf ab, *Sicherheit trotz menschlicher Unvollkommenheit* zu erreichen:

Fehlertoleranz einbauen:

- Dazu gehören das *Fail-Safe-Prinzip* (bei Versagen z.B. der Stromversorgung fällt ein Relais in die sichere Stellung), aber auch der Einbau von sogenannten *Verriegelungen*, die allenfalls schwerwiegende Bedienungsfehler abblocken.
- Schon früh wurde in den USA gefordert, dass ein Reaktor so konstruiert werden muss, dass er einen «gutmütigen», selbstbegrenzenden Charakter aufweist: Eine plötzliche Leistungssteigerung infolge von Störungen muss durch den negativen Leistungskoeffizienten abgebremst werden (Tschernobyl hatte demgegenüber einen positiven Leistungskoeffizienten, der zur Selbstzerstörung führte).

Fehler vermeiden:

- Hier wurde nebst den in der Technik üblichen Mitteln wie Ausbildung, Regelwerke usw. der *Qualitätssicherung* von der Berechnung über die Konstruktion bis zur Fertigung ein bisher nicht bekanntes Gewicht gegeben. Wenig Parallelen in der übrigen Technik hat auch das breit angelegte und intensive *behördliche Prüf- und Aufsichtsverfahren.*
- Ausserdem hat man in den letzten Jahren in der gesamten westlichen Welt die Anstrengungen zum Vermeiden von Operateur-Fehlhandlungen und -Fehldiagnosen verstärkt (Stichwort: *«Mensch-Maschine-Kommunikation»).* Das Verhalten des Betriebspersonals bei Störfällen wird an *Simulatoren* geübt.
- Mit der zunehmenden Zahl von Reaktoren stieg die Bedeutung der Erfahrungs- und Ereignisauswertung: Nicht nur, weil man bereits durch kleinere Schäden klüger werden kann, sondern auch wegen der Möglichkeit, Fehler dadurch zu vermeiden oder deren Folgen einzugrenzen. Man ist z.B. im Westen seit vielen Jahren dazu übergegangen, Störfälle durch automatische Einrichtungen zu beherrschen. Der Operateur muss damit nicht unter höchstem Stress handeln und gewinnt Zeit für das überlegte Einleiten der längerfristigen Massnahmen.

Doch zurück zu den Anfängen!

Mit Störfällen rechnen . . .

Schon beim ersten grossen amerikanischen Kernkraftwerk in Shippingport (1957 in Betrieb) wurde gefordert, dass der plötzliche *Bruch einer Hauptkühlmittelleitung* (durch diese Leitungen fliesst Wasser, das den Reaktor kühlt) beherrscht werden müsse. Das führte u.a. zur Erstellung eines sogenannten Containments (Sicherheitshülle oder -gebäude), das die beim unterstellten Leitungsbruch freiwerdende Aktivität zurückhalten kann. Der postulierte Bruch der Hauptkühlmittelleitung war eine typische vorausschauende Sicherheitsforderung, die so angelegt war, dass sie eine möglichst tiefgestaffelte «Verteidigung» durch verschiedene Sicherheitssysteme erforderlich machte.

Weitere Auslegungsstörfälle vom Typ «Einwirkung von innen» (EVI) sind *Transienten* (Störung der Reaktoranlage durch Ausfälle von Pumpen, Fehlstellung von Armaturen usw.) und *Verlust der Strom-Eigenbedarfsversorgung* (Notstromfall). Bekannt sind ebenfalls die «Einwirkungen von aussen» (EVA), wie Flugzeugabsturz oder Erdbeben,

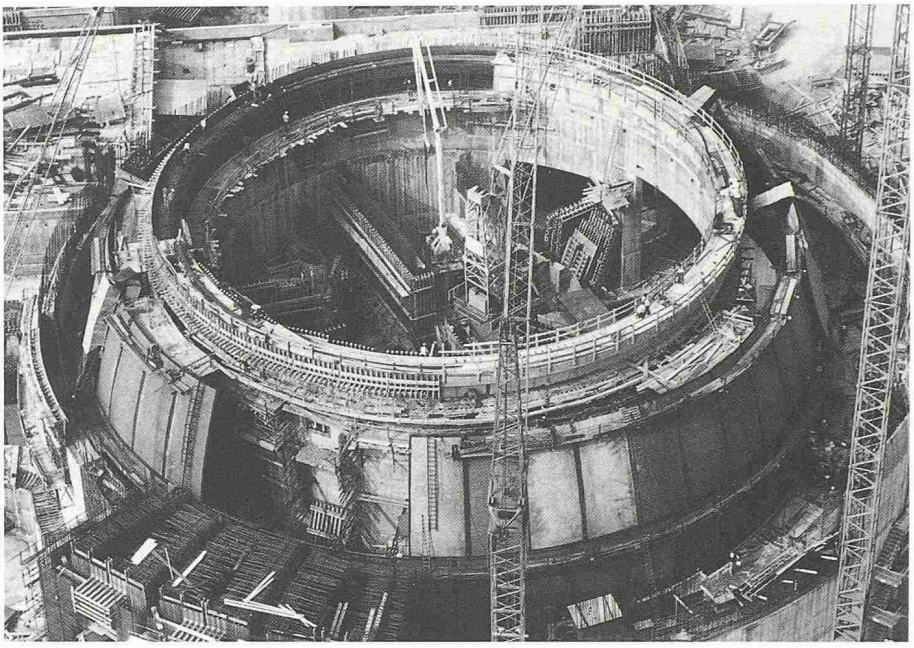


Bild 3. Bau des Containments für das KKW Gösgen, Stand September 1975

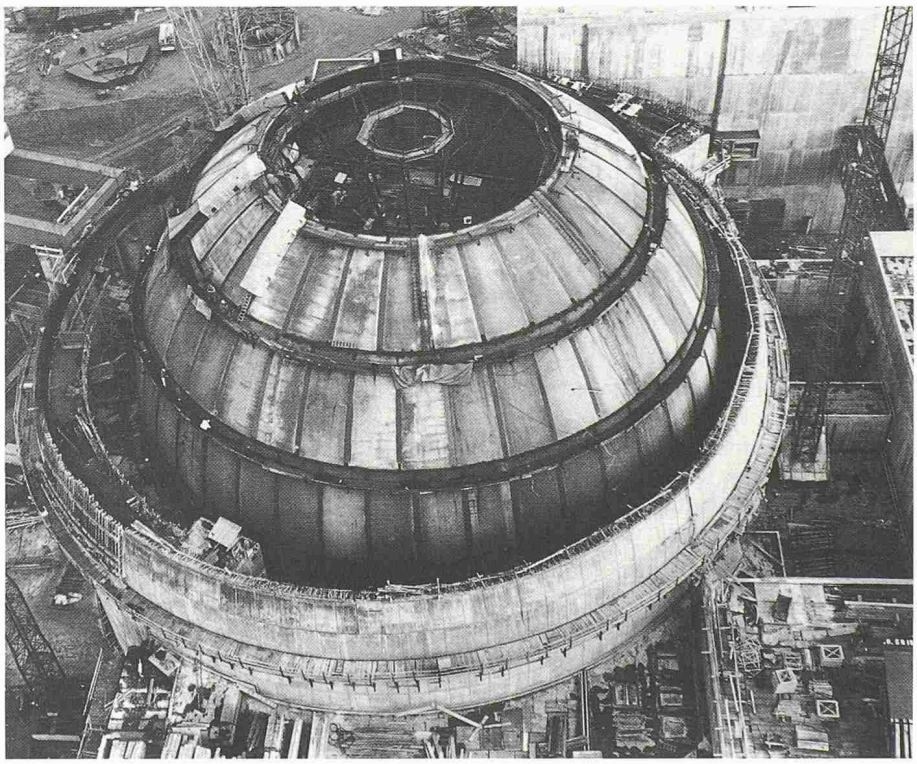


Bild 4. Bau des Containments für das KKW Gösgen, Stand Januar 1976

gegen die das Kraftwerk ausgelegt wird. Die Auslegungsstörfälle werden so beherrscht, dass bei realistischer Betrachtung eine beachtliche Sicherheitsmarge übrigbleibt. Damit können sowohl allfällige Kenntnislücken wie auch noch schlimmere Ereigniskombinationen mit abgedeckt werden. Darüber hinaus sind auch Vorkehren zum Schutz gegen Sabotage und ähnliche Einwirkungen getroffen.

. . . und dabei die Sicherheitsanforderungen einhalten!

Die drei Sicherheitsanforderungen

- sichere Abschaltung
- Nachwärmeabfuhr
- Aktivitätsrückhaltung

müssen bei allen oben genannten Störungen und Störfällen zuverlässig erfüllt werden. Das führt zu einer Reihe von passiven und aktiven *Sicherheitssystemen,* an die zur Erreichung einer sehr hohen Zuverlässigkeit folgende Forderungen gestellt werden:

- möglichst weitgehendes Fail-Safe-Verhalten (Versagen in die richtige Richtung)
- Redundanz (mehr Systeme als nötig, voneinander unabhängig und getrennt)

Stufe	Bezeichnung	Charakterisierung	Beispiele
6	schwer(st)e Unfälle	Freisetzung eines namhaften Teils des Radioaktivitätsinventars	Tschernobyl 1986
5	schwere Unfälle	gewisse Freisetzung erfolgt oder befürchtet, so dass externe Notfallmassnahmen ergriffen werden	Windscale 1957 Three Mile Island 1979
4	Unfälle in der Anlage	Kernbeschädigung oder Personalüberdosis, jedoch Freisetzung nur etwa in Höhe der erlaubten Jahreslimite	Saint-Laurent (Magnox), 1980 (Brennelementschaden)
3	sicherheitstechnische Störfälle	Beeinträchtigung von Sicherheitssystemen, interne Exposition, Freisetzung von über 1/10 der erlaubten Jahreslimite	Bugey 5, 1984 (gestörte Eigenbedarfversorgung)
2	Störfälle mit möglichen Weiterungen	Störungen mit potentiellem Einfluss auf die Sicherheit oder mit Reparaturerfordernis	Superphénix 1987 (Natrium-Leck in Transferbehälter)
1	abnormaler Betriebszustand	Überschreitung der spezifizierten Betriebsparameter, evtl. mit Einsatz von Sicherheitssystemen	Tricastin, 1987

Skala für Störfälle und Unfälle in KKW

- Diversität (Verwendung unterschiedlicher Prinzipien, z.B. zur Feststellung wichtiger Abweichungen)
- Defense in Depth («tiefgestaffelte Verteidigung», z.B. mehrere Barrieren hintereinander, Auslegung mit Reserven)
- überprüfbare Qualität.

Sicherheitssysteme

Ein wichtiges aktives Sicherheitssystem ist der sogenannte *Reaktorschutz*, der Abweichungen wichtiger Zustandsgrössen (z.B. Neutronenfluss, Temperaturen, Durchflüsse usw.) vom Sollbereich erfasst und automatisch sicherheitsgerichtete Gegenaktionen auslöst.

Wird z.B. durch Druck-, Druckdifferenz- oder Niveaumessungen ein grosses Leck im Primärkreislauf festgestellt, so werden durch den Reaktorschutz Sicherheitssysteme angeregt, wie:

- Reaktorschnellabschaltung
- Notkühlsysteme
- Notstromdieselstart
- Containment-Abschluss.

Die *Notkühlsysteme* führen dem Reaktorkern rasch ausreichend Wasser zu und stellen danach auch die langfristige Kühlung sicher.

Die Funktion der *Radioaktivitätsrückhaltung* wird vorwiegend durch passive Barrieren wahrgenommen:

- Uranbrennstoff in Form von Uranoxid ist ein keramisches Material mit sehr starker Rückhaltefähigkeit für Spaltprodukte. Der Tschernobyl-Unfall führte darum zu einer starken Emission von radioaktiven Stoffen, weil etwa 3,5% des Urans mitsamt den daran haftenden Spaltprodukten ins Freie geschleudert und pulverisiert wurden. Eine richtig bemessene Schnellabschaltung (die in Tschernobyl fehlte) hätte dies verhindert.
- Brennstoffhüllen aus Zircalloy. Sie schliessen die allenfalls aus dem Brennstoff entweichenden, leichter flüchtigen Spaltprodukte (Edelgase, Iod) ein. Ein wirksames Notkühlsystem schützt die Brennstoffhüllen und das Uran vor Überhitzung.
- Reaktordruckbehälter, Primärleitungen Selbst bei einem Leck in einer Leitung wird Aktivität mindestens teilweise zurückgehalten.
- Betonstrukturen. Sie schützen die Sicherheitssysteme und das Containment, halten auch teilweise Aktivität zurück.
- Primärcontainment. Dank der Auslegung auf den bei einem Kühlmittelverlust maximal zu erwartenden Druck und zuverlässigem Schliessen der vorhandenen Öffnungen stellt es den Haupteinschluss für die aus dem Primärkreislauf entwichene Aktivität dar.
- Sekundärcontainment/Reaktorgebäude. Dadurch wird eine Filterung von allfälligen Leckagen des Primärcontainments ermöglicht, was eine Aktivitätsabgabe an die Umwelt auf ein Minimum beschränkt.

Und was, wenn trotz allem ...?

Jede Aufzählung von Sicherheitsmassnahmen – und wäre sie noch so eindrücklich – provoziert die Frage nach der Vollständigkeit: Hat man an alles gedacht? Könnten nicht noch schwerwiegendere Abläufe auftreten? Dazu einige Hinweise:

- Durch die vorausschauende Festlegung von sehr weitgehenden Auslegungsstörfällen wird ein umfassendes Spektrum denkbarer Fälle abgedeckt.
- Redundanz, Auslegungsreserven, mehrfache Barrieren usw. ergeben eine ausreichende Toleranz für Störfallverläufe der verschiedensten Arten.
- Eine gut ausgebildete und trainierte Mannschaft kann auch Massnahmen gegen seltene Abläufe treffen, sofern sie über geeignete Diagnosehilfsmittel verfügt.
- Die weltweiten langjährigen Reaktorbetriebserfahrungen (einschl.Störfälle!) liefern wertvolle Zusatzinformationen, die Anlass für Verbesserungen und Nachrüstungen geben. Prinzipielle Überraschungen treten – nach gut 30 Jahren ziviler Kernenergienutzung – kaum mehr auf.

Zu Beginn der siebziger Jahre wollte man in den USA detaillierter wissen, welche Auswirkungen ganz schwerwiegende Fehler- und Versagenskombinationen bei Kernkraftwerken zur Folge hätten. Diese Untersuchung, unter dem Namen «Rasmussen-Studie» bekannt, zeigte 1974/75, dass das Risiko von Kernkraftwerken viel kleiner ist im Vergleich zum Risiko anderer technischer Werke und auch verschiedener Naturereignisse. Eine deutsche Studie kam 1979 zu ähnlichen Schlüssen.

Ist nun seit Tschernobyl alles anders geworden?

Massive Wirkung ...

Die fast totale Havarie des Tschernobyl-Reaktors am 26. April 1986 führte zum Tod von 31 Betriebsangehörigen, zur Evakuation von über 100 000 Menschen und zu einer fast weltweit messbaren Verfrachtung von Radioaktivität.

... aber wenig Neues!

Die Analyse des dank Glasnost bekanntgewordenen Unfallablaufs zeigte, dass die Havarie auf eine fast unglaubliche Häufung von elementaren Verstössen gegen die oben zitierten Sicherheitsgrundsätze zurückzuführen war. Deshalb sind die Lehren für westliche Kernkraftwerke eher Bestätigungen, z.B.

Sicherheit ist eine Daueraufgabe!

Die Berücksichtigung der Sicherheitsgrundsätze und der Betriebserfahrungen ist zwar notwendig für den Bau eines sicheren Kernkraftwerks – sie ist aber nicht ausreichend für den sicheren

Betrieb während der ganzen Lebensdauer. Dieser sichere Betrieb kann gewährleistet werden, wenn sowohl

- die Qualität der Anlage wie auch
- die Qualitäten des Betriebspersonals

aufrechterhalten und erforderlichenfalls verbessert werden. Die Qualität der Anlage wird u.a. erhalten durch wiederkehrende Funktionsprüfungen sowie durch Wartung und Unterhalt. Gezielte Verbesserungen (Nachrüstungen) sind vorzunehmen, wenn neue Erkenntnisse dies erfordern.

Das Betriebspersonal ist nicht nur verantwortlich für den Zustand der Einrichtungen (zusammen mit dem Fachpersonal der Zulieferanten), sondern auch für eine korrekte Diagnose bei Störungen. Weiterausbildung und Training (auch am Simulator) werden hier grossgeschrieben. Zusammenfassend darf aber festgestellt werden, dass ein sorgfältig errichtetes Kernkraftwerk sicher betrieben werden kann, ohne dem Betriebspersonal übermenschliche Leistungen abzuverlangen.

Gezielte Vorsorge gegen schwere Unfälle

Tschernobyl hat die bereits früher in Angriff genommene Einführung von besonderen Sicherheitsmassnahmen gegen schwere Unfälle beschleunigt, so z.B. weitere Vorkehrungen gegen Transienten ohne Schnellabschaltung bei Siedewasserreaktoren, Beherrschung grosser Wasserstoffmengen aus einer störfallbedingten Reaktion Wasser–Zirkonhüllen oder die filtrierte Druckentlastung des Containments.

Zusammenarbeit und Information

Als Folge von Tschernobyl haben nicht nur verschiedene staatliche und Betreiber-Organisationen einen vermehrten Erfahrungsaustausch und rasche Information bei Störfällen beschlossen, sondern auch die Öffentlichkeit soll differenzierter orientiert werden. So wurde in Frankreich eine 6stufige Skala für Kernkraftwerkstörfälle und Unfälle eingeführt (Kasten nach [8]), und die Internationale Atomagentur liess die grundlegenden Sicherheitsprinzipien neu zusammenstellen[9].

Ausblick

Wie bereits angedeutet, steht die Zeit auch bei der Reaktortechnik nicht still: Die Auswertung von Betriebserfahrungen, Störfällen und Risikoanalysen zeigt Wege auf, wie bestehende und künftige Kernkraftwerke noch sicherer und noch betriebsfreundlicher gemacht werden können, beispielsweise durch vermehrte Anwendung inhärent sicherer Eigenschaften, durch Erhöhung der Zuverlässigkeit von Sicherheitssystemen, vermehrte Computeranwendungen, Verstärkung von Barrieren usw. [10, 11]

Wegen der geringen Zuwachsrate des Stromverbrauchs und der Akzeptanzkrise in verschiedenen Industrieländern wird die Zahl der neu in Angriff genommenen Kernkraftwerke in den nächsten Jahren eher klein sein – deshalb stehen kaum namhafte Gelder bereit für «exotische» Entwicklungen, wohl eher für evolutionäre Entwicklungen, wozu auch die weltweit vorliegenden Erfahrungen aus 4600 Reaktor-Betriebsjahren mit z.Z. rund 420 Kernreaktoren entscheidend beitragen. Gerade hier liegt aber auch die Crux: Ein zweites Tschernobyl würde der weiteren Kernenergieentwicklung schwer schaden, obschon seit spätestens 1988 einem weiteren Publikum klar sein sollte, dass Kernenergie aus Gründen des globalen Umweltschutzes (Treibhauseffekt) und der langfristigen Versorgung unabdingbar ist. Müssen aber die Kernreaktoren dazu «absolut sicher» oder «inhärent sicher» werden? Nach Meinung des Autors wären solche Ziele illusorisch und unehrlich – realistischer ist das Ziel, die Eintretenswahrscheinlichkeit von Unfällen weiter zu senken und den allfälligen Schadenumfang weiter zu beschränken, so dass die Kernenergie im Risikovergleich mit anderen Energieerzeugungsarten ihren Vorsprung weiter ausbauen kann. Wege dazu werden in den folgenden Aufsätzen dargelegt. Als Ordnungshilfe möge eine von der Nuclear Energy Agency der OECD kürzlich vorgeschlagene Einteilung für «fortgeschrittene» Leichtwasserreaktorprogramme dienen:

Kategorie 1:
Anwendung neuerer Technologien bei bestehenden Reaktoren (Nachrüstung).

Kategorie 2:
Entwicklungsarbeiten/Detailkonstruktion fortgeschritten oder beendet, Genehmigungsunterlagen vorbereitet oder in Ausarbeitung, z.T. Bau begonnen. *Beispiele:* ABWR, APWR (Japan, USA), N-4 (Frankreich), Sizewell-B (GB), BWR-90 (Schweden), Post-Konvoi (D).

Kategorie 3:
Projekte zur Definition der Ziele/Anforderungen von fortgeschrittenen Reaktoren für die nähere Zukunft. *Beispiele:* PWR-2000 (Frankreich), PWR-Mark II (GB), simplified BWR/PWR (USA).

Kategorie 4:
Langfristige Projektstudien, die erst über Prototypen zur kommerziellen Anwendung führen. *Beispiele:* PIUS (Schweden), ISER (Japan).

Die folgenden Artikel dieser Serie werden sich aber auch mit Reaktoranwendungen im Hoch- oder Niedertemperaturbereich befassen.

Literatur

[1] *Winkler W., Hintermann K.:* Kernenergie – Grundlagen, Technologie, Risiken, Piper Verlag 1983
[2] *Michaelis H.:* Handbuch der Kernenergie, Kompendium der Energiepolitik, Econ-Verlag, 1986
[3] *Weber R.:* Webers Taschenlexikon Kernenergie, Olynthus Verlag 1986
[4] *Fuchs H.:* Techniken zur Beherrschung technischer Risiken, SVA-Informationstagung 22./23. Nov. 1982
[5] SIA Dokumentation 29: Die Sicherheit von Kernkraftwerken (1978)
[6] *Ziegler A:* Lehrbuch der Reaktortechnik, Bd. 3: Kernkraftwerktechnik, Springer Verlag 1985
[7] SVA-Informationstagung 3./4. Nov. 1986: Sicherheit der Kernkraftwerke im Lichte von TMI und Tschernobyl
[8] L'échelle de gravité des accidents nucléaires; Revue Générale Nucléaire No 4, 1988, p. 356
[9] Safety Series No 75-INSAG-3: Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, IAEA 1988
[10] Probabilistic Safety Assessment and Risk Management, PSA 87, Zürich, Verlag TÜV Rheinland 1987
[11] Verbesserung der Sicherheit und Verfügbarkeit bestehender Kernkraftwerke, SVA-Vertiefungskurs 23.–25. Nov. 1987

Adresse des Verfassers: *Hans Fuchs*, Dr. sc. techn. COLENCO AG (ehemals Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG), Parkstrasse 27, 5401 Baden.