Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 100 (2009)
Heft: 4

Artikel: Wie Notkühlsysteme eine Kernschmelze verhindern
Autor: Santner, Guido
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856366

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

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

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

Download PDF: 15.08.2025

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

Wie Notkühlsysteme eine Kernschmelze verhindern

Sicherheit von Kernreaktoren

Als Anfang der 1970er-Jahre die meisten kommerziellen Kernkraftwerke ihren Betrieb aufnahmen, die heute noch Strom liefern, galten sie als sicher – denn sie waren bereits damals für grosse Störfälle ausgelegt. Dass wie 1979 in Three Mile Island auch eine Reihe von kleinen Problemen zu einer Kernschmelze führen kann, hätten die Experten nicht gedacht. Auf diesen Unfall hin wurden die Kernkraftwerke weltweit nachgerüstet. Heute ist die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze in den bestehenden Kraftwerken so klein, dass ihnen selbst ein starkes Erdbeben nichts anhaben kann.

Guido Santner

Die Nachtschicht der Operateure war schon bald zu Ende, als am 28. März 1979 um 4 Uhr morgens die Pumpen des sekundären Kühlkreises im Kernkraftwerk Three Mile Island (USA) aufgrund eines technischen Defekts stoppten [1, 2]. Dieser Kühlkreis mit nicht radioaktiv kontaminiertem Wasser treibt bei diesem Typ Reaktor die Turbine an und holt sich die Energie über einen Wärmetauscher vom primären Kühlkreislauf im Reaktorgefäss (Bild 1). Da in Three Mile Island das Wasser im Primärkreislauf nun nicht mehr gekühlt wurde, erhitzte es sich, und der Druck im Reaktorgefäss stieg innert 3 s von normalerweise 150 auf 156 bar, worauf ein Überdruckventil automatisch öffnete.[1] Der Druck stieg aber weiter an, und 8 s nach dem Ausfall der Kühlpumpen löste die Automatik eine Notabschaltung des Reaktors aus – bei einem Druck von 164 bar. Daraufhin fielen die Steuerstäbe in den Reaktor zwischen die Brennelemente und unterbrachen die aktive Kernspaltung.

Solche Störfälle ereignen sich von Zeit zu Zeit in Kernkraftwerken. Die Operateure in Three Mile Island waren deshalb nicht weiter beunruhigt. Der Druck im Reaktorgefäss fiel dann auch rasch, und die Kontrolltafel zeigte 12 s später an, dass sich das Überdruckventil bei 152 bar wieder geschlossen hatte. Was die Operateure nicht wussten, ist, dass das Ventil trotz des elektronischen Schliessbefehls immer noch offen war und weiterhin Dampf aus dem primären Kühlkreislauf entwich. Die Kontrolltafel zeigte

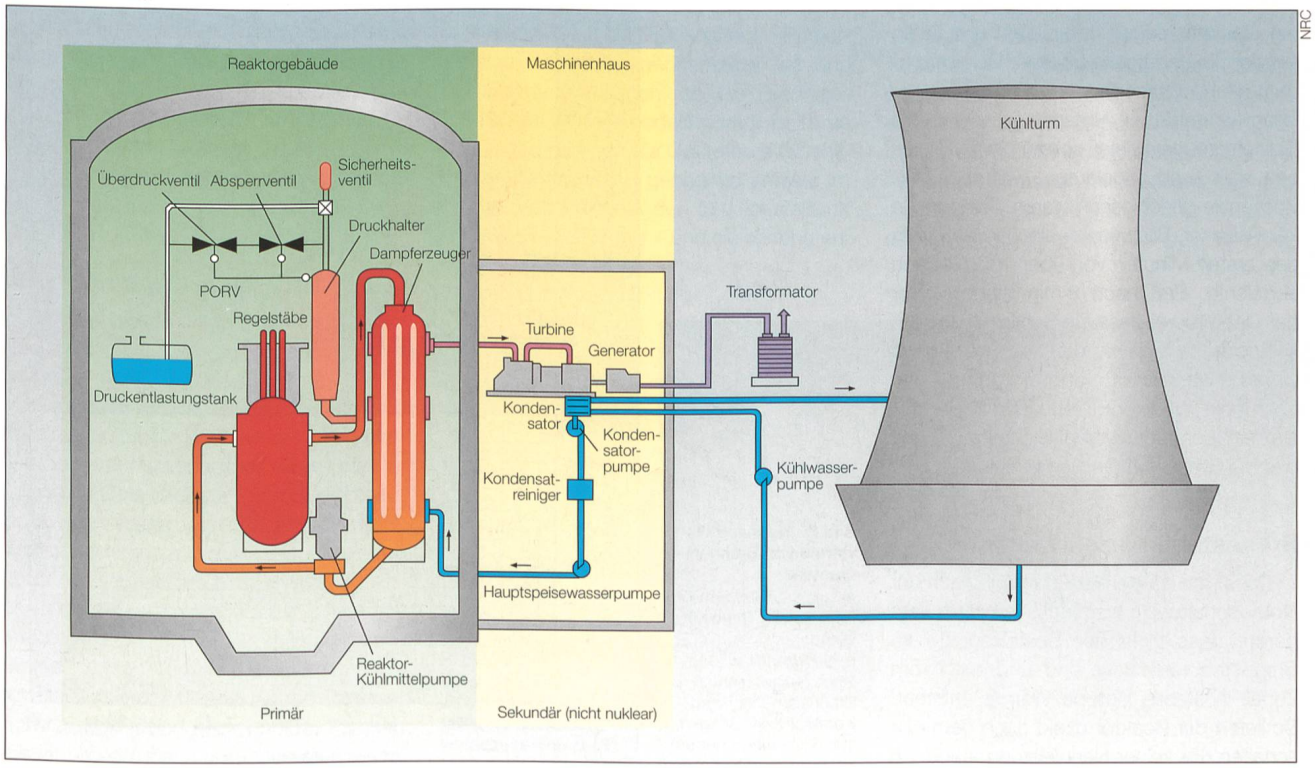


Bild 1 Übersicht des Reaktors in Three Mile Island.

nur an, dass das Ventil den Befehl bekam, zu schliessen.

Bereits 13 s nach Beginn des Unfalls leiteten die Operateure neues Wasser in den Reaktortank, um den Füllstand zu halten, denn da der Reaktor nicht mehr lief, kühlte sich das Wasser ab und «schrumpfte». Nach 48 s begann der Wasserstand im Druckhaltertank wieder zu steigen, und nach 2,5 min schalteten die Operateure eine der Pumpen aus und reduzierten die Leistung der anderen [3]. Denn ihnen wurde in der Ausbildung eingebläut, dass der Druckhaltertank nie komplett mit Wasser gefüllt sein darf, dass das System nicht solid werden darf. Der Druckhaltertank ist normalerweise mit 22 m^3 Wasser und 19 m^3 Dampf gefüllt. Dadurch lässt sich der Wasserstand im Reaktorgefäss regeln, und der Dampf soll allfällige Druckstösse im System dämpfen, wenn beispielsweise Ventile sich schliessen oder Pumpen ausfallen.

Das Ventil blieb offen

Was die Operateure nicht merkten, war, dass über das Überdruckventil weiterhin Dampf und später auch Wasser entwich. Im Innern des Reaktors bildeten sich Dampfblasen, weil der Druck abfiel. Und dieser Dampf drückte das Wasser im Druckhaltertank nach oben – effektiv verlor das Reaktorgefäss also ständig an Wasser.

Mittlerweile waren die Operateure mit einem anderen Problem beschäftigt: Die Wärmetauscher zwischen dem Primär- und dem Sekundärkühlsystem, die sogenannten Dampferzeuger, überhitzten und liefen auf der Sekundärseite trocken. Denn nachdem die Hauptspeisewasserpumpe ausgefallen war, hätten Notspeisepumpen die Dampferzeuger kühlen sollen. Diese 3 Pumpen sind auch angelaufen, weil aber Serviceventile geschlossen waren, lieferten sie kein Wasser. So wurden die Operateure in den ersten Minuten von über 100 Alarmen abgelenkt. Erst nach 8 min merkte einer der Operateure, dass die Serviceventile geschlossen waren – die Anzeigen dazu waren etwas abseits, und eine davon war überdeckt mit einer Etikette (Bild 3) [4]. Erst als der Operateur die Ventile öffnete, schoss das Kühlwasser in die Dampferzeuger.

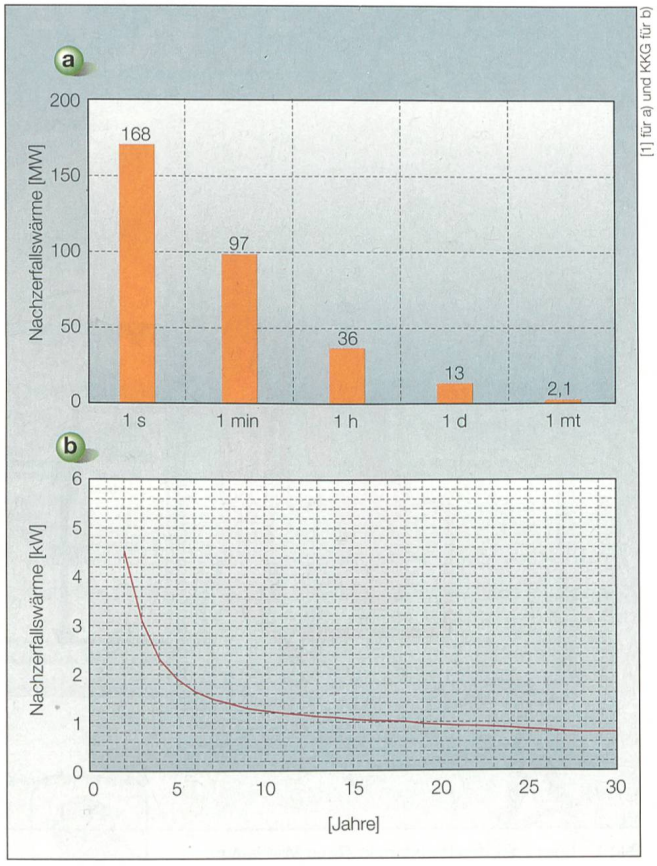
Brennstäbe heizen weiter

Dass sich ein Kernreaktor auch nach der Notabschaltung weiterhin erhitzt, liegt daran, dass viele der Spaltprodukte im Brennstab radioaktiv sind und bei ihrem Zerfall in stabile Isotope Wärme entsteht. So liefert der Reaktor direkt nach dem Abschalten 6% seiner Nennleistung, nach 1 h sind es noch 1%, also 31 MW bei Three Mile Island (Bild 2). Diese Wärme muss abgeführt werden – auch abgebrannte Brennelemente müssen bis zu 15 Jahre im Wasser gekühlt werden, bis sie in einen trockenen Container zur Zwischenlagerung geführt werden. Ein typisches Brennelement[2], wie es im Kraftwerk Gösgen eingesetzt wird, gibt dann, also nach 15 Jahren, noch immer 1 kW Wärmeenergie ab [5].

Die Kühlung dieser Nachzerfallswärme ist eine wesentliche Aufgabe der Sicherheitssysteme in Kernkraftwerken. Mehrere redundante Kühl- und Notkühlsysteme werden bei einem Unfall automatisch zugeschaltet. In den Primärkreislauf wird typischerweise mit Bor versetztes Wasser gepumpt, denn das Bor fängt die bei der Kernspaltung entstehenden freien Neutronen ein und hemmt damit die Kettenreaktion zusätzlich.

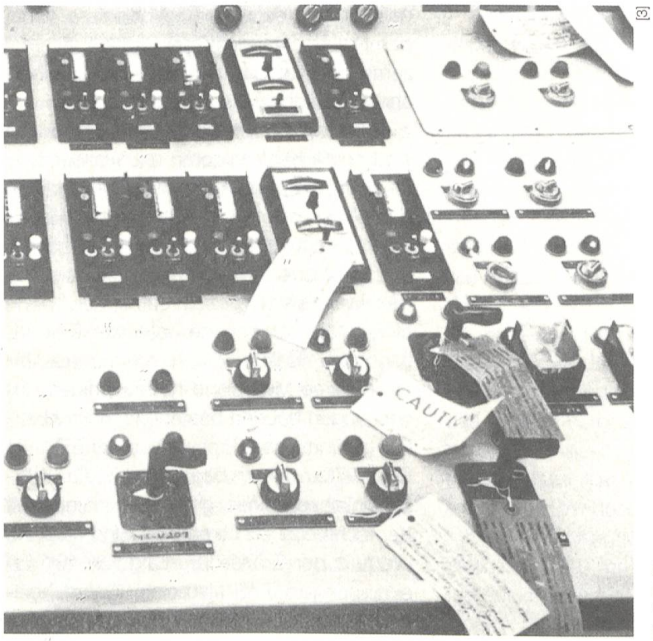
Ein Vorteil der Leichtwasserreaktoren, wie es die Druck- oder Siedewasserreaktoren sind, ist zudem, dass die von der Kernspaltung erzeugten schnellen Neutronen durch das Wasser moderiert werden. Verdampft das Wasser oder läuft es aus, stoppt die Kettenreaktion von sich aus, weil die Neutronen keine weiteren Kerne mehr spalten können – sie sind dann zu schnell und schiessen aus dem Reaktor. «Eine Kernschmelze läuft langsam ab, weil sich der Brennstoff auf hohe Temperaturen aufheizen muss, und das braucht Zeit. Eine schnelle Leistungsexpursion, die dem Reaktor in Tschernobyl zum Verhängnis wurde, kann nicht stattfinden, weil bei Leichtwasserreaktoren die Kettenreaktion mit steigender Kühlmitteltemperatur gedämpft wird. Man spricht hier von negativer Rückkopplung. Der grafitmoderierte und wassergekühlte Reaktor, wie er in Tschernoby eingesetzt wurde, hatte jedoch eine positive Rückkopplung, die in einem solchen Fall die Reaktorleistung schnell nach oben trieb», sagt Horst-Michael Prasser, Professor für Kernenergiesysteme an der ETH. Von den 441 Kernkraftwerken, die heute weltweit betrieben werden, sind 60% Druckwasserreaktoren und 20% Siedewasserreaktoren [6]. Dies, weil sie gutmütiger zu betreiben und wirtschaftlich attraktiver sind als andere Reaktortypen. Die restlichen 20% Reaktoren sind Schwerwasserreaktoren, vor allem in Kanada, grafitmoderierte Reaktoren mit Wasser- (Russland) oder Gaskühlung (England) und einige schnelle Brüter in Frankreich. Letztere nutzen die schnellen Neutronen – deshalb der Name – und verbrennen auch nicht angereichertes Uran zu praktisch 100%.[3]

Der Unterschied zwischen den Druck- und Siedewasserreaktoren wiederum liegt darin, dass der Siedewasserreaktor direkt Dampf generiert, der über eine Turbine zu Strom gemacht wird. Im Druckwasserreak-



[1] für a) und KKG für b)

Bild 2 Nachzerfallswärme von Brennelementen.
a) Nachzerfallswärme im Reaktor von Three Mile Island.
b) Nachzerfallswärme eines ausgebrannten Brennelements[2] vom Kernkraftwerk Gösgen (mit 5% angereichertem Uran als ursprüngliches Brennelement).



[3]

Bild 3 Etiketten deckten beim Unfall von Three Mile Island wichtige Anzeigen ab.

tor ist der Primärkreislauf geschlossen und baut einen Druck auf, womit das Wasser auch bei 300 °C flüssig bleibt. Hier wird die Wärme über Dampferzeuger an den sekundären Kühlkreislauf weitergegeben. Laut Prasser seien Druck- und Siedewasserreaktoren wirtschaftlich vergleichbar, auch wenn es mehr Druckwasserreaktoren gebe. Auch bezüglich Sicherheit bestehe kein wesentlicher Unterschied, ergänzt Martin A. Zimmermann, seit 1994 Leiter eines PSI-Forschungprojekts zum Störfallverhalten von Leichtwasserreaktoren und Leiter des Labors für Reaktorphysik am selben Institut. Vergleiche man Kraftwerke derselben Generation, seien beide Typen ähnlich sicher. So werden in der Schweiz in Mühleberg und Leibstadt Siedewasserreaktoren und in Gösgen und Beznau Druckwasserreaktoren betrieben.

Operateure brauchen Zeit

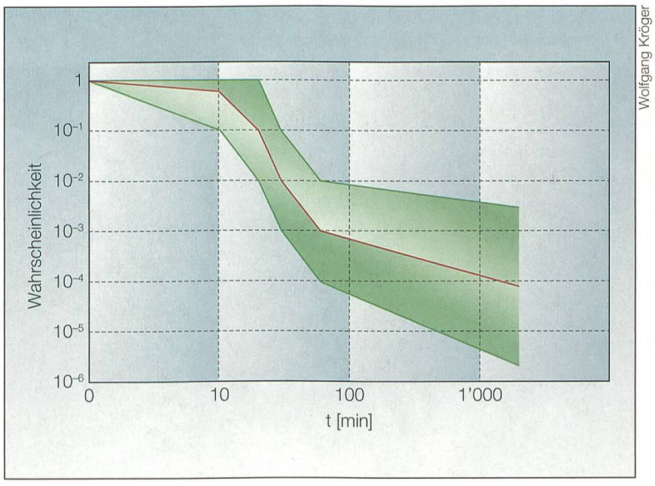
Für Prasser ist entscheidend, dass ein Operateur bei einem Zwischenfall genügend Zeit hat zu reagieren. In einem Druckwasserreaktor wie in Gösgen beträgt die Karenzzeit 0,5 h. Dies ist die Zeit, in welcher der Operateur entscheiden muss, was er tun will. Während dieser Zeit hat die Automatik die Anlage im Griff, und es kann nichts passieren, auch wenn der Operateur nichts tut. Andersherum blockiert die Anlage manuelle Eingriffe, welche die Lage verschlimmern könnten. So kann man in Gösgen einige Pumpen nicht mehr ausschalten, wenn ein Notfall eintritt. Dies war in Three Mile Island noch anders. Prasser: «Es ist wichtig, dass der Operateur weiss, dass er Zeit hat. Denn je mehr er überlegt, desto geringer ist die Fehlerquote.» Bild 4 zeigt, wie die Fehlerquote in einem Kontrollraum in Abhängigkeit von der Zeit, welche die Operateure bis zur Entscheidung haben, in heutigen Wahrscheinlichkeitsanalsysen berücksichtigt wird.[4] Nach rund 10 min sinkt die Fehlerquote signifikant.

1979 in Three Mile Island haben die Operateure kurzfristig eingegriffen. Dabei haben sie den Fehler gemacht, die Hochdruckpumpen auszuschalten, die Wasser in den Reaktorkern pumpten. Heute ist es zudem Vorschrift, dass der Reaktorbehälter selbst, nicht nur der Druckhalter im Primärkreislauf, eine Füllstandsanzeige hat und die Operateure sehen, ob die Brennelemente mit Wasser bedeckt sind. In Three Mile Island nahmen die Operateure fälschlicherweise an, es sei genügend Wasser im Reaktorbehälter, da der Druckhaltertank mit Wasser gefüllt war – und sie annahmen, dass das Überdruckventil geschlossen sei. Effektiv entwich aber 1 t Kühlmittel pro Minute. Es gibt zwar eine Temperaturanzeige am Ventil, die angezeigt hätte, dass weiterhin heisser Dampf austritt. Da aber das Ventil bereits längere Zeit leicht leckte, trat schon vor dem Unfall konstant etwas Wasserdampf aus, und das Ventil war seit Tagen heiss. Deshalb ignorierten die Operateure diese Anzeige.

Etwas mehr als 1 h nach dem Zwischenfall war der Füllstand im Reaktorgefäss in Three Mile Island so weit gefallen, dass immer mehr Dampf im Primärkreis zirkulierte. Durch diese Dampfblasen im Kühlwasser begannen die beiden Pumpen des Primärkreislaufes stark zu vibrieren. Die Operateure stoppten die Pumpen, um sie nicht zu beschädigen. Sie nahmen an, dass die natürliche Konvektion des Wassers die Brennstäbe genügend kühlen würde. Was auch so gewesen wäre, wenn sie mit Wasser bedeckt gewesen wären.

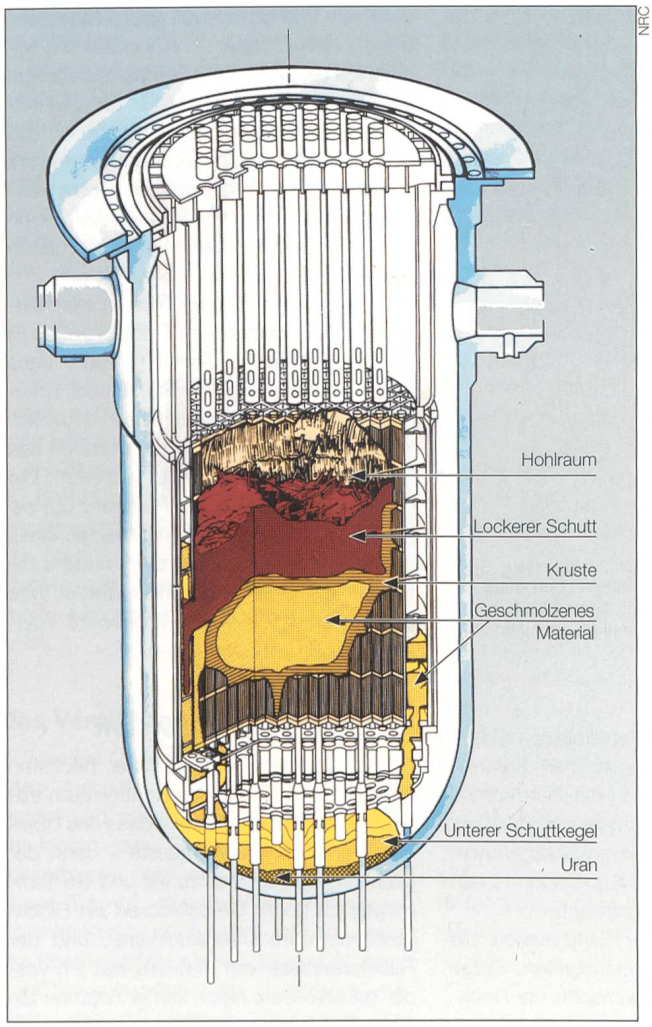
Es bildet sich Wasserstoff

Erst als die Operateure der nächsten Schicht um 6 Uhr in den Kontrollraum traten, merkte einer von ihnen, dass das Überdruckventil offen sein musste – denn der Druck im Reaktor war zu tief und die Temperatur zu hoch. Sie schlossen ein Blockventil vor dem Überdruckventil, und der Reaktorbehälter war erstmals seit 2 h wieder geschlossen. Noch immer nahmen die Operateure aber an, dass der Kern mit Wasser bedeckt sei. In Realität ragte der obere Teil längst aus dem Wasser und zersetzte sich. Denn das Uran ist in Form von Tabletten in Hüllrohren aus einer Zirkoniumlegierung eingebettet. Das Zirkonium eignet sich deshalb so gut, weil es die Neutronen nicht einfängt, es reagiert aber bei hohen Temperaturen mit Wasserdampf und oxidiert. Bei Temperaturen über 1200 °C oxidierte also ein grosser Teil der Hüllrohre,



Wolfgang Kröger

Bild 4 Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Operateure falsch entscheiden, verkleinert sich stark mit zunehmender Zeit, die zur Verfügung steht.

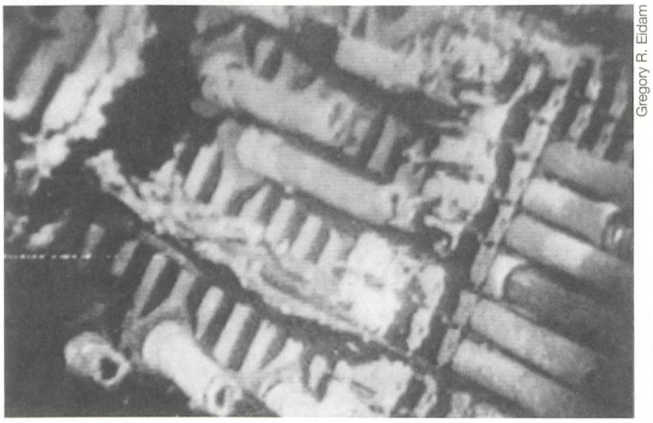


NRC

Bild 5 Schäden im Reaktor von Three Mile Island.

und da Zirkoniumoxid spröde ist, zerbrachen die Brennstäbe und fielen in den unteren Teil des Reaktorgefässes. Auch die Steuerstäbe aus einer Silberlegierung schmolzen bei rund 800 °C, womit nun das gesamte Inventar im unteren Drittel des Reaktors lag (Bild 5) [7]. Noch Monate nach dem Unfall nahmen die Experten an, dass der grösste Teil des Reaktorkerns intakt sei, da sie den Reaktor nicht inspizieren konnten. Erst 1984, als sie mit Kameras und Probebohrungen den Reaktorkern anschauten, sahen sie das wirkliche Ausmass der Zerstörung (Bild 6).

Was die Operateure aber am Morgen des 28. März viel mehr beschäftigte, war der Wasserstoff, der bei der Oxidation des Zirkoniums entstand. Dieser trat über das offene Überdruckventil aus und sammelte sich im Reaktorgebäude. Nach 9 h entzündete er sich spontan und belastete dabei den Stahlmantel des Reaktorgebäudes bis zum Auslegungsdruck – das Gebäude hielt aber glücklicherweise stand.



Gregory R. Eidam

Bild 6 Blick in den Reaktor: Hier hingen ursprünglich die Brennelemente.

Aufgrund des Unfalls in Three Mile Island sind heute Kernreaktoren mit Wasserstoffrekombinatoren ausgerüstet. Diese bilden aus Wasserstoff und Sauerstoff wieder Wasser, entweder mit einem Katalysator aus Platin oder einem Funkengenerator, der den Wasserstoff gezielt entzündet, wenn die Konzentration noch unter der Detonationsschwelle liegt. «Doch nicht nur der Unfall in Three Mile Island hat zu einigen Anpassungen bei den bestehenden Kraftwerken geführt», sagt Prasser von der ETH. «In den 1970er-Jahren begann man, die Wahrscheinlichkeit eines grösseren Unfalls mit Kernschmelze zu berechnen, und kam auf Werte in der Grössenordnung von 10^{-4} Ereignissen pro Jahr, also einer Wahrscheinlichkeit von 1:10000 bis 1:1000, dass in einem Kraftwerk während eines Betriebsjahrs eine Kernschmelze auftritt.»

Sicherheit verbessert

Daraufhin wurden vor allem die Notkühlsysteme und die Kontrollräume verbessert – so auch bei den 4 Kernkraftwerken in der Schweiz. Heute stehen pro Kraftwerk 4 unabhängige Notkühlsysteme bereit, die je 50% der Wärme abführen können beim schlimmstmöglichen Zwischenfall. Selbst wenn ein System ausfällt und ein anderes wegen Servicearbeiten ausgeschaltet ist, können die verbleibenden 2 Systeme den Reaktorkern bei einem Zwischenfall genügend kühlen. So wurde die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Schweizer Kraftwerk während eines Betriebsjahrs ein Unfall mit Kernschmelze auftritt, auf 10^{-6} bis 10^{-5} reduziert. Dies entspricht etwa 1:500000, wobei dies noch nicht heisst, dass dann radioaktive Stoffe austreten. Hierfür ist die Wahrscheinlichkeit nochmals kleiner, da zusätzliche Massnahmen getroffen wurden, um solch schwere Störfälle zu beherrschen. Ein Vergleich: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 300 m grosser Meteorit dieses Jahr bewohntes Gebiet auf der Erde trifft, beträgt 10^{-4} [8].

Auch die Kontrollräume wurden umfassend angepasst. Einerseits helfen zusätzliche Instrumente den Operatoren, gefährliche Zustände zu erkennen – wobei die wichtigen Systeme konsequent redundant ausgelegt wurden. Andererseits werden heute viele Zwischenfälle automatisch abgefangen, quasi mit einem Autopiloten für Kernkraftwerke. Denn dies zeigte sich in Three Mile Island: Der Kontrollraum war unübersichtlich, und wichtige Instrumente für grössere Zwischenfälle fehlten oder waren schlecht zugänglich. Bei einem wichtigen

Alarm erschien nicht nur eine Anzeige, sondern es ertönte zusätzlich ein akustischer Alarm, der nicht ausgeschaltet werden konnte, ohne dass auch die Anzeige verschwand. So läutete der akustische Alarm in Three Mile Island den ganzen Morgen, da die Operateure keine Informationen verlieren wollten.

Heute übernimmt die Automatik die lebenswichtigen Funktionen bei einem Zwischenfall, um den Operateur zu entlasten. Bei neuen Reaktoren wie dem EPR[5], der in Finnland gebaut wird, geht diese noch weiter. Denn bei den Reaktoren, die heute in Betrieb sind, ist nach wie vor Handarbeit gefragt, wenn sich eine Kernschmelze bei hohem Druck anbahnt, also kleine Lecks im Primärsystem den Reaktor aus dem Tritt bringen und das System bei hohem Druck gekühlt werden muss. Prasser spricht von «Bleed and Feed»: Die Operateure müssten manuell Druck ablassen, damit die Noteinspeisepumpen anspringen könnten. In Finnland übernehme dies die Automatik – was für den Operateur wieder eine längere Karenzzeit bedeute: 12 h beim EPR.

Räumliche Separation der Notsysteme

Laut Zimmermann vom PSI ist auch die räumliche Separation der Sicherheitssysteme vorbildlich im EPR. Die Notkühlsysteme mit eigenen Dieselgeneratoren sind in separaten Gebäuden nahe des Reaktors untergebracht. Wobei 2 Notsysteme stark bewehrt je auf einer Seite des Reaktorgebäudes liegen und nochmals je ein System auf jeder Seite weiter aussen in einem normalen Gebäude. So sind selbst die Notkühlsysteme vor einem Flugzeugabsturz sicher.

Damit konnte die Wahrscheinlichkeit, dass beim EPR ein Unfall mit Kernschmelze eintritt, auf $6 \cdot 10^{-7}$ verkleinert werden, also auf etwa 1:1 000 000. Dies entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass dieses Jahr ein Meteorit der Grösse zwischen 500 und 5000 m Durchmesser auf dem Festland auf der Erde aufschlägt und einen Krater von mindestens 20 km Durchmesser hinterlässt. Ausserdem ist der Reaktor so ausgelegt, dass bei einer Kernschmelze keine radioaktiven Stoffe austreten, unter anderem mit einem sogenannten Core Catcher unter dem Reaktor, der den geschmolzenen Kern auffängt. Dieser wurde unter realistischen Bedingungen getestet. Er besteht aus Keramik und verteilt die geschmolzene Masse, damit sie leichter gekühlt werden kann. Damit sich die Schmelze möglichst gut verteilt, wird das Becken aber erst nach dem Austritt aus dem Reaktorgefäss gekühlt – mit Wasser, das im Reaktorgebäude zurückbehalten wird.

Generell versuchen die Entwickler, die neuen Kraftwerke zu vereinfachen, um potenzielle Fehler zu verhindern. Heute, in den bestehenden Kraftwerken, ist beispielsweise das mit Bor versetzte Wasser, das genutzt wird, um den Reaktorkern im Notfall zu kühlen, oberhalb des Reaktors in einem Tank gelagert. Das Wasser fliesst bei einem Zwischenfall ins Reaktorgefäss, und – falls dieses ein Leck hat – unterhalb des Reaktors in den Sumpf. Sobald der Tank leer ist, schaltet die Automatik die Pumpe so um, dass sie von da an das Wasser aus dem Sumpf bezieht. Bei den zukünftigen Reaktoren wird das Wasser bereits vorher im Sumpf gelagert, womit dieses Umschalten entfällt und die Zuverlässigkeit steigt. Dies sind die Mechanismen, mit denen man die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze nochmals um einen Faktor 10 verkleinern kann.

Laut Zimmermann sei heute das Ziel, bei einem neuen Kernkraftwerk die Wahrscheinlichkeit, dass radioaktives Material austritt, so weit zu reduzieren, dass man keine Evakuierungspläne mehr aufstellen muss. Natürlich bestehe mathematisch immer ein kleines Risiko, wie Prasser betont, aber bei Wahrscheinlichkeiten kleiner als 10^{-7} pro Jahr würden schwere Störfälle anderer Energieträger grössere Risiken darstellen.

Wasser in der Pneumatik

Bleibt die Frage, warum in Three Mile Island der Kühlkreislauf ausfiel und den Unfall ins Rollen brachte? Servicemonteure reinigten einen Filter, der im Sekundärkreislauf nach der Turbine Mineralien aus dem Wasser filterte. Da sich die klebrige Masse wie schon öfters nicht lösen wollte, nutzten sie Wasser und Druckluft, um den Filter zu reinigen [9]. Dabei gelangte Wasser ins Druckluftsystem und fand den Weg bis zu den pneumatischen Ventilen, welche die Speisewasserventile steuerten. Diese Speisewasserventile schlossen sich darauf alle gleichzeitig – vermutlich durch das Wasser in der Pneumatik, was allerdings nie bewiesen werden konnte.

Dieser Zwischenfall wäre als einer von vielen kleinen Vorkommnissen in den Logbüchern untergegangen, hätten die Operateure das offene Überdruckventil nicht übersehen. Die Schweizer haben es übrigens besser gemacht: 1974 blieb das Überdruckventil beim baugleichen Reaktor in Beznau bei einer Schnellabschaltung ebenfalls offen – was die Operateure nach wenigen Minuten erkannten [1].

Referenzen

[1] John G. Kemeny: Staff reports to the President's Commission on the accident at Three Mile Island, Vol. I, Technical assessment task force, Washington D.C., 1979.
[2] Wikipedia: de.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island.
[3] Der Störfall von Harrisburg: Übersetzung des offiziellen Berichts mit Stellungnahmen von Robert Jungk und Wolfgang D. Müller, Erb Verlag, Düsseldorf 1979.
[4] Mark Stephens: Three Mile Island. Random House Verlag, New York, 1980.
[5] Guido Santner: Ab 2040 wird der Atommüll im Opalinuston endgelagert. Bulletin SEV/VSE Nr. 9/2008.
[6] Helmut Hirsch et al.: Nuclear Reactor Hazards, Greenpeace, 2005.
[7] L.M. Toth et al.: The Three Mile Island Accident, Diagnosis and Prognosis. American Chemical Society, Washington D.C., 1986.
[8] http://www.g-o.de/dossier-detail-29-10.html.
[9] Scott Johnson: Inside TMI – Minute by Minute, http://kd4dcy.net/tmi.

Links

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat: www.ensi.ch

Angaben zum Autor

Guido Santner, dipl. El.-Ing. ETH, ist Redaktor des Bulletins SEV/VSE.
Electrosuisse, 8320 Fehraltorf,
guido.santner@electrosuisse.ch

[1] Die unterschiedlichen Quellen geben leicht variierende Werte beim Druck an, im Bereich +/– 1 bar. Hier im Artikel sind die Zahlen aus [1].
[2] Ein Brennelement besteht aus mehreren Brennstäben mit Uran. In einem Druckwasserreaktor wie in Gösgen bestehen die Brennelemente aus 16×16 Brennstäben.
[3] Allerdings entsteht dabei waffenfähiges Plutonium, weshalb der Reaktor umstritten ist in der Politik.
[4] Hierbei handelt es sich laut Prasser um stark mit Sicherheitsmargen versehene Abschätzungen, die ausgehend von der praktischen Erfahrung angestellt wurden.
[5] Europäischer Druckwasserreaktor (III. Generation).

Résumé

Comment les systèmes de refroidissement d'urgence évitent la fusion du cœur

La sécurité des réacteurs nucléaires. Lorsque la plupart des centrales nucléaires commerciales fournissant encore actuellement du courant ont été mises en service au début des années 1970, elles étaient considérées comme sûres, étant déjà conçues pour résister à de graves incidents. Les experts n'avaient pas songé au fait qu'une série de petits problèmes pourrait provoquer une fusion du cœur, comme ce fut le cas à Three Mile Island en 1979. Après cet incident, les centrales nucléaires ont été rééquipées au niveau mondial. Actuellement, la probabilité d'une fusion du cœur est si mince dans les centrales existantes que même un fort tremblement de terre ne pourrait avoir de conséquences.

Und wie können wir Ihre Energieeffizienz weiter steigern?

Unsere Produkte und Lösungen für die Energietechnik der Zukunft leisten einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung unserer Umwelt. Für ABB ist es ein erklärtes Ziel, bewährte Produkte und Systeme laufend weiter zu entwickeln und die Energieeffizienz stetig zu verbessern. Mit innovativen Technologien hilft ABB ihren Kunden die Produktivit zu steigern und dabei Kosten sowie Umweltbelastungen zu reduzieren. Setzen auch Sie uns unter Strom! **www.abb.ch**

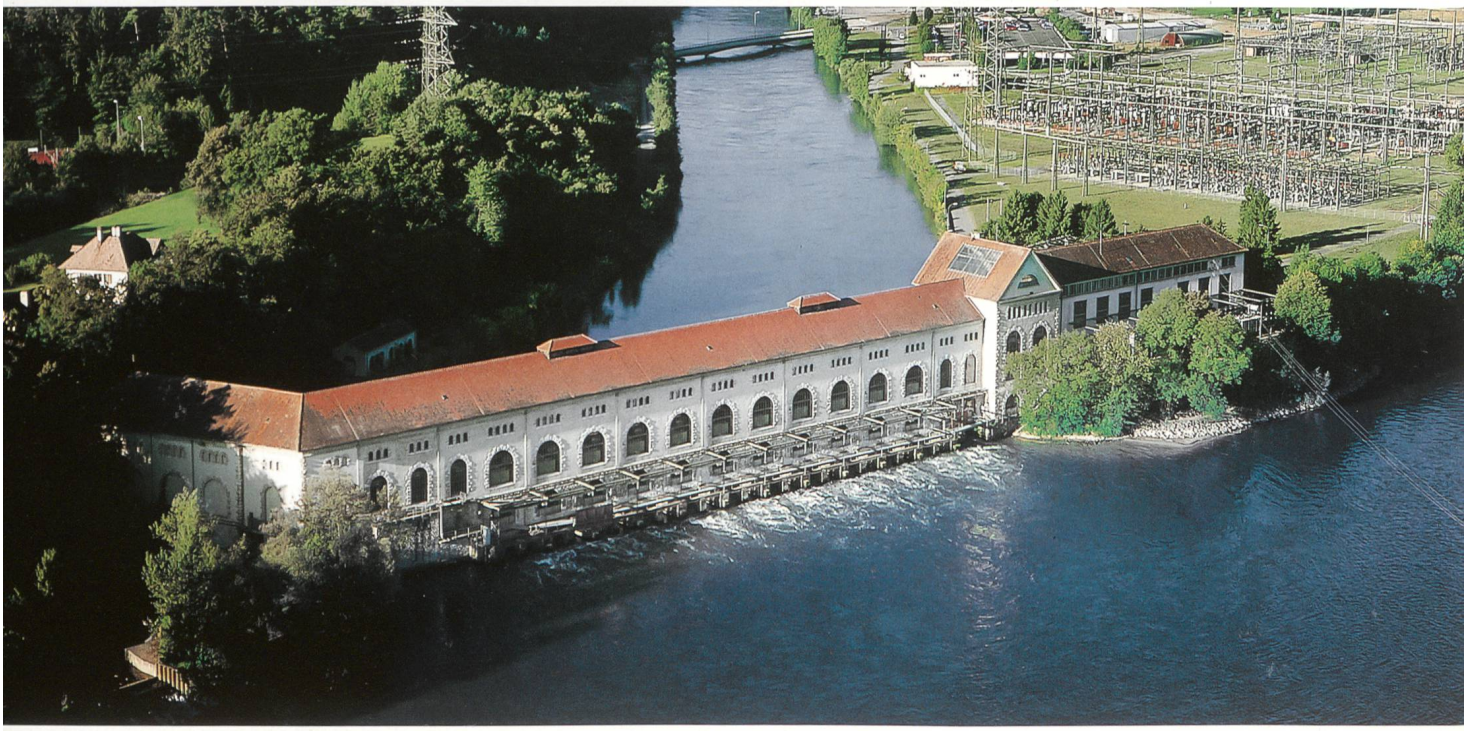


ABB Schweiz AG
Brown Boveri Strasse 6
CH-5400 Baden
Tel. +41 58 585 00 00
www.abb.ch

Power and productivity
for a better world™

ABB