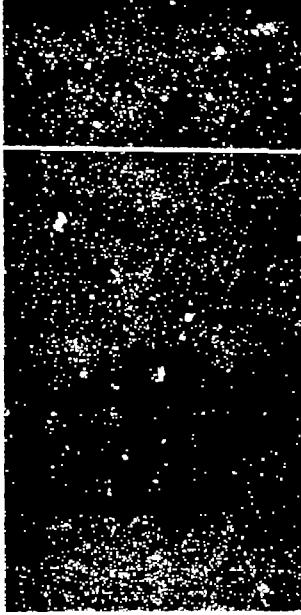


CH 8700 454

EIR-Bericht Nr. 634
Oktober 1987



EIR-Bericht Nr. 634

Oktober 1987

Sicherheitseigenschaften kleiner Heizreaktoren

W. Seifritz

Separatdruck aus «atomwirtschaft-atomtechnik»
Jahrgang XXXII, Nr. 8-9 (August-September 1987)



Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung
Institut Fédéral de Recherches en Matière de Réacteurs
Swiss Federal Institute for Reactor Research

CH-5303 Würenlingen Tel. 056 99 21 11 Telex 82 7417 eir ch

Abstract

Safety Characteristics of Small Heat Producing Reactors

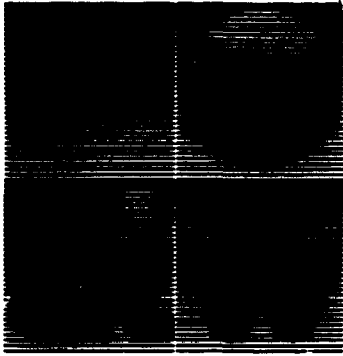
The primary objectives of protection in nuclear power plants are the possibility to shut the reactor down in case of emergency and keep it subcritical in the long run, the existence of a heat sink for post-decay heat removal in order to avoid overheating, let alone core meltdown, and the containment of radioactivity within the barriers designed for this purpose, thus preventing significant activity release. In principle, these objectives can be met in various ways, namely by active, passive or inherent technical safeguards systems. In practice, a mixture of these approaches is employed in almost all cases. What matters in the end is the assessment of the overall concept, not of some outstanding feature. Inherent characteristics are easier to achieve in small reactors. However, also in this case, inherent safety does not mean absolute safety. If inherent safety characteristics were all encompassing, they would have to include self-healing effects. However, inanimate matter is incapable of such self-organization. Consequently, inherent characteristics in nuclear technology by definition should include the increased use of dissipative processes in the thermal part of the plant.

Résumé

Propriétés de sûreté des petits réacteurs de chauffage

Les buts de protection primaires d'installations nucléaires consistent en ce que le réacteur puisse être arrêté en cas de danger et être tenu sous-critique à longue échéance, qu'il y ait un dispositif pour l'évacuation de la chaleur restante pour éviter toute surchauffe ou une fusion du coeur et enfin que la rétention de la radioactivité à l'intérieur des barrières prévues soit assurée afin d'empêcher un dégagement significatif d'activités. Ces buts peuvent être atteints, en principe, de différentes façons, à savoir par des équipements de sécurité actifs, passifs ou inhérents, en réalité presque toujours par une combinaison de ces trois principes. L'appréciation du concept en entier est en fin de compte décisive et non celle d'une caractéristique particulièrement spectaculaire. Les propriétés inhérentes de sécurité peuvent être réalisées plus facilement dans les petits réacteurs que dans les grands.

Sonderdruck aus der Zeitschrift



atomwirtschaft atomtechnik

Jahrgang XXXII, Nr. 8-9 (August-September 1987)

Dissipative Prozesse

Sicherheitseigenschaften kleiner Heizreaktoren

Von W. Seifritz, Würenlingen/Schweiz

Dissipative Prozesse

Sicherheitseigenschaften kleiner Heizreaktoren

Von W. Seifritz, Würenlingen/Schweiz

Die Sicherheitskonzeption kleiner Heizreaktoren auf Wasserbasis wird auf den Grundparametern Temperatur, Borkonzentration und Druck aufgebaut. Im sicherheitsrelevanten Störfall wird verlangt, daß die Gradienten dieser drei Parameter monoton abgebaut werden. Dies geschieht im Einzelfall auf unterschiedliche Weise. Besonderer Wert wird auf den selbständigen Ablauf von irreversiblen, dissipativen Ausgleichsvorgängen ohne Fremdenergie gelegt. Der Begriff der inhärenten Eigenschaften in der Kerntechnik sollte dadurch definiert

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. W. Seifritz, Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR), CH-5303 Würenlingen.

sein, daß durch sie dissipative Prozesse im wärmetechnischen Teil der Anlage vermehrt nutzbar gemacht werden sollen. Beschrieben wird hier insbesondere die morphologische Grundkonzeption für die Sicherheit des Schweizerischen Heizreaktors.

Schutzziele

Bei der Kernspaltung ergeben sich zwei Problemkreise: einerseits entstehen unvermeidlich radioaktive Spaltprodukte, andererseits reduziert sich die Reaktorleistung nicht ganz auf Null, wenn man die Kettenreaktion in einem Kernreaktor unterbricht. Letzterer Effekt beruht auf der Wärmeentwicklung zerfallender radioaktiver Spaltprodukte, Nachwärme genannt, die einige Prozente der Nominalleistung unmittelbar nach dem Abschalten des Reaktors beträgt und dann stetig abnimmt.

Die primären Schutzziele bestehen deshalb darin, daß im Notfall

- der Einschluß der Radioaktivität innerhalb der vorgesehenen Barrieren gesichert ist, so daß keine signifikante Aktivitätsfreisetzung stattfinden kann,
- der Reaktor abgeschaltet wird und langfristig unterkritisch gehalten werden kann und
- eine Wärmesenke für die Nachwärmeabfuhr besteht, so daß es zu keinen Überhitzungen oder gar zum Kernschmelzen kommt.

Diese Ziele lassen sich prinzipiell auf verschiedene Art erreichen: mit *aktiven*, *passiven* bzw. *inhärenten* sicherheitstechnischen Einrichtungen oder einer Mischung davon. Entscheidend ist am Ende die Beurteilung des Gesamtkonzepts und nicht jene eines besonders herausragenden Merkmals.

Was sind inhärente Eigenschaften?

Während die Begriffe „aktive“ und „passive“ Komponenten in den einschlägigen Werken (z. B. KTA-Regeln) klar definiert sind – eine Aktivkomponente ist fremdbetätigt oder fremdgesteuert, eine Passivkomponente benötigt für ihre Funktion keine Betätigung –, gibt es keine einheitlich festgelegte Definition für den Begriff „inhärente Sicherheit“.

Im deutschsprachigen Raum versteht man darunter, daß gewisse physikalische Reaktoreigenschaften, wie negative Temperatur- oder Blaskoeffizienten, inhärent sichere Reaktoreigenschaften sind, die eine Leistungsexkursion von sich aus, das heißt ohne daß Eingriffe nötig sind, „abschalten“. Der havarierte RBMK-Reaktor des Kernkraftwerks Tschernobyl war mit seinem positiven Blaskoeffizienten, also nach dieser Definition, kein inhärent sicherer Reaktor.

Über diese enge Begriffsbildung hinaus schlägt der Autor als Begriffsbestimmung für „inhärent sicher“ folgende Definition vor:

Inhärente Sicherheit bedeutet Nutzbarmachung von naturgesetzlichen Abläufen oder Mechanismen, die von selbst, das heißt ohne Zufuhr freier Energie, von einem unwahrscheinlichen in einen sicheren wahrscheinlichen Zustand ablaufen. Diese Vorgänge nennt man im Sinne Prigogine's „dissipative Prozesse“; charakteristisch ist – da sie irreversibel ablaufen – die Erzeugung von Entropie. Beispiele sind:

- Wärmeleitung (Wärme fließt von selbst nur von einer heißen zu einer kalten Stelle).
- Naturzirkulation durch Dichteunterschiede (im Gravitationsfeld bewegt sich ein geschlossener Flüssigkeitskreislauf von selbst, wenn im aufsteigenden Ast eine kleinere Dichte als im absteigenden Ast [z. B. durch die Reaktornachwärme] aufrechterhalten wird. Die Zufuhr externer freier Energie ist dazu nicht nötig).
- Diffusion durch Konzentrationsunterschiede (Konzentrationsänderungen verlaufen stets von selbst nur so, daß sich ein Partikelstrom von Stellen hoher Konzentration zu Stellen niedriger Konzentration einstellt).
- Negative Reaktivitätskoeffizienten (das Moderationsverhältnis kann im Reaktorkern so gewählt werden, daß die Reaktivität und damit die Reaktorleistung bei Temperatur- und Leistungserhöhung oder Blasenbildung von selbst abnimmt).
- Auftrieb (ist die Dichte eines Schwimmkörpers kleiner als jene der Schwimmflüssigkeit, so steigt der Schwimmkörper von selbst nach oben).
- Fall durch Gravitation (im Gravitationsfeld nimmt ein Körper von selbst jenen Ort geringster potentieller Energie ein; dieser Effekt wird z. B. auch mit dem Fail-safe-Prinzip ausgenutzt).

Die wesentliche Eigenschaft all dieser dissipativen Prozesse ist, daß sie ohne Zufuhr von Fremdenergie, genauer gesagt, ohne Zufuhr freier Energie ablaufen. Thermodynamisch und informationstheoretisch wird dabei der in der Natur wahrscheinlichere, entropiereichere Zustand selbsttätig angesteuert.

Diese Definition erklärt auch, daß man unter inhärenter Sicherheit keine hundertprozentige Sicherheit verstehen kann; sie kann mit jener Wahrscheinlichkeit versagen, mit der die sie materiell ermöglichenden passiven Komponenten selber versagen können. Beispielsweise kann eine Naturzirkulation nur so lange funktionieren, solange die (passiven) Komponenten und Gefäße, in denen sie stattfindet, intakt sind; ein anderes Beispiel ist, daß Wärme in einem Stab nur so lange weitergeleitet werden kann, solange dieser ebenfalls intakt ist.

Die Nutzbarmachung inhärenter Eigenschaften haben also zum Ziel, die Versagenswahrscheinlichkeit allein auf jene passiven Komponenten zu reduzieren, von der man erwartet, daß sie kleiner als jene der aktiven Komponenten ist. Die Tatsache, daß auch mit passiven Komponenten keine absolut 100%ige Sicherheit in dieser Welt erreichbar ist, hat z. B. der neulich

ohne erkennbaren Anlaß stattgefundenen Einsturz eines Hotels in Singapur, dessen Tragekonstruktion nur aus passiven Komponenten bestand, gezeigt.

Gelingt das Bestreben, höhere Sicherheit durch die vermehrte Nutzbarmachung dissipativer Prozesse im wärmetechnischen Teil einer Reaktoranlage zu erreichen, so kann auch das dritte Schutzziel, der gesicherte Einschluß der Radioaktivität, in der kerntechnischen Anlage leichter erfüllt werden.

Zur Sicherheit kleiner Reaktoren

Heizreaktoren, die eine sehr viel kleinere thermische Leistung als stromerzeugende Kernkraftwerke besitzen, eignen sich gut für die Berücksichtigung vermehrt inhärenter Sicherheit, schon deshalb, weil die Kostendegression für den Reaktorkern einerseits und den restlichen maschinen-, elektro- und bautechnischen Teil andererseits zugunsten des ersteren verläuft. Deshalb kann man beispielsweise im Reaktorkern eine erheblich kleinere Leistungsdichte zulassen, als im Kern großer Kernkraftwerke. Durch das größere Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis im Kernbereich kleiner Reaktoren ist es auch möglich, im Druckgefäß sehr viel mehr Wasser pro installierter Leistung unterzubringen. Zudem kann auch die Nachwärme des Reaktors in der sensiblen Wärmekapazität eines angrenzenden Wasserpools ohne Fremdenergiezufuhr deponiert werden. Eigentliche Kernnotkühlsysteme mit Dieselmotoren sind also in diesem Fall nicht nötig.

Morphologische Grundkonzeption

Bei den in der Diskussion stehenden Heizreaktorkonzepten auf Wasserbasis sind diese Prinzipien in der unterschiedlichsten Art und Weise realisiert. Eine morphologische Grundkonzeption ihrer Sicherheitsphilosophie läßt sich auf drei Grundparameter aufbauen, die im Normalbetrieb einen örtlichen Gradienten aufweisen und im sicherheitsrelevanten Störfall abgebaut werden. Zum Teil erfolgt dieser Gradientenabbau passiv/inhärent, zum Teil wird er aktiv initiiert, aber ohne Fremdenergie ausgeführt. Es sind dies folgende Parameter:

Temperatur

Da im Kern Wärme erzeugt wird, muß während des Betriebs ein Temperaturgradient von der Kernzone in die kältere Umwelt (z. B. Poolwasser) aufrechterhalten werden.

Borkonzentration

Da die Reaktivitätskontrolle einiger Heizreaktoren allein mit borsäurevergiftetem Wasser erfolgt, muß für den Fall der Reaktorabschaltung stärker vergiftetes Borwasser zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund hält man in diesen Heizreaktoren einen Konzentrationsgradienten in der Borsäurekonzentration zwischen Kernbereich (niedrige Borkonzentration) und umgebendem Poolwasserbereich (hohe Borkonzentration) aufrecht.

Druck

Da im Kernbereich Energie erzeugt und daher Kühlwasser erhitzt wird, stellt sich bei höherer Temperatur auch ein höherer Druck als in der Umgebung ein. Während des Betriebs wird dieser Druckgradient im allgemeinen durch ein Druckgefäß, in speziellen Fällen durch eine hydrostatische über dem Kernbereich stehende Wassersäule, aufrechterhalten.

Dissipative Prozesse im SHR

Im sicherheitsrelevanten Störfall verlangt die inhärente Sicherheit nun, daß diese drei Gradienten durch dissipative Prozesse monoton abgebaut werden. Auch dies wird im Einzelfall auf die unterschiedlichste Art angestrebt. Im Konzept des Schweizerischen Heizreaktors (SHR) wurde das Problem so

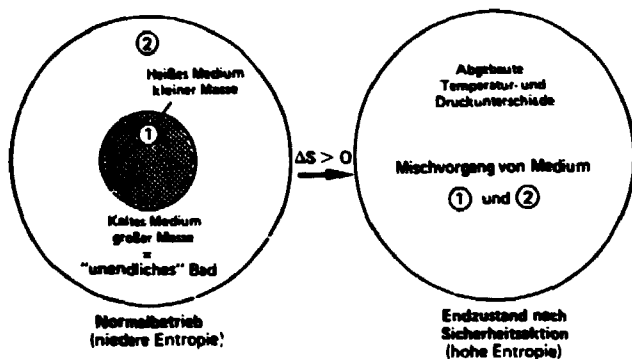


Abb. 1: Ausnutzung des entropievermehrenden Vorgangs durch Ausgleichs- bzw. Mischvorgänge ohne Fremdenergie.

Entropiemehrung findet statt, weil ein Übergang von einem thermodynamisch unwahrscheinlichen Zustand in einen wahrscheinlicheren stattfindet, der relativ kleine, aber heiße Kernbereich ist mit (1), der große aber kalte Poolwasserbereich ist mit (2) bezeichnet.

gelöst, daß im Falle einer nicht zur Verfügung stehenden normalen Wärmesenke mit je einem aktiven Informationssignal der Reaktor abgestellt und anschließend die Nachwärme im Wasserpool deponiert werden kann. Dabei ist keine Fremdenergie nötig, und die hier wichtigsten Gradienten Druck und Temperatur bauen sich selbsttätig und monoton ab. Dies wird dadurch erreicht, daß die Absorberstäbe durch Schwerkraft in den Kern fallen (redundant dazu steht ein Borsäureeinspritzsystem zur Verfügung, das ebenfalls mit gespeicherter Druckenergie arbeitet) und die Nachwärmeabfuhr in den Pool geschieht durch Naturzirkulation, also ohne Fremdenergie.

Hier ist konsequent der selbsttätige Ablauf dissipativer Prozesse mit Entropiemehrung, wie sie in der Definition der inhärenten Eigenschaften erwähnt wurden, ausgenutzt worden. In Abb. 1 wird dies nochmals morphologisch veranschaulicht: Eine im Normalbetrieb unwahrscheinliche Konfiguration verschieden großer Reservoirs, zwischen denen Temperatur-, Druck- oder Konzentrationsunterschiede bestehen, wird im sicherheitsrelevanten Störfall selbsttätig in den thermodynamisch wahrscheinlicheren Zustand ausgeglichener Gradienten durch Temperaturmischung übergeführt. Dieser Mischvorgang läuft selbsttätig ab und erzeugt Entropie. Beispielsweise ist die Entropieproduktion bei Vermischung des wenigen, aber heißen Druckgefäßwassers und seiner Nachwärme mit dem großen, aber kalten Wasserreservoir des Pools gerade proportional zur Wärmekapazität des letzteren.

Der Sinn der Nutzbarmachung dieser Prinzipien besteht natürlich darin, Heizreaktoren, die nahe an Populationszentren gebaut werden sollen, mit einem besonders hohen Grad passiver Sicherheit und radiologischer Unbedenklichkeit zu versehen.

Inhärente ist nicht absolute Sicherheit

Der Erwartungsdruck der öffentlichen Meinung im Zusammenhang mit dem Begriff „inhärenter Sicherheit“ besteht doch darin, daß darunter letzten Endes die „absolute Sicherheit“, also die völlige Eliminierung des sog. Restrisikos, möglich werden sollte. Wir haben gesehen, daß dies in dieser Rigorosität nicht möglich ist. Trotzdem ist es interessant sich einmal vorzustellen, welche inhärenten Eigenschaften vorhanden sein müßten, um absolute Sicherheit zu erreichen.

Zusammengefaßt müßten diese Eigenschaften viel weiter als die hier besprochenen inhärenten Sicherheitseigenschaften sein: Sie müßten auch Selbstheileffekte einschließen. Beispielsweise müßten sich Risse selbst verschließen oder korrodierte Rohre müßten sich chemisch selbst reduzieren können usw.

Eine solche Selbstorganisation ist aber in toter Materie nicht möglich. Nur höher organisierte Materie kann das: jedoch auch nur bei Zufuhr freier Energie: Wenn der Mensch selbst nicht zu stark verletzt wird, zeigt er aufgrund dieses Mechanismus eine ausgezeichnete inhärente Sicherheit – aber auch nur für eine endliche Zeitspanne.

Diese Betrachtungen lehren uns, daß selbstorganisierbare absolute Sicherheit auch von zur Degradation neigenden passiven Komponenten nicht möglich sein kann.

DK 621.039.576

Anhang

Zur Definition dissipativer dynamischer Systeme

Ausgehend von einem Satz Differentialgleichungen erster Ordnung der Form

$$\dot{\vec{x}} = \vec{F}(\vec{x}) \text{ mit } \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

die im vorangegangenen Artikel die erwähnten Vorgänge beschreiben sollen (wobei F durchaus eine nicht-lineare Funktion von \vec{x} sein kann), schrumpft bei einem dissipativen Prozeß ein beliebiges Volumenelement V des Phasenraumes (\vec{x}) als Funktion der Zeit zusammen. Dies bedeutet, daß

$$\frac{dV}{dt} = \int_V d^n x \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial F_i}{\partial x_i} \right) < 0 \quad (2)$$

ergibt.

Im Gegensatz dazu bleibt bei einem konservativen System das Phasenvolumen erhalten ($dV/dt = 0$).

Anschaulich ist dies in Abb. 2 gezeigt: die Trajektorien dissipativer Systeme münden in einen Fixpunkt, während die Trajektorien konservativer Systeme um einen Punkt rotieren. In der älteren Nomenklatur sprach man im Zusammenhang mit der Unterscheidung dieser Systeme auch von konservativen und nicht-konservativen Kräften. Der Ausdruck kommt daher, daß bei ersteren die (meist) mechanischen Energien erhalten bleiben (es tritt nur ein Austausch z. B. zwischen kinetischer und potentieller Energie auf), während bei letzteren eine Umwandlung in andere Energieformen (in erster Linie Reibung oder Wärme) stattfindet.

Es sind deshalb gerade die dissipativen Systeme, die wir zur Gewährleistung der sog. inhärenten Sicherheit heranziehen mit dem Ziel, daß sich im Notfall die aufgebauten Gradienten selbsttätig abbauen und die gespeicherten Energien dissipiert werden.

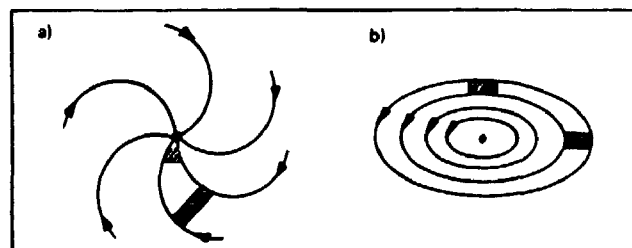


Abb. 2: Die Trajektorien konvergieren in einem dissipativen System zu einem Fixpunkt hin, wobei das Phasenvolumen schrumpft (a), während in einem konservativen System eine Rotation der Trajektorien um einen Punkt auftritt und so das Phasenvolumen erhalten bleibt (b).

Quelle: H. G. Schuster, Deterministic Chaos, Physik-Verlag, Weinheim, 1984.