

Tschernobyl und die Folgen

Autor(en): **Lang, Jürg O.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **104 (1986)**

Heft 51-52

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76338>

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.

Tschernobyl und die Folgen

Von Jürg O. Lang, Zürich

Ein halbes Jahr nach der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl sind die Ursachen dieses bislang schwersten Unfalls in der Kernenergietechnik recht genau bekannt. Um den Ablauf der Ereignisse und die Konstruktionsmängel des verwendeten Reaktortyps beschreiben zu können, werden zunächst die wichtigsten kernphysikalischen Grundlagen (Neutronenbilanz, Kritikalität, radioaktive Zerfälle) zusammengestellt. Anschliessend können die bedeutendsten Faktoren diskutiert werden, die am 26. April 1986 zu einer Reaktivitätsexkursion, zur vollständigen Zerstörung des Reaktors und schliesslich zu einer grossräumigen Verstrahlungslage geführt haben.

Zweifellos werden die Folgen dieses Unfalls, die für die UdSSR und die westeuropäischen Länder gänzlich verschieden sind, noch für lange Zeit das Handeln aller für die Energieversorgung der Zukunft Verantwortlichen massgebend beeinflussen.

Kernphysikalische Grundlagen

Um die Ursachen, die am 26. April zur Reaktorkatastrophe (vgl. Schweizer Ingenieur und Architekt 104 [1986], H. 20, S. 500) in Tschernobyl geführt haben, verstehen zu können, sind einige elementare Kenntnisse über die Vorgänge, die in einem Kernkraftwerk ablaufen, unerlässlich. Im folgenden sollen deshalb diese Grundlagen kurz dargestellt werden.

Gewisse schwere Kerne, vor allem Uran (U) und Plutonium (Pu), spalten sich in zwei (in Ausnahmefällen: in drei) Bruchstücke, nachdem sie ein Neutron eingefangen haben. Gleichzeitig werden 2 bis 3 Neutronen emittiert. Beim in der Natur häufig vorkommenden Isotop ^{238}U ist für eine solche Kernspaltung ein schnelles, hochenergetisches Neutron erforderlich, und der Prozess findet nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit statt. Hingegen kann das seltenere Isotop ^{235}U , das im natürlichen Urangemisch nur mit einer Häufigkeit von 0,72% auftritt, bereits mit langsamen thermischen Neutronen gut gespalten werden.

Die entstehenden Kernbruchstücke, die sogenannten *Spaltfragmente*, sind in der Regel nicht stabil, sondern sie zerfallen nach einiger Zeit (Sekunden bis viele Jahre), wobei sie radioaktive Strahlung emittieren. Bei dieser radioaktiven Strahlung handelt es sich um hochenergetische Elektronen (sogenannte γ -Zerfälle) oder um elektromagnetische Strahlung (sogenannte γ -Zerfälle). In einigen ganz seltenen Fällen können auch mit zeitlicher Verzögerung noch zusätzliche Neutronen produziert werden. In der Tabelle 1 sind einige typische Spaltreaktionen und radioaktive Zerfallsketten aufgeführt. Bei den radioaktiven Zerfällen wird jeweils

die Art der Strahlung (α, β, γ, n , usw.) und die Halbwertszeit, d. h. die Zeitspanne, innerhalb welcher jeweils die Hälfte der Kerne sich in ein neues Isotop umwandelt, angegeben.

Falls eines der vielen in einem Reaktor mit hoher Geschwindigkeit herumfliegenden Neutronen mit einem Kern zusammentrifft, tritt aber nicht notwendigerweise eine Kernspaltung auf. In vielen Fällen findet lediglich eine elastische Streuung statt, bei welcher das Neutron einen Teil seiner Energie verliert. Diese Tatsache wird ausgenützt, um schnelle Neutronen abzubremsen, damit sie anschliessend in ^{235}U eingefangen werden können und weitere Spaltprozesse auslösen. Materialien, die in einen Reaktor eingebracht werden, um die Energie der Neutronen zu verringern, werden als *Moderatoren* bezeichnet. Da der Energieverlust in einem einzelnen Streuprozess bei einem Stoss mit einem leichten Körper besonders gross ist, werden dazu bevorzugt leichte Elemente, wie Wasserstoff (H) oder Kohlenstoff (^{12}C) verwendet. In den Schweizer Kernkraftwerken dient gewöhnliches Wasser sowohl als Moderator wie auch als Kühlmedium, wohingegen in Tschernobyl die Uranbrennstäbe in einen Graphitblock eingebettet waren, der für die Abbremsung der Neutronen sorgte. Dieser wesentliche Konstruktionsunterschied wird für die folgenden Betrachtungen von Bedeutung sein.

Schliesslich muss noch ein dritter wichtiger Konkurrenzprozess zur Spaltung erwähnt werden: die (n, γ) -Reaktion. Dabei «verschluckt» der Kern ein Neutron, und der dabei neu entstehende Kern emittiert ein γ -Quant. Diese Einfangreaktionen sind aus zwei Gründen von Bedeutung: Zunächst einmal «verschwindet» dabei ein Neutron und steht somit für weitere Kernumwand-

lungen nicht mehr zur Verfügung. Die *Steuerstäbe* in einem Kernreaktor enthalten Elemente, wie z. B. Bor, bei denen dieser Neutroneneinfang besonders häufig auftritt; durch Einfahren solcher Steuerstäbe in den Reaktor kann somit die Anzahl Neutronen und damit die Leistung des Reaktors geregelt werden.

Die (n, γ) -Reaktionen sind aber auch wichtig, weil damit neue, zum Teil erwünschte, zum Teil aber auch unerwünschte Elemente neu erzeugt werden. So entstehen etwa (vgl. auch Tabelle 1) aus dem vergleichsweise harmlosen Kern ^{238}U durch Neutroneneinfang eine Reihe von *Plutoniumisotopen*, die besonders gut spaltbar sind und die sich, falls ein geeignetes Isotopengemisch produziert wird, für die Herstellung von vergleichsweise einfach zu fabrizierenden Atomwaffen eignen (Proliferationsgefahr!). Das Element ^{239}Pu zerfällt mit der langen Halbwertszeit von 24 000 Jahren durch α -Zerfall.

Bei einer Kernspaltung wird pro Atom ein Energiebetrag von rund 200 MeV oder $3,2 \cdot 10^{-11}$ Js frei. Da in einem der heute üblichen grossen Leistungsreaktoren typischerweise eine thermische Leistung von rund 3200 MW erzeugt wird, sind somit im Normalbetrieb rund 10^{20} Spaltreaktionen pro Sekunde erforderlich. Multiplizieren wir diese Zahl mit der Masse eines Uranatoms, so erhalten wir die Menge Uran, die pro Sekunde verbraucht wird: Sie beträgt nur 40 mg/s! Die Masse der erzeugten radioaktiven Elemente ist von der gleichen Grössenordnung. Dem Gewicht nach ist somit die Menge der radioaktiven «Abfälle» sehr klein; sie beträgt weniger als ein Millionstel der Schadstoffe aus einem gleich grossen fossil befeuerten Kraftwerk.

Damit haben wir alle Grundlagen zusammengestellt, die für das Verständnis der *Neutronenbilanz* eines Reaktors (vgl. Bild 1) erforderlich sind: Ein in einem Reaktor zufällig vorhandenes Neutron kann eine Reaktion mit spaltbarem oder mit anderem Material (Strukturelemente, Steuerstäbe, Moderator, usw.) eingehen. Je nach Art des Kerns, mit dem es zusammengetroffen ist, geht es verloren (Neutronenverluste), wird gestreut und abgebremst oder führt zu einer Spaltung. Bei einer Spaltung entstehen 2 bis 3 neue Neutronen, was eine Kettenreaktion ermöglicht.

Je nach der Wahrscheinlichkeit, mit der die verschiedenen Zweige durchlaufen werden, entstehen pro einmaliges

Durchlaufen des Zyklus verschieden viele Neutronen. Die mittlere Anzahl Neutronen pro Generation wird als Multiplikationsfaktor K bezeichnet. Falls $K=1$ ist, bleibt die Anzahl der Neutronen und damit die Leistung des Reaktors konstant (kritischer Reaktor). Ist K grösser bzw. kleiner als 1, so nimmt die Leistung zu bzw. ab (über- bzw. unterkritischer Zustand).

Beim Betrieb eines Kernreaktors muss unter allen Umständen gewährleistet sein, dass der Multiplikationsfaktor nicht aus irgendwelchen Gründen unkontrolliert anwächst. Da eine Neutronengeneration in rund einer Tausendstelsekunde durchlaufen wird, ergäbe sich eine Zunahme der Leistung um den Faktor K^{1000} pro Sekunde. Bereits bei einem Multiplikationsfaktor von «nur» 1,01 würde die Wärmeproduktion eine Sekunde später rund auf das 20 000fache ansteigen und damit unmittelbar zur Zerstörung der ganzen Anlage führen - und genau dies, eine sogenannte *unkontrollierte Reaktivitätsexkursion*, ist in Tschernobyl passiert.

Die Tatsache, dass Kernreaktoren üblicherweise dennoch sicher reguliert werden können, wird durch negative Temperaturkoeffizienten (vgl. unten) und die verzögerten Neutronen gewährleistet.

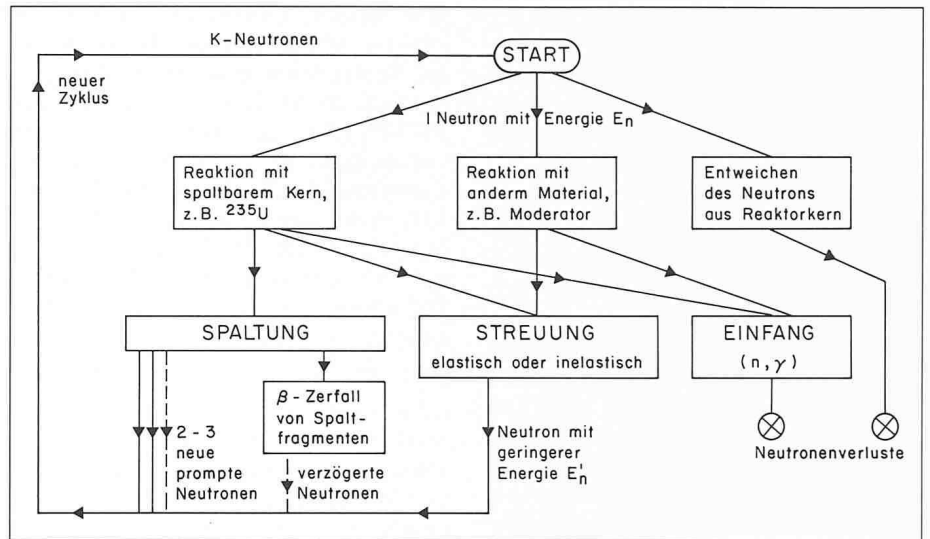


Bild 1. Neutronenbilanz in einem Kernreaktor

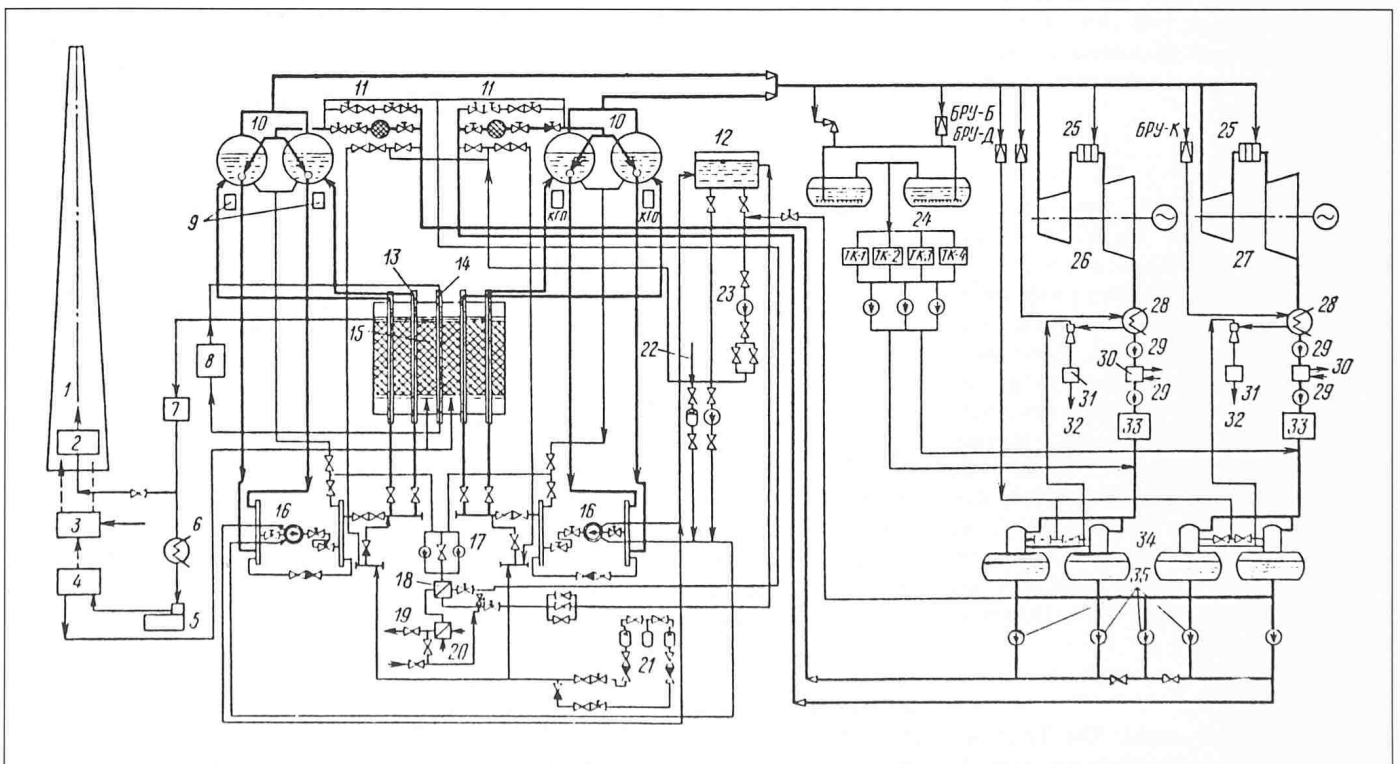
Der Unfallhergang

Die russischen Reaktoringenieure haben an einem Expertentreffen der Internationalen Atomagentur (IAEA) vom 25. bis zum 29. August 1986 in Wien über den Unfallhergang in Tschernobyl ausführlich berichtet - viel offener sogar, als dies die meisten westlichen Beobachter erwartet hatten. Die nachstehende Zusammenfassung

der Ereignisse stützt sich vor allem auf den damals zur Verfügung gestellten umfangreichen Bericht einer russischen Staatskommission [1] sowie auf verschiedene inzwischen veröffentlichte Analysen westlicher Experten [2].

Die Anlage in Tschernobyl gehört zu den grössten Kernkraftwerksparks der Welt. Sie umfasste vier grosse Leistungsreaktoren vom Typ RBMK-1000 (Bild 2); zwei weitere Einheiten waren im Bau. Jeder dieser Reaktoren läuft im

Bild 2. Prinzipschema des RBMK. 1 Abluftkamin, 2 Abgastrocknung, 3 Abgasfilter, 4 Heliumreinigung und -filter, 5 Kompressor, 6 Gaskondensator, 7 Überwachungssystem für die Dichtigkeit der Brennstoffkanäle, 8 Steuer- und Sicherheitssystem für die Reaktivitätskontrolle (Steuerstabregelung), 9 Leckdetektoren, 10 Dampf-Separatoren/Trockner; 11 Steuerventile für Dampf- und Rezirkulationssystem, 12 Wasserbehälter für das autonome Notkühlsystem SAOR, 13 Brennstoffkanäle, 14 Kontrollstabkanäle, 15 Reaktorkern, 16 Haupt-Kühlmittelpumpen, 17 Hilfskühlmittelpumpen, 18 Speiswasserreinigung; 19 Speiswasserreinigungs-Steuerung, 20 Hilfskühler, 21 Ventilsystem für das SAOR, 22 Druckluft-Vorratsbehälter, 23 Pumpen für das SAOR, 24 Turbinenbypass-System, 25 Wasserabscheider/Zwischenüberhitzer, 26 Turbogenerator I, 27 Turbogenerator II, 28 Kondensator, 29 Kondensatpumpe, 30 Kondensatreinigungsstufe, 31 Knallgaseliminierungsstufe, 32 zur Abgasstrecke, 33 Niederdruckerhitzer, 34 Entgaser, 35 Speiswasserpumpen [5] (Bild SVA)



Normalbetrieb mit einer thermischen Leistung von 3200 MW und gibt 950 MW an das elektrische Netz ab. (Zum Vergleich: Das Kernkraftwerk Leibstadt mit einer thermischen Leistung von 3138 MW ist etwa gleich gross wie ein einzelner Block RBMK-1000.)

Die vierte Einheit, der spätere Unglücksreaktor, wurde im Dezember 1983 in Betrieb genommen und hätte am 25. April 1986 für eine planmässige Wartung abgestellt werden müssen. Vorher sollte aber noch ein spezielles Experiment durchgeführt werden: Nach dem vollständigen Einfahren der Steuerstäbe und dem Abbruch der Kettenreaktion sinkt die Wärmeproduktion im Reaktor nicht sofort auf Null ab. Sie beträgt nach einer Minute noch rund 4% der ursprünglichen Leistung und sinkt erst nach Monaten auf 1 Promill. Ursache dafür sind die Spaltfragmente, die sich zunächst rasch und dann langsamer durch β -Zerfall abbauen und dabei Wärme abgeben. Diese sogenannte *Nachwärme* muss unter allen Umständen sicher abgeführt werden, da sie sonst zur Zerstörung des Reaktorkerns führen kann.

Die notwendige Leistung für das Kühlsystem wird im allgemeinen dem elektrischen Netz entnommen oder bei dessen Ausfall von Notstrom-Dieselaggregaten geliefert. Wegen der besondern Konstruktion der RBMK-1000-Reaktoren (geringe Wärmekapazität der einzelnen Druckrohre) muss die Kühlleistung innert weniger Sekunden, möglicherweise vor dem Anspringen der Notstrom-Dieselaggregate, zur Verfügung stehen. Deshalb sollte in einem Experiment bei erniedrigter Reaktorleistung überprüft werden, ob die kinetische Energie eines auslaufenden Generators die Stromversorgung kurzzeitig übernehmen kann.

25. April 1986

Am 25. April, 01.00 h, wird die Leistung des Reaktors langsam auf die Hälfte [1600 MW (th)] reduziert, um 13.05 h die eine der beiden Turbogeneratorgruppen ausgeschaltet und um 14.00 h das Notkühlssystem abgetrennt. In diesem Moment aber verlangt die Netzleitstelle in Kiew unerwarteterweise, dass weiter Strom ans Netz abgegeben wird. Trotz abgeschaltetem Notkühlssystem (!) wird der Betrieb des Kraftwerkes viele Stunden, bis um 23.10 h, fortgesetzt. Erst dann darf die Leistung weiter auf den vorgesehenen Wert von 700 bis 1000 MW (th) reduziert werden.

26. April 1986

Dies gelingt aber nicht: Die Leistung fällt viel weiter, nämlich auf nur 30

MW zurück, und es gelingt nur mit grösster Mühe, mittels Handregelung der Neutronenproduktion, die Leistung bis zum 26. April, 01.00 h, wieder auf 200 MW (th) zu vergrössern. Der Grund dafür ist die sogenannte *Xenon-Vergiftung* des Reaktorkerns, die etwa 10 h nach einer Leistungsreduktion ein Maximum erreicht. Dabei handelt es sich um das folgende, wohlbekanntes Phänomen: Bei der Spaltung wird unter anderem direkt oder über den Umweg über das Isotop ^{135}I (Halbwertszeit 6,6 h) der Kern ^{135}Xe erzeugt, der mit einer Halbwertszeit von 9,1 h weiter zerfällt. ^{135}Xe ist einer der grössten «Neutronenfresser», die bekannt sind: Der Wirkungsquerschnitt für den Einfang von Neutronen ist etwa eine Million mal grösser als jener der meisten andern Elemente. Um die Neutronenverluste zu kompensieren, wurden nun fast alle Steuerstäbe vollständig aus dem Reaktorkern herausgezogen. Der Reaktor gerät damit in einen hochgradig instabilen, verbotenen Zustand. Trotzdem, und obwohl die Leistung nur 200 MW anstatt der geplanten 700 bis 1000 MW beträgt, wird das Experiment fortgesetzt.

Die Verhältnisse entwickeln sich nun sehr schnell zu einer Katastrophe:

01 h 03 m

Zwei weitere Reservehauptkühlpumpen werden zugeschaltet. Damit die entstehenden thermohydraulischen Instabilitäten nicht zu einem automatischen Abschalten des Reaktors führen, werden die entsprechenden Reaktor-schutzregelungen ausser Betrieb gesetzt. Der Reaktorkern wird von kaltem Wasser durchflutet.

01 h 22 m

Ein letzter Kontrolloutput des Überwachungssystems zeigt dem Schichtleiter, dass er den Reaktor sofort abschalten müsste – er tut es aber nicht.

01 h 23 m 04 s

Das eigentliche Experiment beginnt: Die Einlassventile zur Turbine werden geschlossen, und der Rotorauslauf beginnt. Erneut werden Reaktorabschalt-signale grob fahrlässig überbrückt.

04 h 23 m 21 s

Damit erwärmt sich das Wasser im Reaktor, es kommt zur Bildung von Dampfblasen.

Hier muss eine weitere Besonderheit des graphitmoderierten Reaktors RBMK-1000 erwähnt werden: In mit Leichtwasser moderierten Reaktoren, wie sie in der Schweiz verwendet werden, führt die Bildung von Dampfblasen dazu, dass die Abbremsung von

Neutronen verringert wird und damit die Reaktorleistung von selbst absinkt (inhärente Stabilität). Beim Typ RBMK-1000 führt hingegen der *positive Dampfblasenkoeffizient* (engl. «void coefficient») dazu, dass bei einer Leistungserhöhung im Wasser-Dampf-Gemisch weniger Neutronen absorbiert werden. Diese positive Rückkoppelung führt nun zu einem Teufelskreis, aus dem nicht mehr ausgebrochen werden kann:

01 h 23 m 25 s

Die Reaktorleistung steigt. Die erzeugte Wärme produziert mehr Dampf. Damit steigt die Leistung noch mehr an. Und es wird noch mehr Dampf produziert ...

01 h 23 m 40 s

Der Operator betätigt jetzt den ominösen Abschaltknopf AZ-5, der alle Steuerstäbe in den Reaktor einfahren sollte (Bild 3). Diese sind aber vollständig ausgefahren und bewegen sich nur mit der beklemmend langsamen Geschwindigkeit von 0,4 m/s. Es würde volle 6 s dauern, bis sie ihre grösste Wirkung zeigen.

01 h 23 m 42 s

Inzwischen ist die Leistung aber bereits auf 530 MW angestiegen.

01 h 23 m 44 s

Wegen des positiven Dampfblasenkoeffizienten und weil die immense Neutronenproduktion jetzt auch die Xenon-Vergiftung abbaut, gerät der Reaktor sogar in den prompt überkritischen Zustand: Selbst ohne die verzögerten Neutronen steigt der Multiplikationsfaktor K auf Werte wesentlich über 1. Die Leistung steigt auf das Hundertfache an. Damit werden Brennstofftemperaturen von gegen 3000° C erreicht. Ein grosser Teil des Wassers wird augenblicklich verdampft (Dampfexplosion). Die 1000 t schwere Abdeckplatte des Reaktors wird weggerissen (mit den Steuerstäben?) und der Oberteil des Reaktor-gebäudes total zerstört.

Ungefähr 01 h 24 m

Aussenstehende Beobachter bemerken ein Feuerwerk glühender Teile (unter anderem mindestens 200 t Graphit), die aus dem zerstörten Reaktorblock geschleudert werden. Es findet noch eine zweite Explosion statt. (Die Meinungen der Experten sind geteilt, ob es sich dabei um eine zweite nukleare Exkursion oder eine chemische Knallgasexplosion gehandelt hat.)

Die Ursachen des Unfalls

Die Gründe, die zu diesem bisher bei weitem schwerwiegendsten Unfall in der Geschichte ziviler Reaktoren geführt haben, können grob in drei Gruppen eingeteilt werden:

Die russischen Behörden haben sofort auf «menschliches Versagen» hingewiesen und *Fehler der Betriebsmannschaft* als Hauptursache für den Unfall genannt. In der Tat findet man in den 24 Stunden, die der Leistungsexkursion vorangingen, eine unglaubliche Reihe von krassen Verletzungen der Betriebsvorschriften, die bei unserer Beschreibung des Unfallablaufs nur zum Teil genannt worden sind. Dazu gehören zum Beispiel: der Betrieb des Reaktors mit zu weit aus dem Kern herausgezogenen Steuerstäben, so dass eine Schnellabschaltung nicht mehr zeitgerecht möglich war; das Ausschalten der Steuersysteme für die lokale Leistungsregelung; der Betrieb des Reaktors ohne Notkühlsystem während vieler Stunden; und vor allem das wiederholte Blockieren von essentiellen automatischen Sicherheitssystemen.

Schwerer als dieses Fehlverhalten einzelner Personen wiegen aber wohl die zutage getretenen *organisatorischen Mängel*: Nicht nur was das oben besprochene Turbinenauslaufexperiment äusserst unsorgfältig vorbereitet und von keiner Kontrollbehörde genehmigt worden, sondern es zeigte sich auch, dass die anwesenden Schichtleiter, wohl wegen mangelhafter Ausbildung, die Gefährlichkeit des Reaktorsystems überhaupt nicht richtig einzuschätzen in der Lage waren. Dass ein betrunkenen Automobilist sich über alle vernünftigen Betriebsvorschriften und Regelungen hinwegsetzt, daran hat man sich (leider) gewöhnt; bei einer Anlage mit einem Gefährdungspotential, wie sie einem Reaktor von 3200 MW (th) innewohnt, muss man hingegen verlangen können, dass automatische Steuersysteme unvernünftige Manipulationen abfangen und dass durch geeignete technische oder organisatorische Massnahmen gewährleistet wird, dass diese nicht willkürlich blockiert und ausser Betrieb gesetzt werden können.

Die Hauptursache für den Unfall sind aber nach der einhelligen Meinung fast aller westlichen Experten *Konstruktionsmängel* der RBMK-Reaktoren. Bereits genannt wurde der fatale *positive Dampfblasenkoeffizient*. Dieser äusserst schwerwiegende Mangel hätte durch eine etwas höhere Anreicherung der Brennelemente mit ^{235}U (2,4% anstatt 1,9%) behoben werden können – allerdings unter Inkaufnahme gering-

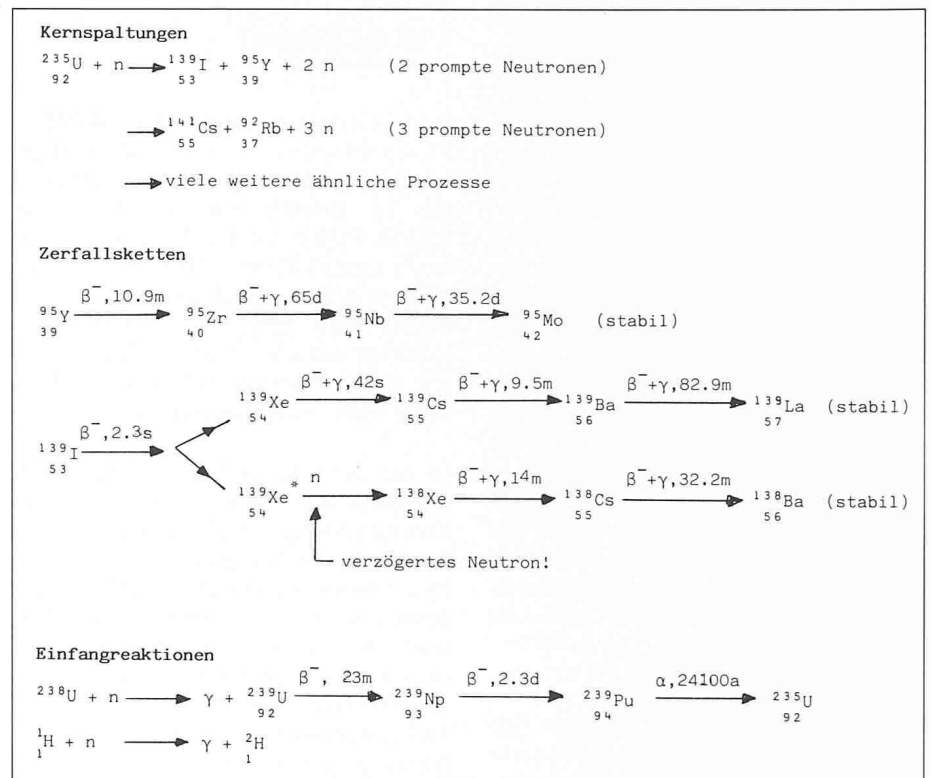


Tabelle 1. Beispiele von Kernreaktionen, die in einem Reaktor ablaufen

für höherer Betriebskosten. Ferner muss die *generelle Instabilität* dieses Reaktortyps hervorgehoben werden, der ein aussergewöhnlich komplexes Regelsystem benötigt, damit lokale Leistungsexkursionen verhindert werden. Und schliesslich muss auf das *Fehlen eines Containments*, einer druckfesten Hülle, die den ganzen Reaktor einschliesst, hingewiesen werden. (Beim Unfall in Three Mile Islands am 28. März 1979 war es diese Sicherheitsbarriere, die den Austritt radioaktiver Substanzen in die Biosphäre verhindert hat.)

Zweifellos war die Gefährlichkeit der RBMK-Systeme den russischen Reaktoringenieuren bekannt – eine englische Expertengruppe hat schon 1976 auf diese Konstruktionsmängel hingewiesen. Es kann nur vermutet werden, weshalb in Russland diese Reaktorlinie trotzdem beibehalten wurde: Die Anlagen können, falls einzelne Brennelemente in rascher Folge ausgewechselt werden, auch zur Produktion von waffenfähigem Plutonium verwendet werden; der Aufbau eines Reaktors mit Brennelementen, die in einzelnen Druckrohren (beim Typ RBMK-1000 sind es deren 1680) gekühlt werden, ist technisch einfacher als der Bau eines grossen Druckkessels; der modulare Aufbau und der Verzicht auf scheinbar überflüssige Sicherheitssysteme, z. B. ein redundantes Schnellabschaltssystem, erlaubt eine billigere Serienproduktion.

Der Kampf gegen die radioaktive Verstrahlung

In der nächsten Phase ging es darum, das Austreten radioaktiver Materialien (Spaltfragmente, Transurane wie Pu usw.) so weit als möglich zu verhindern. Leider ist dies nicht gelungen; die Massnahmen, die den Schaden begrenzen sollen, sind noch heute im Gange.

Bis zum frühen Morgen des 26. April konnten in einer heroischen Anstrengung zunächst die Feuer auf den benachbarten Gebäudeteilen, die von den herausgeschleuderten Reaktorteilen entfacht wurden, gelöscht werden. Eine Reihe von Feuerwehrleuten hat diesen Einsatz mit dem Tod (Strahlungsdosen über 400 rem) oder mit einer schweren Strahlenkrankheit (Dosis >100 rem) bezahlt.

Durch die Zerstörung des Reaktors wurde zwar die Kettenreaktion gestoppt. Die Nachwärmeproduktion betrug aber immer noch mehrere MW. Dazu liefen exotherme chemische Reaktionen ab, u. a. sind etwa 250 t Moderator-Graphit verbrannt. Der primäre Kühlkreislauf war so schwer beschädigt worden, dass sich eine Einspeisung von Notkühlwasser als wirkungslos erwies. Damit bestand die Gefahr, dass weitere Teile der Brennstoffelemente abgedampft würden und sich vielleicht sogar in der Schmelze wieder eine kritische Masse bilden könnte. Das Problem wurde dann gelöst, indem aus Militär-

helikoptern insgesamt 5000 t Bor (ein sehr wirksamer Neutronenabsorber), Blei, Dolomit und Sand auf den beschädigten Reaktor abgeworfen wurden und die Einheit von unten mit Stickstoff gekühlt wurde.

Das Bild 3 zeigt, dass wegen der Abwärme die Abgabe von radioaktiven Substanzen nach dem 1. Mai wieder zunahm und erst 10 Tage nach dem Unfall reduziert werden konnte. Insgesamt sind etwa 50 MCi (bezogen auf den 6. Mai 1986) radioaktive Stoffe aus dem Reaktor entwichen. Praktisch alle radioaktiven Edelgase (Kr, Xe), etwa 10 bis 30% der leichtflüchtigen Stoffe (insbesondere I und das Isotop ^{137}Cs mit einer Halbwertsdauer von rund 30 Jahren) sowie rund 3% der schwerflüchtigen Verbindungen (z. B. Pu) sind in die Atmosphäre gelangt.

Einen Hinweis auf die Grösse der Verstrahlung gibt das Bild 4. In der benachbarten Stadt Pripjat stieg die Dosisrate einige Tage nach dem Unfall auf 1 R/h, aber selbst im 140 km entfernten Kiew betragen die Messwerte Anfang Mai immer noch 0,5 bis 0,8 mR/h. Aus einer Zone mit einem Radius von etwa 30 km mussten in kürzester Zeit insgesamt 135 000 Personen evakuiert werden. (Die Tatsache, dass unter diesen Umständen in den Blöcken 1 und 2 die Stromproduktion erst am 27. April eingestellt wurde, ist für westliche Beobachter nahezu unfassbar.) Wie und mit welchen Hilfskräften das Gebiet um Tschernobyl dekontaminiert werden soll (Abtragen von 10 cm Erde?) ist noch unklar. Ungewiss sind auch noch die Gesamtdosen, direkt und durch Inkorporation radioaktiver Lebensmittel, die die Bevölkerung der UdSSR aufgenommen hat.

Und die Folgen?

Der Generalsekretär der KPdSU, M. Gorbatschow, hat keinen Zweifel gelassen, dass die russischen Kernreaktoren in Betrieb bleiben. Auch die RBMK-Typen. Und selbst dann, wenn sie in unmittelbarer Nähe einer Grossstadt wie Leningrad aufgestellt sind. Bisher sind einzig die Betriebsvorschriften geändert worden. Im Gegenteil, die Kernenergie soll in der UdSSR zügig weiter ausgebaut werden.

In der Schweiz und in anderen westeuropäischen Ländern steht die Bevölkerung ebenfalls noch stark unter dem Eindruck der Ereignisse in Tschernobyl, obwohl die Dosen, denen wir ausgesetzt waren, glücklicherweise klein sind (Durchschnittswerte um 20 mrem, in den am stärksten betroffenen Gebieten 200 mrem). Die Belastung durch die Tschernobyl-Verstrahlung ist somit geringer als die örtlichen Schwankungen der natürlichen Radioaktivität (200 bis 600 mrem/Jahr).

Sorgfältige Rechnungen (stochastische Risikoanalysen) und die Erfahrung aus vielen hundert Reaktorbetriebsjahren zeigen ferner, dass die Wahrscheinlichkeit, von einem Unfall in einem westlichen Reaktor betroffen zu werden, ausserordentlich gering ist. Sie ist von der gleichen Grössenordnung wie die, durch den Absturz eines Meteors einen Schaden zu erleiden! (Detaillierte Angaben über diese Risiken finden sich z. B. in [3].) Trotzdem wird die Gefährdung durch Kernkraftwerke von weiten Kreisen unserer Bevölkerung offensichtlich ganz anders empfunden.

Dazu kommt noch, dass die viel grösseren Risiken, mit denen andere Energie-

technologien bereits im sogenannten Normalbetrieb verknüpft sind, völlig falsch eingeschätzt werden. Sogar das vielgepriesene Energiesparen kann durchaus dazu führen, dass die Menge von kanzerogenen Substanzen, denen wir ausgesetzt sind, nicht ab-, sondern im Gegenteil zunimmt (z. B. Radon-Problem bei besser isolierten Häusern), vgl. H. 4/85/76, H. 20/85/494. Und noch viel mehr wird das fast unlösbare Problem, das wegen des steigenden CO_2 -Gehalts unserer Atmosphäre entsteht, vollständig verdrängt.

Ein vernünftiges politisches Handeln müsste sich zweifellos auf einen kritischen Vergleich [4] aller Risiken abstützen – seit Tschernobyl sind wir davon aber leider weiter entfernt denn je.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. J. Lang, Institut für Mittelenergiephysik, ETH Hönghenberg, 8093 Zürich.

Literatur

- [1] USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy. The Accident at the Chernobyl' Nuclear Power Plant and its Consequences. Part I, II with annexes 1-7. Working Document for the Post-Accident Review Meeting, August 1986.
- [2] H. Fuchs, H. Zünd, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG. Tschernobyl-KKW: Ergebnis aus dem IAEA-Seminar. Bundesamt für Energiewirtschaft, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. Information vom IAEA-Expertentreffen 25.-29. August 1986 über den Unfall im KKW-Tschernobyl. L. Gillon, Université Louvain. Rapport sur le déroulement de l'accident nucléaire à Tschernobyl-URSS. M. M. Todorovich, Exec. Director SE2, Vortragsveranstaltungen in der Schweiz 6./7. Oktober 1986 über «A Comparison of Nuclear Power Technologies and Practices in the United States and in the Union of Soviet Socialist Republics».
- [3] USAEC, Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, 1974.
- [4] Vgl. z. B. American Medical Association, Council of Scientific Affairs, 1978.

Bild 3. Zeitlicher Verlauf der täglichen Radioaktivitätsabgabe aus dem Unfallreaktor ($1 \text{ MCi} = 3,7 \cdot 10^{16} \text{ Bq}$). Die Aktivitäten sind auf den Stichtag 6. Mai 1986 bezogen

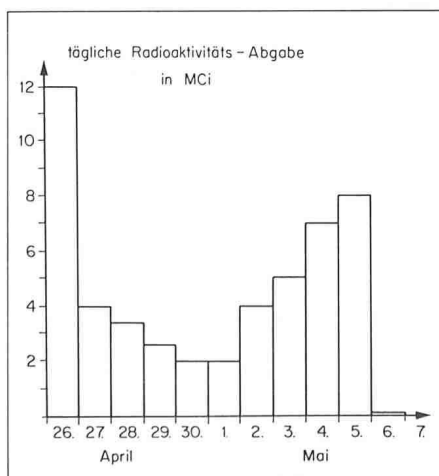
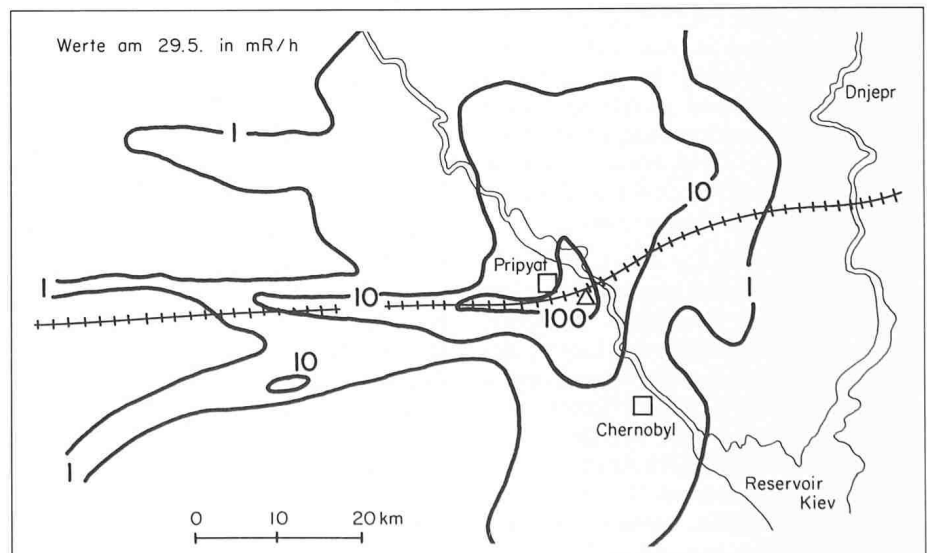


Bild 4. Verstrahlung im Raum Tschernobyl. Die Ionendosisleistung ist für den 29. Mai 1986 angegeben



Einheiten für Radioaktivität, Dosis und Aequivalentdosis

Faustregel: γ -Quellenaktivität:
1 Ci Mensch in 1 m Entfernung: 1 rem/h

Aequivalentdosis aus natürlichem Untergrund:
0, 1-0,2 rem/Jahr (Schweiz)

Quelle: Institut für Mittelenergiephysik der ETH Zürich

Grösse	Anwendung auf	Basiseinheit	Einheiten	Umrechnungen
Aktivität	Radioakt. Quelle	Zerfälle pro sec [s ⁻¹]	alt: Curie (Ci) neu: Bequerel (Bq)	1 Bq = 1 s ⁻¹ 1 Ci = 3.7 · 10 ¹⁰ Bq
Energiedosis	Material	Energie pro kg [J · kg ⁻¹]	alt: rad neu: Gray (Gy)	1 Gy = 1 J · kg ⁻¹ = 100 rad
Energiedosisleistung		Energie pro kg und sec [W · kg ⁻¹]	alt: rad · h ⁻¹ neu: Gray · h ⁻¹	
Aequivalentdosis (Biologische Dosis)	Mensch	Energie pro kg x «Schädigungsfaktor» (abhängig vom Strahlentyp. γ -Strahlung:1) [J · kg ⁻¹]	alt: rem neu: Sievert (SV)	1 SV = 1 J · kg ⁻¹ = 100 rem
Aequivalentdosisleistung		[W · kg ⁻¹]	alt: rem · h ⁻¹ neu: Sievert · h ⁻¹	
Ionendosis	Messinstrument	Ladung pro kg [As · kg ⁻¹]	alt: Röntgen (R) neu: keine	1 As · kg ⁻¹ = 3.876 · 10 ³ R 1 A · kg ⁻¹ = 1.39 · 10 ⁷ R · h ⁻¹
Ionendosisleistung		[A · kg ⁻¹]		

Auswirkungen von Tschernobyl auf die Schweiz

Informationsschrift der EIR-Schule für Strahlenschutz

Die klar dargestellte Information fasst die in unserem Land gemessenen Auswirkungen des Reaktorunfalls von Tschernobyl übersichtlich zusammen und zeigt die verschiedenen Einwirkungsarten.

Das Wesen der Radiaktivität und der Strahlung ist leichtfasslich erklärt, und die Definitionen der Einflussgrössen und der verwendeten Einheiten sind in graphischen Darstellungen und anhand von Vergleichen erläutert.

Verfrachtung mit der Luftmasse

Die Luftmassen, die sich während des Austrittes radioaktiver Stoffe über Tschernobyl befanden, wurden entsprechend den wechselnden Windverhältnissen mehr oder weniger schnell in eine bestimmte Richtung verfrachtet (Bild 1 und Tabelle 1).

Über Skandinavien wurden erste «abnormale» Werte am 27.4. um 01.30 Uhr festgestellt, am 28.4. Maximalwerte von etwa der zehnfachen natürlichen Dosisleistung.

In der Schweiz wurden die ersten Anzeichen erhöhter Radioaktivität am 30.4. wie folgt gemessen:

- Um 10 Uhr beim EIR und beim KKW Leibstadt eine etwa dreifache natürliche Dosisleistung;

- Um 12.30 Uhr bei der Meteorologische Anstalt Zürich eine etwa dreifache natürliche Dosisleistung;
- Um 13.30 Uhr auf dem Weissfluhjoch-Davos eine etwa zehnfache natürliche Dosisleistung.

Auf dem Boden konnte noch kein Niederschlag radioaktiver Stoffe festgestellt werden.

Natürliche Bestrahlung

Die natürliche Bestrahlung ist von einer Landesgegend zur andern verschieden (Bild 2), sie hängt ab von:

- der Höhe über Meer,
- dem Gehalt an radioaktiven Substanzen im Boden und in den Baumaterialien,

- dem Radonaustritt aus dem Erdboden in Gebäuden,
- der Rückhaltung von Radon und Zerfallsprodukten in Gebäuden (vgl. Schweizer Ingenieur und Architekt 102 (1984) H. 4, S. 45),
- dem Gehalt an radioaktiven Stoffen in Nahrung und Wasser.

Zur natürlichen Strahlenexposition tritt die künstliche Strahlenexposition hinzu, die im Bild 3 dargestellt ist. Bei der medizinischen Bestrahlung ist nur die durchschnittliche Exposition durch die Röntgen-Diagnostik berücksichtigt, nicht aber jene durch Strahlentherapie, der sich nur sehr wenige Menschen aussetzen müssen.

Zusätzliche Bestrahlung

Mit den einsetzenden Regenfällen stieg im unteren Aaretal (Würenlingen) vom 30.4., 12 Uhr, bis 1.5. früh die Dosisleistung auf rund das Vierfache der natürlichen Dosisleistung. Bei den nachfolgenden starken Regenfällen mit entsprechenden Ablagerungen traten in der Bodenseeregion am 1.5. Werte bis zum Zehnfachen der natürlichen Dosisleistung auf, im Mendrisiotto am 3.5. bis zum 15fachen der natürlichen Dosisleistung.

Jod-131

Während der ersten Tage nach dem Reaktorunfall war die zusätzliche Be-