

Der Unfall – Hergang und Erklärungen

Wie konnte es zu dem Unfall in Tschernobyl kommen?

Kurt Kugeler, Inga Maren Tragsdorf und Nathalie Pöppe

Inzwischen ist es möglich, das Unfallgeschehen im Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl recht detailliert zu rekonstruieren. Zur Katastrophe führte ein Experiment, das in der Nacht vom 25. auf den 26. April 1986 im Rahmen von Wartungsarbeiten durchgeführt wurde. Konstruktionsbedingt und aufgrund von Bedienungsfehlern führte dabei eine positive Rückkopplung zu einer explosionsartigen Leistungszunahme und der anschließenden Zerstörung des Reaktors.

Bei dem Kernkraftwerk in Tschernobyl handelte es sich um einen Kraftwerkstyp, der nur in der UdSSR und in Litauen gebaut worden ist, genauer um einen sog. RBMK-1000-Reaktor. Die „1000“ steht dabei für die elektrische Leistung von 1000 Megawatt. Nach umfangreichen Umrüstungen sind in Russland, Litauen und in der Ukraine heute noch 15 große Anlagen dieses Typs mit zusammen 16000 MW elektrischer Leistung in Betrieb. Im Prinzip ist der RBMK ein spezieller Siedewasserreaktor, also ein Reaktor mit einem direkten Kreislauf zwischen Reaktor und Turbine. Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Siedewasserreaktor, bei dem normales (leichtes) Wasser sowohl als Moderator als auch als Kühlmittel verwendet wird, benutzt der RBMK aber zwei Moderatoren – Wasser und Grafit. Bei diesem System sind die Brennstäbe mit schwach angereichertem Uranradioxid in wasserdampfgekühlten Druckröhren angeordnet. Viele dieser Druckröhren bilden den Reaktorkern (Core) eines RBMK. Grafitblöcke zwischen den einzelnen Druckröhren ermöglichen die neutronenphysikalische Kopplung zwischen diesen. Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass große Core-Abmessungen – mehr als 12 m Durchmesser – und damit große Reaktorleistungen ohne Druckbehälter möglich sind. Weiterhin lassen sich einzelne Druckröhren bei vollem Betrieb der Anlage be- und entladen. Hierdurch konnte früher bei sehr niedrigen Abbränden Plutonium mit sehr hohem ^{239}Pu -Gehalt erzeugt werden. Dies war wohl auch ursprünglich ein wichtiger Aspekt



Abb. 1: Der Blick aus der Luft offenbarte das gesamte Ausmaß der Zerstörung beim Unfall von Tschernobyl. Das Dach der Reaktorhalle wurde vollständig zerstört. Der tagelange Grafitbrand riss radioaktive Partikel mit in die Atmosphäre. (Quelle: <http://new.chnpp.gov.ua>)

für die militärische Nutzung dieser Reaktoren [1].

Ausgelöst durch verschiedene Fehler bei der Durchführung eines Experiments am Turbinengenerator kam es zu einem starken Anstieg der Leistung, dem eine Kernexplosion und schließlich eine Kernschmelze folgte. Zur völligen Zerstörung der Anlage (Abb. 1) trug

KOMPAKT

- ▶ Konstruktionsbedingt führte beim Tschernobyl-Reaktor die Verdampfung von Kühlwasser bei geringer Reaktorleistung zu einem positiven Beitrag in der Neutronenbilanz.
- ▶ Dadurch wurde der Reaktor im Rahmen eines Experiments unbeabsichtigt in einen überkritischen und unkontrollierbaren Zustand gebracht.
- ▶ Die Leistung stieg binnen Sekunden auf das 100-fache der Nennleistung an.
- ▶ Nach der anschließenden Kernschmelze entstanden große Mengen an Wasserstoff, der explodierte und das Reaktorgebäude völlig zerstörte.

in großem Maße auch die Bildung und Explosion großer Mengen an Wasserstoff bei [2, 3]. Dabei wurde sehr viel Radioaktivität freigesetzt und sowohl in der UdSSR abgelagert als auch, verstärkt durch einen Brand des Grafits und damit durch starken Auftrieb in die Atmosphäre, über weite Teile Europas verteilt. Noch heute leiden viele Gebiete der ehemaligen UdSSR unter den radiologischen Folgen des Unfalls. Nach Beendigung der akuten Unfallphase schloss man die Anlage in einem „Sarkophag“ aus Beton notdürftig ein. Ein verbesserter Sarkophag wird bald für einen sicheren Einschluss des Reaktors sorgen müssen.

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kugeler, Dr.-Ing. Inga Maren Tragsdorf, Dipl.-Phys. Nathalie Pöppe, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik, RWTH Aachen, 52056 Aachen

Die Analyse des Unfallhergangs zeigte, dass er durch eine ganze Reihe von Verstößen gegen die Grundsätze der Reaktorsicherheit – Konstruktionsfehler, Bedienungsfehler und Verletzungen von Betriebsvorschriften – verursacht wurde. Bei einem kommerziellen Leichtwasserreaktor oder bei einem gasgekühlten Reaktor wäre solch ein Unfall nicht möglich. Dennoch rückte das Risiko einer starken Freisetzung an Radioaktivität sowie einer radioaktiven Kontamination großer Landflächen ins allgemeine Bewusstsein, und die generelle Bedeutung eines Restrisikos der Kernenergienutzung wurde jedem unmittelbar deutlich. Viele Länder verzögerten daraufhin Ausbauplanungen für Kernkraftwerke oder stoppten sie sogar ganz. Der in Deutschland gefasste Ausstiegsbeschluss sieht vor, die in Betrieb befindlichen Leichtwasserreaktoren nach Ablauf von etwa 20 weiteren Jahren abzuschalten.

Beschreibung der Anlage

In Tschernobyl waren 1986 vier Reaktoren vom RBMK-Typ in Betrieb, zwei weitere befanden sich im Bau. Block 4, in dem sich der Unfall ereignete, war 1984 in Betrieb gegangen. Block 3 und 4 waren als Doppelblockanlage ausgeführt, d. h. die Reaktorgebäude mit dem gemeinsamen Hilfsanlagegebäude bildeten einen Gebäudekomplex. Die vier Blöcke teilten sich ein gemeinsames Maschinenhaus mit acht Turbosätzen. Jeder Block verfügte über eine thermische Leistung von 3200 MW sowie eine elektrische Leistung von 1000 MW. Die charakteristischen Daten des thermodynamischen Kreislaufs sowie der Wirkungsgrad entsprechen in etwa denen von Leichtwasserreaktoren [4, 5].

Der Brennstoff des RBMK-Reaktors besteht aus 190 Tonnen niedrig angereicherten Urandioxids (2 % Anreicherung), das als Pellets in Rohren aus Zirkalloy eingeschlossen ist. Diese zu mehr als 90 % aus Zirkonium bestehende Legierung absorbiert Neutronen nur in geringem Maße. Je 18 Stäbe bilden ein Brennelement

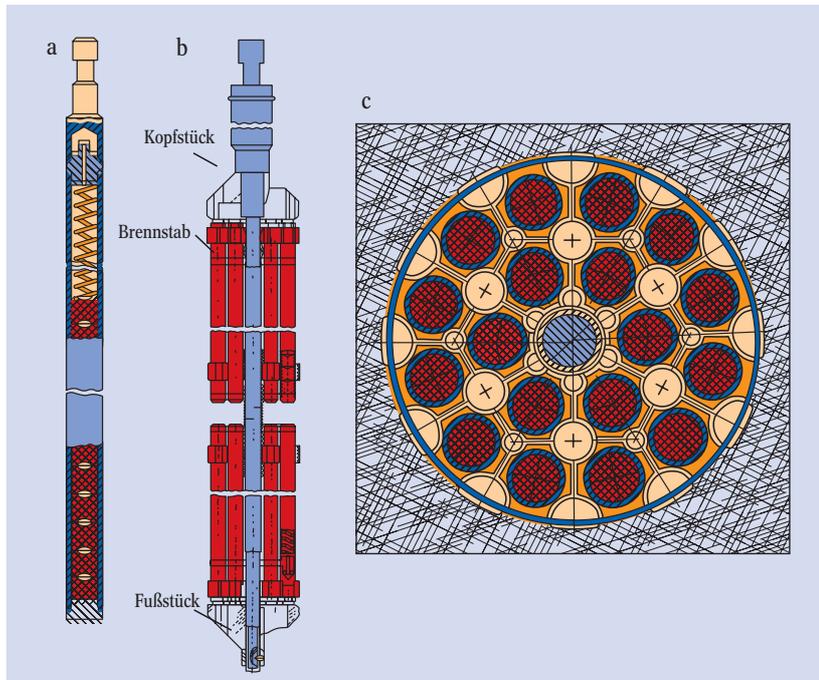


Abb. 2: Bei den RBMK-Reaktoren sind 18 Brennstäbe (a) aus Zirkalloy (dunkelblau), die jeweils mit Pellets aus Urandioxid (rot) gefüllt sind, zu einem Brennelement angeordnet (b). Je zwei Brennelemente befinden sich in einem Druckrohr aus Zirkalloy, das von Grafit umgeben ist (c: Horizontalschnitt). Ein Brennelement ist etwa 3,5 m lang.

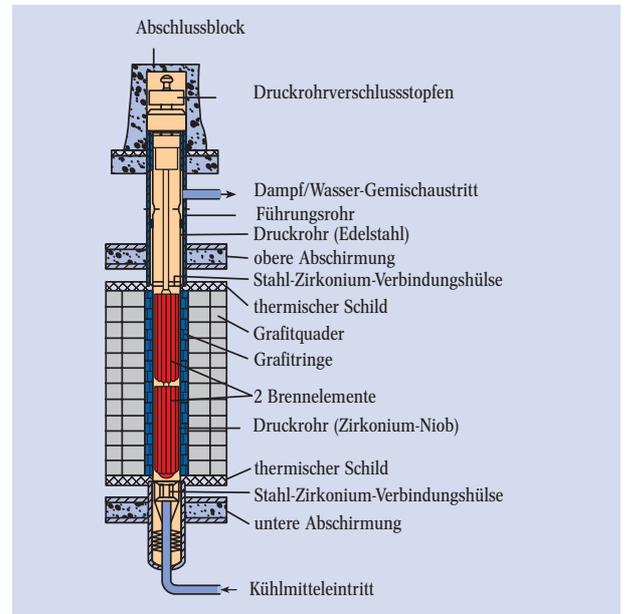


Abb. 3: Je zwei Brennelemente befinden sich in einem senkrecht angeordneten Druckrohr, das von einem Grafitblock umgeben ist und von Kühlmittel durchflossen wird.

(Abb. 2). Zwei übereinander angeordnete Brennelemente befinden sich in einem senkrecht angeordneten Druckrohr, durch das auch das Kühlmittel geführt wird (Abb. 3). Diese Konstruktion erlaubt eine Be- und Entladung durch das Öffnen der Druckrohre bei voller Reaktorleistung. Um die Druckrohre herum sind Grafitblöcke angeordnet, die als zusätzliche Moderatoren und als Reflektoren dienen. Der gesamte Grafitaufbau des Corebereiches (insgesamt 1700 Tonnen) befindet sich in einer dichten Stahlschale, durch die ein Gemisch aus Helium und Stickstoff langsam zirkuliert. Der gesamte Reaktorkern ist ein 7 m hoher Zylinder mit einem

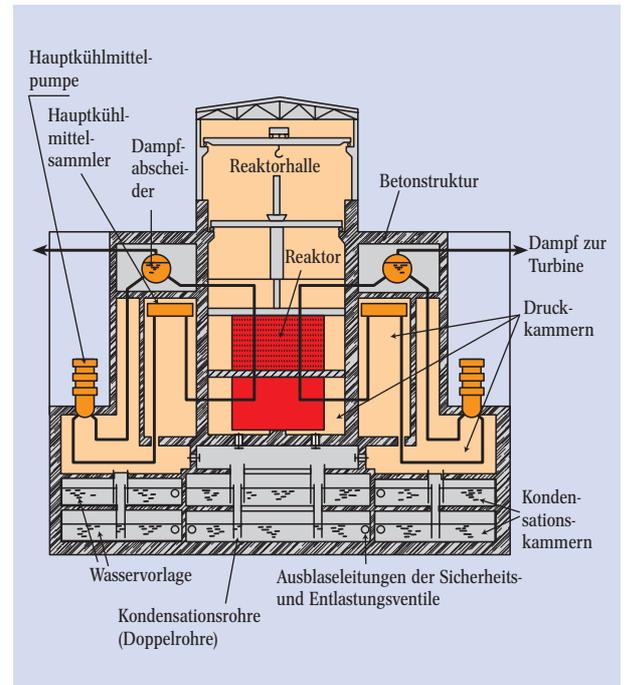


Abb. 4: Diese Querschnittszeichnung vermittelt eine Übersicht über den gesamten Primärteil und die Reaktorhalle mit Reaktorkern (Core), Dampfsammler, Primärkühlpumpen sowie Kondensationskammern.

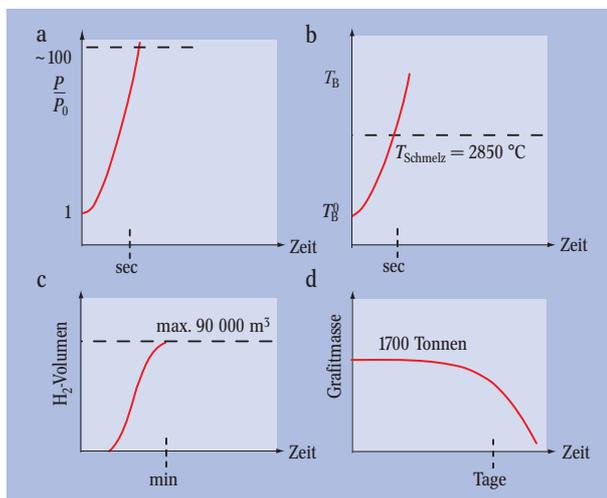


Abb. 5: Qualitativer Verlauf von Leistung (a), Brennstofftemperaturen (b), Wasserstoffbildung (c) sowie Grafitabbrenn (d) während des Unfalls.

Durchmesser von 12 m. 178 Abschaltstäbe, die von oben in den Kernaufbau eingefahren werden, dienen der Regelung und Abschaltung des Reaktors.

Der Reaktorkühlkreislauf besteht aus zwei identischen Schleifen mit jeweils vier Umwälzpumpen, die das Speisewasser von unten in die insgesamt 1700 Druckröhren pumpen. Das Wasser wird dabei bis zum Siedepunkt erwärmt und teilweise verdampft. In einer Dampftrommel werden Dampf und Wasser separiert, wie bei Zwangsumlaufkesseln in der konventionellen Dampferzeugertechnik. Die Notkühlung umfasst Not-einspeisesysteme, Druckspeicher und Umwälzsysteme, wie dies auch von Leichtwasserreaktoren her bekannt ist. Sie ist sowohl auf gleichartigen (redundant) als auch auf verschiedenen technischen Prinzipien (diversitär) beruhend auf eine Kapazität bis $3 \times 50\%$ ausgelegt, sodass zwei von drei Teilsystemen die Notkühlung gewährleisten könnten. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des gesamten Primärkreises, der sich in einer einfachen Industriehalle befindet. Diese erlaubt praktisch keine Rückhaltung von Radioaktivität bei Störfällen und ist nicht gegen Einwirkungen von außen ausgelegt.

Der Unfall

Aus bisherigen Veröffentlichungen und Versuchen, den Unfallablauf zu rekonstruieren, ergibt sich folgendes Bild [6–9]: Am 25. April 1986 wurde Block 4 im Rahmen von Wartungsarbeiten herunter gefahren. Gleichzeitig sollte ein Experiment durchgeführt werden, um festzustellen, ob ein sowohl vom Netz als auch von der Dampfversorgung abgekoppelter Turbogenerator in der Lage wäre, aufgrund seiner mechanischen Trägheit für kurze Zeit genügend Leistung zu liefern, um wichtige Systeme zu versorgen. Als der Unfall geschah, wurde der Reaktor mit 7 % seiner Nennleistung betrieben. Bedingt durch mehrere Bedienungsfehler – insbesondere wurde offenbar das Abschaltssystem zu weit ausgefahren und damit in seiner Wirksamkeit beeinträchtigt – sowie durch das Vorliegen eines positiven Rückkoppelungskoeffizienten der Reaktivität im niedrigen Leistungsbereich (siehe Infokasten) kam es innerhalb eines Zeitraums der Größenordnung von Sekunden zu einer starken Leistungszunahme auf offenbar das 100-fache der Nennleistung (Abb. 5a). Auch eine von Hand ausgelöste Reaktorschnellabschaltung kam wegen der langen



Abb. 6: Nach dem Unfall wurde der Reaktorblock 4 mit einem Betonmantel („Sarkophag“) eingehüllt. (Quelle: ZSR, Universität Hannover)

Einfahrzeit der Stäbe aus ihrer vorliegenden Stellung heraus viel zu spät. Daher erhitze sich der Kern so stark, dass der Schmelzpunkt des Brennstoffs (2850 °C) erreicht wurde (Abb. 5b). Der Kern schmolz, und auch die Temperatur des Zirkoniums der Brennstabhüllen und der Druckröhre stieg in sehr kurzer Zeit auf weit über 1500 °C . Die Druckröhren platzten, und durch Oxidation des Zirkoniums mit Dampf entstanden über die Reaktion $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ große Mengen an Wasserstoff (Abb. 5c). Da die Zündtemperatur eines Wasserstoff-Luft-Gemisches bei 560 °C liegt, verbrannte der Wasserstoff explosionsartig. Mehrere Explosionen zerstörten den oberen Teil des Reaktorgebäudes und

Grundbegriffe der Kerntechnik

Bei einer Kernspaltung in einem Kernreaktor fängt ein Uranisotop ^{235}U ein Neutron ein und zerfällt anschließend in zwei Bruchstücke. Dabei werden zwei bis drei energiereiche (schnelle) Neutronen frei. Damit eine Kettenreaktion zustande kommt, müssen diese Neutronen mithilfe eines Moderators abgebremst werden, denn nur für langsame Neutronen ist die Wahrscheinlichkeit, von einem Uranern eingefangen zu werden, groß genug.

Bei einem **kritischen Reaktor** gewährleistet eine stationäre Kettenreaktion ein Gleichgewicht zwischen der Produktion und dem Verlust von Neutronen durch Absorption und Leckage und damit einen stationären Betrieb. Die Neutronenbilanz lässt sich durch den Multiplikationsfaktor k ausdrücken. Im kritischen Zustand gilt $k = 1$, d. h. die Kettenreaktion erhält sich gerade selbst.

In der Praxis wird statt k meist die **Reaktivität** $q = (k-1)/k$ verwendet, ein Maß für die Abweichung vom kritischen Zustand. Ein Wert $q = 0$ kennzeichnet einen **kritischen Reaktor**. Bei einem Reaktivitätswert $q < 0$ wird der Reaktor als **unterkritisch** bezeichnet, die Kettenreaktion kann also nicht aufrechterhalten werden, $q > 0$ charakterisiert einen **überkritischen** Reaktor.

Neben den unmittelbar bei der Spaltung freiwerdenden Neutronen (**prompte** Neutronen) entstehen durch den Zerfall der Spaltfragmente Sekunden bis Minuten nach der Spaltung die **verzögerten** Neutronen. Der Anteil der verzögerten Neutronen beträgt etwa $\beta = 0,65\%$, der Anteil der prompten Neutronen $1 - \beta = 99,35\%$.

Ein Zustand mit $q = \beta$ heißt **prompt kritisch**, da dann die prompten Neutronen allein ausreichen, um die Kettenreaktion aufrechtzuerhalten. **Prompt überkritisch** heißt der Zustand falls $q > \beta$. In diesem Zustand wachsen der Neutronenfluss und die Leistung auf sehr kurzer Zeitskala exponentiell an.

Der **Reaktivitätskoeffizient** bezeichnet die Änderung der Reaktivität in Abhängigkeit einer Prozessvariablen, z. B. der Temperatur oder der Dichte des Kühlmittels.

Der **Dampfblasenkoeffizient** gibt an, wie sehr sich die Reaktivität ändert bei Änderung der Dichte des Kühlmittels. Ein positiver Dampfblasenkoeffizient bedeutet, dass die Reaktorleistung wächst, wenn sich im Kühlwasser Dampfblasen bilden.

Der **Leistungskoeffizient** gibt die Reaktivitätsänderung bei Änderung der Reaktorleistung an.

schleuderten Brennstoff und andere brennende Teile des Corebereiches aus dem Reaktor heraus.

Insgesamt wurden aus dem Kernbereich große Mengen an radioaktivem Material in die Umgebung freigesetzt. Aufgrund der Kernschmelze gelangte geschmolzener Brennstoff bis in die unteren Bereiche der Anlage. Der Grafit des Reaktors wurde durch die bei der exothermen Reaktion von Zirkonium mit Wasser freiwerdende Wärme sehr schnell auf Temperaturen über 1000 °C aufgeheizt, geriet in Brand und brannte mehrere Tage mit einer Reaktionsrate von etwa 1 bis 2 Volumenprozent pro Stunde ab (Abb. 5d).

Dies erzeugte zusätzlich über längere Zeiten eine Leistung von bis zu 300 MW und sorgte für einen starken Auftrieb der radioaktiven Stoffe in große Höhen und damit zu einem Transport von Radioaktivität über große Entfernungen bis nach Westeuropa. Unmittelbar nach der Explosion des Kerns bekämpfte die Feuerwehr eine Vielzahl von Bränden, z. B. auf dem Dach des Turbinengebäudes. Kühlversuche mit Wasser im Kernbereich waren erfolglos. Der Grafitbrand wurde durch Abwurf von rund 5000 Tonnen Sand, Dolomit, Bor und Blei von Hubschraubern aus unter Kontrolle gebracht. Danach gelang es, flüssigen Stickstoff von unten her in die unteren Reaktorstrukturen sowie den Corebereich zu pumpen und damit die Temperatur abzusenken.

Schließlich wurde in den darauf folgenden Monaten ein Betonmantel (Sarkophag) um den zerstörten Reaktor herum gebaut (Abb. 6). Dieses Gebäude ist allerdings nicht dicht und nur als strukturell unzureichende Notmaßnahme anzusehen, sodass in der nächsten Zeit ein zweiter äußerer Betonmantel errichtet werden muss.

1) Der Reaktivitätskoeffizient der Brennstofftemperatur wird Doppler-Koeffizient genannt. Die Resonanzabsorptionen des Uran-238 führen bei Temperaturerhöhung zu einem negativen Doppler-Koeffizienten.

Insgesamt handelte es sich beim Unfall in Tschernobyl – kerntechnisch ausgedrückt – um einen Reaktivitätsunfall in einem prompt kritischen Zustand (s. Infokasten), der einen gewaltigen Leistungsanstieg verbunden mit extremer Brennstoffbeschädigung, Kernschmelze und heftiger Reaktion zwischen Brennstoff und Kühlmittel zur Folge hatte. Inzwischen ist klar geworden, dass der Unfall durch fundamentale Auslegungsfehler sowie Bedienungsfehler bei unüblichen Betriebsbedingungen verursacht wurde. Offenbar waren auch einige reaktorphysikalische Zusammenhänge wie das Zusammenspiel von Reaktivitätskoeffizienten und Stellung der Abschaltstäbe falsch eingeschätzt worden.

Das Unfallgeschehen im Detail

Da naturgemäß während des Unfalls nur wenige Messdaten registriert wurden, ist es sehr schwierig, das Unfallgeschehen genau nachzuvollziehen. Im Wesentlichen lässt sich heute der Ablauf aber doch verstehen.

Bei den RBMK-Reaktoren dient das Kühlwasser sowohl als Moderator als auch als Neutronenabsorber im Core. Wenn es verdampft, wird die Absorption verringert, das heißt, der Kernreaktion werden weniger Neutronen entzogen. Gleichzeitig bleibt die Moderation durch den Grafit aber bestehen, sodass die Verdampfung mit einem positiven Beitrag zur Neutronenbilanz einhergeht. Generell wird die Änderung der Reaktivität bei Änderung der Dichte des Kühlmittels durch den Dampfblasenkoeffizienten beschrieben. Dieser ist bei den RBMK-Reaktoren bei geringer Leistung positiv, sodass bei Zunahme des Dampfblasengehaltes in den Siedekanälen, etwa durch Verringerung des Kühlmitteldurchsatzes, die Reaktivität zunimmt. Dies wiederum bedingt eine Erhöhung der Leistung, wodurch der Dampfblasengehalt weiter ansteigt. Diese positive Rückkopplung geschieht in sehr kurzer Zeit. Im Gegensatz dazu dient das Kühlwasser bei den meisten Reaktoren im Westen gleichzeitig als Moderator. Verdampft dann das Kühlwasser, so verringern sich gleichzeitig die Moderatorleistung und damit auch die Reaktivität.

Als das Experiment an Block 4 begann, war der Reaktor in einem relativ instabilen Zustand bei niedriger Leistung und hohem Kühlmitteldurchsatz. Die meisten Abschaltstäbe waren aus dem Core ausgefahren, um die Reaktivitätsverluste durch hohen Xenongehalt und geringen Dampfgehalt zu kompensieren. Das Kühlmittel befand sich nahe dem Verdampfungspunkt, an dem eine geringe Leistungssteigerung zu einer starken Verdampfung führt. Daher war der Leistungskoeffizient insgesamt positiv und das Verhalten des Reaktors instabil. Als nun im Rahmen des Experiments der Durchfluss reduziert wurde, begann die Verdampfung mit den eingangs geschilderten Rückkopplungen. Dies führte über steigende Verdampfung dazu, dass die Leistung explosionsartig anstieg (Abb. 7a, b).

Simulationen legen nahe, dass die Reaktivität zunächst einen Wert von 0,65 % erreichte. Dies entspricht dem Anteil der verzögerten Neutronen (Abb. 7c). Nach zwei Sekunden wurde der Reaktor prompt überkritisch (s. Infokasten). Nach rund vier Sekunden nahm die Leistung zunächst noch mal ab, bedingt dadurch, dass die Reaktivität bei Zunahme der Brennstofftemperatur abnimmt.¹⁾ Durch weitere Verdampfung nahmen die Reaktivität sowie die Leistung jedoch wieder zu. Die Leistung stieg insgesamt in kurzer Zeit auf den über 100-fachen Auslegungswert und führte zur bekannten Zerstörung des Reaktorkerns [10–12].

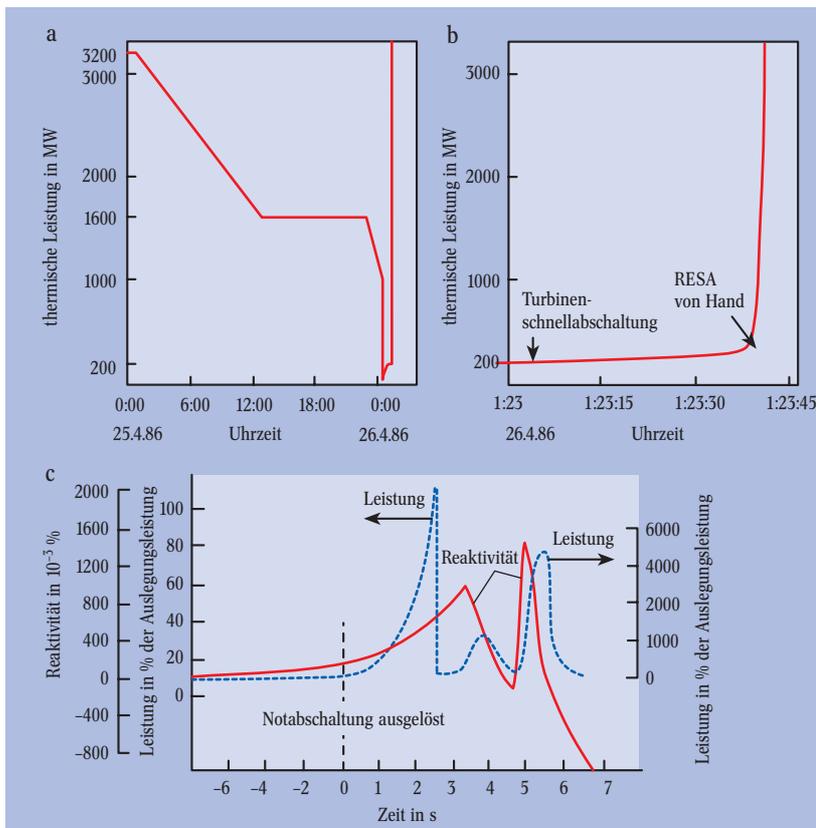


Abb. 7: Der am Block 4 in der Nacht vom 25. auf den 26. April 1986 durchgeführte Versuch sah zunächst eine schrittweise Verringerung der Leistung vor (a). Nach der Turbinenschnellabschaltung nahm die Leistung trotz einer Reaktorschnellabschaltung (RESA) explosionsartig zu (b). Leistung und Reaktivität lassen sich für die Sekunden vor und nach dem Unfall simulieren (c). (Für die Leistung gilt bis zur Zeit $t = 2,5$ die linke Skala, danach die rechte.)

Heutiger Zustand des Reaktors

Der Reaktor selbst ist heute noch in einem unbefriedigenden Zustand. Große Mengen an „Lava“ sowie Staub machen Arbeiten am Reaktor ausgesprochen schwierig und gefährlich; zudem ist zu befürchten, dass durch eine Beschädigung des provisorischen Sarkophags durch Erdbeben oder andere Einwirkungen erneut Radioaktivität freigesetzt wird. Der instabile Reaktordeckel mit einem Gewicht von rund 1000 Tonnen droht abzustürzen und die Reaktorwände und den Boden weiter zu beschädigen. Die zur Eindämmung der Katastrophe aufgeschüttete Betonschicht weist viele Risse auf. Der geschmolzene Reaktorkern und damit die Spaltstoffe sind zwar räumlich verteilt, aber aufgrund der andauernden Nachwärmeproduktion werden Temperaturen von fast 200 °C erwartet. Zudem schädigt die Strahlenwirkung die Betonstrukturen. Der Boden unter dem Reaktorkern ist brüchig. Die Dachkonstruktion ist offenbar nicht regendicht, und ständig eindringende Wassermengen könnten für Kritikalitätsüberlegungen relevant werden. Derzeit ist dies wohl noch kein Problem, jedoch müssen Prozesse bedacht werden, die zum Brennstofftransport führen.

Künftig wird es unbedingt notwendig sein, die Ruine des Reaktors mit einem ausreichend stark bemessenen und gut fundierten neuen Betongebäude zu umgeben und damit eine erneute Freisetzung von Radioaktivität (Stäube und Aerosole) zu verhindern. Eine „grüne Wiese“ wird an dieser Stelle voraussichtlich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erst in einigen Jahrzehnten möglich sein [13].

Lehren aus dem Unfall

Aus dem katastrophalen Unfall in Tschernobyl folgen einige Lehren für den Betrieb heutiger Reaktoren und für die zukünftige Nutzung der Kernenergie:

- ▶ Reaktoren dürfen niemals, in welchen Betriebszuständen oder Störfallsituationen auch immer, mit positiven Reaktivitätskoeffizienten betrieben werden.
- ▶ Für schwere Unfälle müssen wirksame Interventionseinrichtungen und -mittel bereitgehalten werden. Dies gilt sowohl für die Zeit unmittelbar während des Unfalls als auch für den Zeitraum danach. Hierzu gehören auch geeignete Entsorgungskonzepte für kontaminierte Anlagen.
- ▶ Katastrophenschutzpläne müssen immer wieder geübt werden und dann auch rechtzeitig umgesetzt werden. Evakuierungen müssen rechtzeitig stattfinden.
- ▶ Weltweit muss die Kompetenz in Fragen der Reaktorsicherheit gepflegt und vermehrt werden. Die Sicherheitskultur muss den höchstmöglichen Stand haben. Experimente wie in Tschernobyl dürfen z. B. nicht ohne unabhängige Überprüfung durch Genehmigungsbehörden durchgeführt werden.
- ▶ Für zukünftige Anlagen muss bei allen Störereignissen nachweislich eine praktisch vollständige Zurückhaltung der Radioaktivität in den Reaktoranlagen gewährleistet sein. Am besten lässt sich dies bei Reaktoren erreichen, deren Kern nicht schmelzen kann und die durch nukleare Exkursionen und durch Korrosionseffekte nicht zerstört werden können. Diese Forderung können geeignet ausgelegte und gestaltete Reaktoren, z. B. modulare Hochtemperaturreaktoren, in Zukunft nachweislich erfüllen.²⁾

Erst nach Erfüllung dieser Anforderungen kann eine allgemeine Akzeptanz bei der Nutzung der Kernenergie erwartet werden.

Literatur

- [1] A. A. Afanasieva *et al.*, The characteristics of the RBMK core, Nuclear Technology **103**, Juli 1993
- [2] Informationskreis Kernenergie, Der Reaktorunfall in Tschernobyl, Berlin (2000)
- [3] E. Knuglinge und S. Chakraborty, The Safety of RBMK Nuclear power plants, Atomwirtschaft, Heft 2, 1998
- [4] GRS, Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, GRS 121, Köln, Feb. 1996
- [5] J. Weber, D. Reichenbach und Charkashow, Sicherheitsfragen des RBMK, Atomwirtschaft, Heft 5, 1995
- [6] INSAG-1, The Chernobyl-Accident, Updating of INSAG-1 Safety series, No. 74, IAEA, Wien, 1992
- [7] GRS, Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, Teil 1 und 2, Okt. 1987
- [8] K. Ort und H. Türp, Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, Hergang und Ablauf – Ursachen und Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit, KTG, Bonn, 1996
- [9] D. Reichenbach und K. Hotthoft, Der Tschernobyl Unfall, Atomwirtschaft, Heft 3, 1996
- [10] L. Kuriene, M. Clemente und S. Langenbuch, Study of the void reactivity behaviour of RBMK reactors, Kerntechnik **68** (2003)
- [11] M. J. Martinez-Val, An analysis of the physical causes of the Chernobyl accident, Nuclear Technology **90**, Juni 1990
- [12] P. Landgro und A. Buccafurni, Time-Independent Neutronic Analysis of the Chernobyl-Accident, Nuclear Science and Engineering, 1991
- [13] G. Pretzsch und B. Gmal, Der Sarkophag von Tschernobyl, – Nukleare Sicherheit und radiologische Situation, Atomwirtschaft, Heft 4, 1997

2) vgl. dazu den Artikel „Gibt es den katastrophfreien Kernreaktor“ von K. Kugeler, Phys. Blätter, Nov. 2001, S. 33. Dieser Artikel ist online unter www.physik-journal.de zu finden.

Die Autoren

Kurt Kugeler hat nach seinem Physikstudium 1968 zum Dr.-Ing. an der RWTH Aachen promoviert. Bis 1979 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Abteilungsleiter in der KFA Jülich am Institut für Reaktorentwicklung. Kugeler habilitierte sich 1976 an der RWTH Aachen und erhielt 1979 einen Ruf an die Universität-GH Duisburg für das Gebiet Energietechnik. Seit 1990 hat er den Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik an der RWTH Aachen inne und ist Direktor am Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik des Forschungszentrums Jülich GmbH. Kugeler war Mitglied der Deutschen Reaktor-Sicherheitskommission und im Kerntechnischen Ausschuss. Er gilt als Verfechter der friedlichen Nutzung der Kerntechnik – allerdings unter Einhaltung strengster Sicherheitsauflagen.



Inga Tragsdorf studierte Maschinenbau mit Vertiefungsrichtung Reaktorsicherheit und -technik an der RWTH Aachen, wo sie 2005 mit einer ingenieurwissenschaftlichen Arbeit am Institut für Reaktorsicherheit und -technik promovierte. Dort ist sie derzeit wissenschaftliche Angestellte.

Nathalie Pöppe schloss ihr Physikstudium an der RWTH 1999 mit dem Diplom ab. Von 2000 bis 2002 forschte sie am Institut für Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen, seitdem ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik der RWTH Aachen.

