

Karl F. Alexander

## **Die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl - Bilanz nach zehn Jahren\***

In der Nacht vom 25. zum 26. April 1986 ereignete sich in der Nähe der ukrainischen Kleinstadt Tschernobyl der folgenschwerste Unfall in einem Kernkraftwerk seit dem Beginn der friedlichen Nutzung der Atomkernenergie zur Elektrizitätserzeugung. Ein solcher Unfall war bis dahin in Untersuchungen zur Sicherheit von Kernreaktoren nur als "hypothetischer" Unfall jenseits aller real für möglich gehaltenen Unfallabläufe (GAU: Größter Anzunehmender Unfall) eingeordnet worden, obwohl er bei der Standortwahl für Kernkraftwerke durchaus eine Rolle spielte.

Der zehnte Jahrestag dieses Ereignisses war Anlaß für die internationale Scientific Community, eine umfassende Bilanz zu ziehen über Ursachen und Folgen der Katastrophe, über Maßnahmen zur Begrenzung und Minderung ihrer Auswirkungen und über Schlußfolgerungen für die weitere Entwicklung der Kernenergetik. Dazu fand im April 1996 eine gemeinsame Konferenz der Europäischen Kommission, der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Internationalen Atomenergie - Agentur (IAEA) in Wien statt [1]. In Vorbereitung darauf wurde im März in München ein Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) durchgeführt [2], und die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) publizierte im Februar eine detaillierte Dokumentation und Analyse [3]. Bereits 1995 wurde von der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften ein umfangreicher Sammelband zu diesem Thema vorgelegt [4]. Auf der Basis dieses Materials will ich versuchen, eine kurze Zusammenfassung zu geben.

---

\* erweiterter Text eines Vortrags vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 18. April 1996

Tabelle 1

Nuklid	$T_{1/2}$	Strahlung Art, [MeV]	Freisetzung [Bq]	% vom Inventar
<i>Edelgase:</i> Kr-85	10,7 a	$\beta$ : 0,67; kein $\gamma$	$3,3 \times 10^{16}$	$\approx 100$
<i>Flüchtige</i> J-131 Cs-137	8,04 d 30 a	$\beta$ : 0,61; $\gamma$ : 0,36 $\beta$ : 0,51; $\gamma$ : 0,66	$6,5 \times 10^{17}$ $8,6 \times 10^{16}$	50 33
<i>Schwerflüchtige</i> Ce-144 Sr-90	284 d 29,1 a	$\beta$ : 0,32; $\gamma$ : 0,13 $\beta$ : 0,54; kein $\gamma$	$9,0 \times 10^{16}$ $8,0 \times 10^{15}$	2,8 4,0
<i>Transurane</i> Pu-239 Pu-240	24.065 a 6.537 a	$\alpha$ : 5,15; $\gamma$ : 0,013 $\alpha$ : 5,16; $\gamma$ : 0,045	$3,4 \times 10^{13}$ $5,3 \times 10^{13}$	3,5 3,5

*Die Freisetzung radiologisch bedeutsamer Radionuklide aus dem zerstörten Reaktor (Nach F.W. Krüger et al., Der Ablauf des Reaktorunfalls Tschernobyl 4 und die weiträumige Verfrachtung des freigesetzten Materials: Neuere Erkenntnisse und ihre Bewertung, [2])*

### 1. Die physikalisch-technischen Ursachen und der Ablauf des Unfalls

Die hauptsächlich physikalische Ursache des Unfalls verbirgt sich bereits im Grundprinzip des RBMK-Reaktortyps, der, beginnend mit dem ersten Versuchskraftwerk in Obninsk (1954), zum Arbeitspferd der ersten Etappe der kommerziellen Kernenergienutzung in der Sowjetunion (und nur dort) wurde. Dieser "Reaktor großer Leistung vom Kanaltyp" stellt offensichtlich eine Weiterentwicklung der für das militärische Programm errichteten Reaktoren zur Produktion von Plutonium dar. Es ist ein Graphitmoderierter und mit Wasser gekühlter thermischer Kernreaktor. Die Brennstoffstäbe aus leicht angereichertem Uran befinden sich in Druckrohren, die den aus Graphitblöcken aufgebauten zylindrischen Reaktorkern (Durchmesser ca. 12 m, Höhe ca. 7 m) vertikal durchziehen und von unter hohem Druck stehendem Kühlwasser durchflossen werden. Im Vergleich zu den wesentlich kompakteren Druckwasserreaktoren (deren Vor-

fahren die Antriebsreaktoren der Atom-U-Boote sind) hat die Konstruktion der RBMK-Reaktoren mit ihrem aus neutronenphysikalischen Gründen wesentlich größeren Volumen den Vorteil, daß sie kein äußeres, dem Arbeitsdampfdruck standhaltendes Druckgefäß benötigen und mit einer geringeren Leistungsdichte im Arbeitsvolumen auskommen. Ein grundsätzliches Sicherheitsproblem besteht jedoch in der Kombination von Graphit als Moderator und Wasser als Kühlmittel, da in diesem Fall die Absorbereigenschaft des Wassers für thermische Neutronen einen wesentlichen Einfluß auf das Regelungsverhalten des Reaktors hat.

Die Steuerung und Regelung eines Kernreaktors besteht bekanntlich in der Einstellung des für die geforderte Wärmeleistung benötigten Neutronenflusses mit Hilfe beweglicher Neutronenabsorber (Regel-, Steuer- oder Abschaltstäbe). Mit Hilfe dieser Elemente wird die Reaktivität  $\rho = (k-1)/k$  manipuliert, welche die zeitliche Änderung der Neutronendichte  $n(t)$  im aktiven Volumen charakterisiert.  $k$  ist hierbei der effektive Multiplikationsfaktor, um den sich in der Kettenreaktion die Spaltneutronendichte von Generation zu Generation vermehrt. Im stationären Zustand gilt also  $k = 1$ ,  $\rho = 0$ , für  $k > 1$ ,  $\rho > 0$  steigt die Neutronendichte und damit proportional die Leistung, für  $k < 1$ ,  $\rho < 0$  sinkt sie mit der Zeit. Vereinfacht kann dies Verhalten mit der Formel

$$n(t) = n_0 \exp(t/T)$$

dargestellt werden, wobei die Reaktorperiode  $T$  mit der mittleren Lebensdauer einer Neutronengeneration zusammenhängt. In der Nähe des Gleichgewichts wird diese Zeit wesentlich dadurch bestimmt, daß ein kleiner Bruchteil  $\beta \approx 0,007$  der die Kettenreaktion aufrechterhaltenden Spaltneutronen erst über den Umweg des Zerfalls einiger kurzlebiger Spaltproduktkerne mit einer mittleren Lebensdauer  $t_v \approx 12$  sec emittiert wird. Für die Reaktorperiode gilt solange  $\rho < \beta$  ist

$$T \cong \frac{(\beta - \rho)t_v}{\rho}$$

und dementsprechend erfolgt der exponentielle Anstieg oder Abfall langsam und ist gut regelbar. Übersteigt aber  $\rho$  den Wert  $\beta$ , so wird der Anstieg der Kettenreaktion hauptsächlich von den prompt emittierten Spaltneutronen getragen, deren Laufzeit bis zur Absorption  $t_0$  kleiner als eine Millisekunde ist. Damit verkürzt sich die Reaktorperiode drastisch auf  $T \cong t_0 / \rho$ , der Reaktor wird praktisch unregelbar und kann ohne zu-

sätzliche leistungsbegrenzende Effekte in einer exponentiell verlaufenden Leistungsexkursion zerstört werden. Die Erreichung eines solchen prompt-kritischen Zustands muß daher unter allen Umständen durch automatisch - naturgesetzlich wirkende Effekte ausgeschlossen werden.

Die Reaktivität  $\rho$  hängt - außer von der Stellung der Steuer- und Regelstäbe - noch von mehreren Materialparametern ab wie Dichte und Temperatur von Brennstoff, Moderator und Kühlmittel, zeitlich variable Vergiftung durch stark Neutronen absorbierende Spaltprodukte (Xenonvergiftung) u.a., die sich ihrerseits mit der erzeugten Kernenergieleistung verändern. Ein stabiler Leistungsbetrieb des Reaktors ist nur dann möglich, wenn jede spontane Leistungserhöhung eine Rückführung der Reaktivität auf den Gleichgewichtswert bewirkt. In allen zugelassenen Betriebszuständen muß der Leistungskoeffizient der Reaktivität negativ sein.

Dies gilt selbstverständlich auch für die RBMK-Reaktoren im normalen Leistungsbetrieb. Die Besonderheit dieses Typs besteht jedoch darin, daß eine Verminderung der Kühlmittelmenge z.B. durch Dampfblasen oder Auslaufen stets die Reaktivität erhöht. Im Normalbetrieb, der ein teilweises Sieden des Kühlwassers zuläßt, wird dieser positive "Voideffekt" überkompensiert durch andere, negativ auf die Reaktivität wirkende Effekte. Dies gilt jedoch nicht für alle möglichen Betriebszustände, u.a. bei sehr niedriger Reaktorleistung oder bei Ausfall der Kühlmittelpumpen.

Druckwasser- und Siedewasserreaktoren, bei denen das Wasser auch die Moderatorfunktion wahrnimmt, zeichnen sich demgegenüber durch einen stark negativen Voideffekt aus, der bei jedem Kühlmittelverlust die Kettenreaktion sicher abschaltet. In der Folge kann dann allerdings der sehr gefährliche Kernschmelzunfall eintreten, der jedoch durch eine rechtzeitige Notkühlung des Reaktorkerns vermieden werden kann (Harrisburg!).

Es ist eine Ironie der Geschichte, daß die Tschernobyl-Katastrophe durch ein Experiment ausgelöst wurde, das die sichere Beherrschung eines drohenden Kühlmittelverlust-Störfalls bei Ausfall der normalen Stromversorgung nachweisen sollte. Dieser eigentlich bereits für den Probebetrieb des 4. Reaktorblocks des Kernkraftwerk Tschernobyl geforderte Sicherheitsnachweis sollte anläßlich einer planmäßigen Abschaltung der Anlage zur Revision nach einer längeren Betriebsperiode nachgeholt werden. Ziel des Versuchs war, zu prüfen, wie lange die Hauptumwälzpumpen nach einer Schnellabschaltung der Turbine noch von dem aus-

laufenden Generator mit Strom versorgt werden können. Im Selbstverständnis der Ausführenden handelte es sich um ein rein elektrotechnisches Experiment, da zur Gewährleistung der Reaktorkühlung der zweite Satz von Hauptumwälzpumpen unabhängig davon in Betrieb bleiben sollte. Die Chronologie der zum Unfall führenden Ereignisse war die folgende [3]:

- Bereits in den frühen Morgenstunden des 25. April war der Reaktor auf 50 % der Nennleistung abgefahren worden. In Vorbereitung auf den Test wurde das Notkühlsystem abgeschaltet. Auf Anforderung der Verteilerstation in Kiew mußte dann aber weiter Leistung ins Netz eingespeist und der Testbeginn in die folgende Nacht verschoben werden.
- Um 23:10 Uhr konnte das Abfahren auf den für den Versuch vorgesehenen thermischen Leistungsbereich von 700 - 1000 MW fortgesetzt werden. Dieser Bereich wurde jedoch aus nicht bekannten Gründen unterschritten.
- Um 0:28 Uhr des 26. April kam es bei einer thermischen Leistung von 500 MW zu Schwierigkeiten bei der Umschaltung der Reaktorleistungsregelung und die Reaktorleistung fiel praktisch auf Null. Durch die Stellung der Steuerstäbe war die vorzuhaltende betriebliche Reaktivitätsreserve mit einem Äquivalent von 28 statt mindestens 30 Stäben deutlich niedriger als zulässig. Der Reaktor hätte abgeschaltet und der Versuch verschoben werden müssen. Statt dessen wurde die Leistung durch weiteres Ausfahren von Steuerstäben so weit wie möglich erhöht und bei 200 MW stabilisiert.
- Um 0:43 Uhr wurde - entgegen dem Testprogramm - das Signal "Ausfall der Turbine", das zur automatischen Notabschaltung des Reaktors bei Einleitung des Versuchs geführt hätte, unwirksam gemacht, um den Versuch eventuell wiederholen zu können.
- Unmittelbar vor Einleitung des Versuchs befand sich die Anlage in einem äußerst instabilen Zustand, da ein ungünstiger Beladungszustand, ein zu niedriges Leistungsniveau mit ungünstiger Leistungsdichteverteilung, ein zu hoher Kühlmitteldurchsatz im Kern, ein verminderter Speisewasserdurchsatz mit Erhöhung der Kühlmitteltemperatur am Kerneintritt und ein instationäres Verhalten der

räumlichen Xenonvergiftung vorlagen. Zu diesem Zeitpunkt betrug die betriebliche Reaktivitätsreserve nur noch 7 - 8 Steuerstäbe.

- Um 1:23:04 Uhr wird durch Schnellabschaltung der Turbine der Versuch eingeleitet. Wie vorgesehen laufen vier Hauptkühlmittelpumpen aus. Die damit verbundene Verringerung des Durchsatzes und Erhöhung der Temperatur des Kühlwassers führt durch den Voideffekt einer vermehrten Dampfblasenbildung zu einem Leistungsanstieg, den das automatische Regelstabsystem nicht beherrschen kann.
- In dieser Situation wird um 1:23:40 Uhr der Havarieknopf gedrückt. Die Abschaltstäbe und alle Steuerstäbe fahren in den Reaktorkern ein. Dadurch wird jedoch das Gegenteil der beabsichtigten Wirkung erzielt: Die Reaktivität des Reaktors wächst innerhalb von Sekunden in den prompt-kritischen Bereich. Nach 3 Sekunden erscheint das Signal "Reaktorperiode < 20 sec" und die Leistung übersteigt 530 MW, nach 9 Sekunden erscheint das Störfallsignal "Druckanstieg im Reaktorbehälter".
- Eine Sekunde später wird der Reaktor durch eine gewaltige Dampfexplosion zerstört. Teile des glühenden Brennstoffs werden herausgeschleudert und lösen an den umliegenden Gebäuden Brände aus, die gegen 5 Uhr morgens gelöscht sind, aber das volle Ausmaß der Katastrophe wird erst nach Tagen wirklich deutlich.

Alle Effekte, die zur Auslösung der Katastrophe beitrugen, vor allem natürlich der für den RBMK besonders gefährliche Voideffekt des Kühlwassers, waren den sowjetischen Kernenergiespezialisten bekannt, sogar die erstaunliche Tatsache, daß beim Einfahren von ganz ausgefahrenen Steuerstäben vorübergehend ein positiver Reaktivitätseffekt auftreten kann, der durch unterhalb des Absorberteils der Stäbe angebrachte Wasserverdränger verursacht wird. Die einzuhaltenden Grenzen für einen sicheren Betrieb des Reaktors in Bezug auf die minimal zulässige Reaktivitätsreserve und die minimal zulässige Reaktorleistung berücksichtigten dies, waren jedoch nur durch Betriebsvorschriften geregelt und nicht eingebunden in das automatische Schutzsystem. Offensichtlich war auch das Betriebspersonal unzureichend informiert über den Sinn solcher Betriebsvorschriften.

Nach der GRS-Studie [3] waren die Hauptursachen des Unfalls

- gravierende Mängel der reaktorphysikalischen Auslegung und der Auslegung der Abschalteneinrichtungen,
- ein politisches und organisatorisches System, welches nicht in der Lage war, diese Mängel abzustellen, obwohl sie lange vor dem Unfall bekannt waren,
- ein sicherheitstechnisch unzureichend durchdachtes und geprüftes Versuchsprogramm,
- eine Betriebsführung und Bedienungseinrichtungen, die das Personal bei der Wahrnehmung seiner Verantwortung für die Sicherheit überforderten.

Inzwischen sind die größten Sicherheitsmängel dieser Art unter starker Beteiligung internationaler Organisationen und Experten durch Nachrüstungen an den RBMK-Reaktoren behoben worden.

## 2. Die Auswirkungen

Der Reaktor hatte gerade eine vollständige Betriebsperiode absolviert und ein hohes Radioaktivitätsinventar in den verbrauchten Brennstoffelementen angesammelt. Durch die Explosion wurden die gesamte Reaktorstruktur zerstört, etwa 3,5 % des hoch radioaktiven Brennstoffs direkt ausgestoßen und in der unmittelbaren Umgebung verteilt. Ein größerer Teil der Radioaktivität wurde aber erst in der Folgezeit durch den Graphitbrand und das teilweise Schmelzen des Korbrennstoffs freigesetzt, durch den Kamineffekt hoch in die Atmosphäre getragen und dort von Wind und Wetter großflächig verteilt. Erst im Verlauf von 10 Tagen gelang es durch die heroischen Anstrengungen der "Liquidatoren", die Reaktorreste zu löschen, mit aus der Luft abgeworfenen Materialien abzudecken und die massive Aktivitätsfreisetzung zu beenden. Die bis zum 6. Mai 1986 freigesetzte Menge radioaktiver Stoffe (ohne Berücksichtigung von Edelgasen und Tritium) wird zu  $2 \times 10^{18}$  Bequerel abgeschätzt. Zum Vergleich: Bei dem vor Tschernobyl bisher einzigen Reaktorunfall mit erheblicher Belastung der Umwelt durch Radioaktivität, dem Brand des Graphitpiles No. 1 in Windscale (Oktober 1957), wurde etwa 1 Tausendstel dieser Menge freigesetzt [5].

Die Daten der für die radiologischen Auswirkungen der Tschernobyl-Katastrophe auf Mensch und Umwelt besonders wichtigen Radionuklide sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Für die großflächige Kontamination von Landstrichen haben vor allem die leicht flüchtigen radioaktiven Isotope des Jod und des Cäsiums Bedeutung, die mit dem Regen aus den herunziehenden Abgasschwaden in Form eines bizarren Flickenteppichs niedergeschlagen wurden. Während das Jod-131 wegen seiner kurzen Halbwertszeit von 8 Tagen nur in den ersten Wochen gefährlich war, hat das Cs-137 mit seiner Halbwertszeit von 30 Jahren weite Gebiete in der Umgebung des Kraftwerks und auch große, nicht zusammenhängende Gebiete in weiterer Entfernung so verseucht, daß umfangreiche Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor radioaktiver Strahlung getroffen werden mußten. So wurden bereits am Abend des 27. April 1986 die Stadt Pripjat und bis zum 5. Mai eine Zone mit dem Radius von 30 km um das Kraftwerk einschließlich der Stadt Tschernobyl vollständig evakuiert. Weitere Umsiedlungen aus entfernteren Gebieten folgten, so daß die Zahl der umgesiedelten Personen fast 400.000 erreichte. Ein Teil dieser Menschen aus weniger belasteten Ortschaften konnte aber später wieder zurückkehren ([3], S. 86).

Entsprechend ihrer unterschiedlichen radioaktiven Belastung wurden 1986 die betroffenen Gebiete der Ukraine, Rußlands und Belorußlands in drei Kategorien eingeteilt (Tabelle 2). In den Gebieten der strikten Kontrolle, die sofort evakuiert wurden, überstieg die anfängliche Strahlenexposition der Bevölkerung durch Cs-137 die natürliche Strahlendosis um mehr als das Doppelte. Die beiden anderen Zonen unterliegen besonderen Kontrollen, erfordern aber in der Regel keine ständige Umsiedlung.

Parallel zu den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung wurde mit einem ungeheuren Aufwand an Material und Menschenkraft daran gearbeitet, die Quelle der radioaktiven Verseuchung, den zerstörten Reaktorblock, durch einen riesigen "Sarkophag" von der Umwelt zu isolieren und die unmittelbare Umgebung des Kraftwerks zu dekontaminieren, damit dort die Einsatzkräfte ("Liquidatoren") und das Personal der unbeschädigt gebliebenen und weiter arbeitenden Kraftwerksblöcke sich aufhalten konnten. Die damit einhergehende berufsbedingte Strahlenbelastung der Beschäftigten mußte durch dosimetrische Kontrolle und notfalls auch durch Personalrotation in Grenzen gehalten werden, um gesundheitliche Schäden soweit wie möglich zu vermeiden.

Tabelle 2

Kontaminationszonen	1	2	3
Belastung durch Cs-137	185 - 555 kBq/m <sup>2</sup>	555 - 1.480 kBq/m <sup>2</sup>	über 1.480 kBq/m <sup>2</sup>
Strahlendosis	bis zu 2 mSv/a	bis zu 5 mSv/a	über 5 mSv/a
Maßnahmen	keine Evakuierung, regelmäßige Kontrolle der Strahlensituation	zeitweise Evakuierung, Rücksiedlung möglich, ständige Kontrolle, Verzehrverbot angebaute Nahrungsmittel	sofortige Evakuierung, dauernde Umsiedlung, Zutrittsverbot und strikte Kontrolle
Betroffene Flächen	14.097 km <sup>2</sup>	7.150 km <sup>2</sup>	3.250 km <sup>2</sup>
Einwohner	544.300	234.000	33.800

*Umweltbelastung durch Radioaktivität: Mit Cs-137 kontaminierte Gebiete in der Ukraine, Rußland und Belorußland. (Nach Angaben in [4] und [3])*

### 3. Gesundheitliche Folgen für die betroffenen Menschen

Seit langem weiß man, daß hohe Dosen ionisierender Strahlung Menschen und andere Lebewesen schädigen oder sogar töten können. Als Maßstab für die physikalische Wirksamkeit ionisierender Strahlung gilt die in dem absorbierenden Stoff durch die Strahlung deponierte Energie: 1 Gray (Gy) entspricht einem Joule pro kg. Die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlungsarten für den menschlichen Körper kann durch entsprechende Faktoren berücksichtigt werden, woraus aus dem Gray die Maßeinheit Sievert (Sv) für die biologische Strahlendosis wird, die dem gesamten Strahlenschutz zugrundeliegt. Die natürliche Strahlenbelastung, der die Menschen immer ausgesetzt sind, beträgt mindestens zwei mSv/a, kann diesen Betrag je nach Wohnort auch um das mehrfache überschreiten. Tausendmal größere Dosen rufen akute Strah-

lenkrankheit hervor, die oberhalb von fünf Sv tödlich verlaufen kann. Langzeitschäden, insbesondere eine erhöhte Krebsinzidenz, sind schon bei wesentlich geringeren Dosen möglich.

Mit der Entwicklung der Kerntechnik entstand eine ausgefeilte dosimetrische Meßtechnik und ein international abgestimmtes Regelwerk für maximal zulässige Strahlenexpositionen durch kerntechnische Anlagen, einerseits für die berufsbedingt damit umgehenden Personen und andererseits für die allgemeine Bevölkerung. Bei der Anwendung dieser Regeln hat sich das ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Attainable) durchgesetzt, so daß im Normalbetrieb die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte zumeist weit unterschritten und nur in wenigen Einzelfällen erreicht oder überschritten werden. Die Umwelt-Strahlungsbelastung durch den normalen Betrieb der Kerntechnik liegt auf Grund dieser Schutzmaßnahmen weit unter 1 % des durch die natürliche Radioaktivität und die kosmische Strahlung verursachten Pegels.

Der Tschernobyl-Unfall war aber eine Katastrophe größten Ausmaßes, bei der sämtliche Schutzbarrieren durchbrochen wurden. Es sind kaum Bedingungen denkbar, unter denen ein noch größerer Teil des radioaktiven Inventars eines Reaktors, das am Ende einer Betriebsperiode seine maximale Größe erreicht hatte, in die Umgebung gelangen könnte. Insofern kann Tschernobyl durchaus als Maßstab für den "Größten hypothetischen Unfall" gelten, dessen Risiken und die zu ziehenden Lehren an der Wirklichkeit überprüfbar geworden sind.

Die Auswirkungen waren tatsächlich schrecklich. 135.000 Bewohner der engeren Umgebung mußten in den ersten Tagen nach dem Unfall evakuiert werden, weitere hunderttausende wurden in den folgenden Monaten und Jahren aus entfernteren höher belasteten Gebieten umgesiedelt. Etwa 10.000 Quadratkilometer Land sind engere Kontrollzonen, in denen die zusätzliche Strahlenexposition der Einwohner mehr als die natürliche Intensität beträgt (mehr als 2 mSV pro Jahr).

Die sozialökonomischen, sozialpsychologischen und damit auch gesundheitlichen Auswirkungen der Massenumsiedlung einer bodenständigen Bevölkerung unter der verschärfenden Bedingung der beginnenden Agonie der Sowjetmacht mußten allein schon gewaltig sein. Diese sind, aber wie sich zeigte hauptsächlich auf indirekte Weise, der radioaktiven Verseuchung großer Gebiete anzulasten, denn der Grund für die Umsiedlungen war ja, die Menschen vor einer möglicherweise gefährlich hohen Strahlenexposition zu schützen.

## 5. Die Strahlungsoffer, Wirklichkeit und Mythos

Durch intensive Arbeit einer Vielzahl internationaler Expertenteams der WHO und anderer Organisationen wurden die unmittelbar durch Strahlungseinwirkung auf den menschlichen Organismus verursachten Todesfälle und Gesundheitsschäden erfaßt und Prognosen über mögliche Spätschäden gegeben [1], [2], [6]:

Als der Unfall geschah, wurden die 444 Beschäftigten am Reaktorstandort hohen Strahlendosen ausgesetzt. Zwei von ihnen starben sofort. Etwa 300 wurden in Krankenhäuser eingewiesen, und bei 134 wurde eine akute Strahlenkrankheit diagnostiziert. Davon starben 28 innerhalb der ersten drei Monate. Von den Beschäftigten, die sich von der akuten Strahlenkrankheit erholten, litten etwa 30 % an verschiedenen gesundheitlichen Störungen.

Eine besondere Gruppe stellen die ca. 200.000 Menschen dar, die als "Liquidatoren" unter Strahlungseinwirkung zeitweilig an den Arbeiten zur Eindämmung der Folgen des Unfalls, z.B. beim Bau des Sarkophags, beteiligt waren. Nach den erfaßten radiologischen Daten erhielten diese Personen in der Regel Ganzkörperdosen von 50 - 250 mSv, wobei die Belastung der Einsatzkräfte in den ersten Tagen vermutlich größer war. Bei den Liquidatoren gibt es bisher keine Erkenntnisse über einen Anstieg typischer Folgewirkungen durch die Strahlenexposition wie Leukämie, Schilddrüsenkrebs oder andere Tumore, jedoch erhöhte sich die Anfälligkeit gegenüber anderen Krankheiten ohne direkten Bezug zur Strahlungsexposition.

Offensichtliche Spätfolgen der Strahlenwirkung auf die Bevölkerung sind bisher nur im verstärkten Auftreten von Schilddrüsenkrebs bei Personen beobachtet worden, die zur Zeit des Unfalls Kinder waren. Während der ersten Wochen nach dem Unfall war radioaktives Jod mit einer Halbwertszeit von acht Tagen, das sich bei Inkorporation sehr stark in der Schilddrüse anreichert, das gefährlichste Radionuklid. Es wird berichtet, daß mehr als fünf Millionen Menschen Jodtabletten als Schutzmaßnahme erhielten (um die Aufnahme von radioaktivem Jod zu blockieren), aber eine große Zahl von Kindern erhielt diese Tabletten nicht.

Mehr als 50.000 Kinder, die nach 1971 und vor 1987 geboren wurden und in kontaminierten Gebieten lebten, wurden untersucht und mit Kindern in nicht kontaminierten Gebieten verglichen, weil schwere Schilddrüsenerkrankungen befürchtet wurden. Dabei wurden zwischen 1986 und

1994 insgesamt 565 Fälle von Schilddrüsenkrebs diagnostiziert. Dies entspricht, je nach dem Grad der Kontamination der betroffenen Gebiete, einer Zunahme der Inzidenzrate auf das Acht- bis 100-fache des normalen Wertes (ein Fall auf eine Million Kinder). Glücklicherweise ist dieser Krebs relativ gut heilbar.

Die Aussagen zu weiteren möglichen Spätschäden sind:

Es gab keinen signifikanten Anstieg der Inzidenz von Leukämie und anderen Blutkrankheiten. In Anbetracht der kurzen Zeitspanne für die Studie war dies zu erwarten. Da jedoch der Höhepunkt der Inzidenz von Blutkrankheiten nach mehr als 10 Jahren nach dem Unfall auftreten kann, sind für diese Krankheiten Langzeitstudien erforderlich.

Es gibt Anzeichen für die Annahme, daß Störungen der geistigen Entwicklung und Störungen in der Verhaltensweise und den emotionalen Reaktionen einer kleinen Gruppe von Kindern aufgetreten sind, die in utero strahlenexponiert wurden. Inwieweit Strahlung zu diesen psychologischen Störungen beigetragen hat, kann nicht bestimmt werden, da die individuellen dosimetrischen Daten fehlen.

Bei der im Anschluß an die Katastrophe intensivierten medizinischen Betreuung aller betroffenen Personengruppen wurde eine statistisch erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten festgestellt, die keinen Zusammenhang mit der Strahlungsbelastung erkennen lassen. Dazu heißt es in [6]:

"Die psychosozialen Wirkungen, von denen angenommen wird, daß sie mit einer direkten Strahlenexposition nicht in Beziehung stehen, ergaben sich aus dem Mangel an Information sofort nach dem Unfall, Streß und Trauma der Zwangsumsiedlung in weniger kontaminierte Gebiete, dem Bruch sozialer Bindungen in der Gemeinschaft, und der Angst, daß die Strahlenexposition gesundheitliche Spätschäden verursachen könnte.

Der unmittelbare psychologische Eindruck glich dem von Naturkatastrophen wie Erdbeben, Bränden oder Überschwemmungen. ... Nationale Gesundheitsregister verzeichneten eine signifikante Erhöhung bei vielen Krankheiten, die nicht mit Strahlung im Zusammenhang stehen. ... Da es derzeit nicht genügend Beweise dafür gibt, daß diese Krankheiten strahleninduziert sind, ist es möglich, daß solche Probleme aus dem beträchtlichen psychologischen Streß durch den Unfall resultieren."

1991 - 1993 wurde von Wissenschaftlerteams aus Deutschland ein Meßprogramm zur Bestimmung der Strahlenexposition der Bevölkerung in

den hochkontaminierten Gebieten um Tschernobyl durchgeführt, wobei mehr als 300.000 Personen erfaßt wurden. Die Meßergebnisse haben gezeigt, daß etwa 98 % dieser Personen eine unbedenkliche Strahlenexposition aufweisen. Ein erhöhtes Gesundheitsrisiko ist für diese Menschen auszuschließen. In 2 % aller Fälle wurden Aktivitäten nachgewiesen, die eine jährliche Strahlenbelastung im Bereich der beruflich strahlenexponierten Personen erwarten lassen, ohne jedoch die dafür geltenden Grenzwerte zu erreichen (Bericht von R. Hille in [2], S. 87).

Die hier aufgezählten überprüften Fakten bestätigen die Kenntnisse, die man auch vor dem Unfall über die gesundheitlichen Folgen von Strahlungseinwirkung hatte, sie stimmen allerdings wenig mit dem in der Öffentlichkeit weit verbreiteten Bild von den in die Hunderttausende gehenden "Strahlenopfern" überein. Sie widerlegen vielmehr die oft hysterische Züge tragende Angst auch vor der geringsten Berührung mit Strahlung und allem, was mit "Atom" zu tun hat.

So geisterte im April 1995 eine Meldung durch die internationale Presse, in der von 125.000 Todesfällen infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl berichtet wurde. Diese vom Gesundheitsministerium der Ukraine genannte Zahl meinte aber die Gesamtzahl aller Todesfälle zwischen 1988 und 1994 in der betroffenen Bevölkerung von etwa 2,5 Millionen und liegt im Bereich der gesamten normalen Todesrate. Die tatsächlich direkt und indirekt durch den Unfall verursachten Todesfälle sind auch ohne solche wahnwitzigen Übertreibungen schlimm genug.

In der BRD gab es 1986 eine Vielzahl hysterischer Reaktionen auf den radioaktiven Fallout aus Tschernobyl, der selbst im am stärksten betroffenen Süddeutschland nicht einmal 10% zur natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung beitrug. Eine Auswahl davon wurde von Müller-Ullrich in seinem Buch über "Medienmärchen" unter der Überschrift "Tschernobyl - Der Medien-GAU" beschrieben [7].

Ein besonders abstruses Beispiel war das Problem der "Strahlenmolke": Wegen der Kontamination der bayrischen Weiden mit Cs-137 war die Milch entsprechend radioaktiv belastet und wurde deshalb zu Käse verarbeitet, wobei sich die Aktivität in dem dabei anfallenden Molkepulver zu etwa 5000 Bq/kg anreicherte. Was sollte damit geschehen? Die Strahlenschutzkommission hatte keine Bedenken, dieses Produkt wie üblich als Futtermittel in der Rinder- und Schweinezucht einzusetzen. Auch gegen eine Verwendung als Bodendünger bestanden unter Strahlenschutzgesichtspunkten keine Bedenken. Weite Teile der ideologisch

aufgeheizten deutschen Öffentlichkeit waren jedoch nicht bereit, die Überlegungen der SSK zur Kenntnis zu nehmen.

So wurden 5000 Tonnen dieser "gefährlichen" Fracht wochenlang, gehetzt von den Medien, in Güterwagen durchs Land gefahren, bis sie beschlagnahmt und unter dem Schutz der Bundeswehr eingelagert wurden. Schließlich baute man zur Beruhigung der Öffentlichkeit im stillgelegten Kernkraftwerk Lingen eine spezielle Anlage zur "Entseuchung" des Pulvers. Bis 1990 war diese Aufgabe geschafft und das von der Radioaktivität befreite Produkt konnte für 600.000 DM als Tierfutter verkauft werden. Gekostet aber hatte die Aktion die Steuerzahler 100 Millionen DM (E. Oberhausen, D. Gumprecht, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission, [2], S.153).

Zur Einschätzung der vermeintlichen Gefahr, die von der Strahlenmolke ausging, genügt der Vergleich mit Kalidünger. Das natürliche Element Kalium, dessen Gewichtsanteil in der Erdkruste 2,4 % beträgt, hat seit seiner Entstehung vor der Bildung des Sonnensystems das radioaktive Isotop K-40 mit einer Halbwertszeit von 1,3 Milliarden Jahren. Kalidünger (K<sub>2</sub>O), den man in jedem Gartenmarkt kaufen kann, erhält dadurch eine spezifische Aktivität von 25.000 Bq/kg, die also dem fünffachen der Aktivität der Strahlenmolke entspricht. Ein erwachsener Mensch enthält ca. 140 g Kalium in seinem Körper, also etwa ebensoviel an K-40-Aktivität wie ein Kilogramm Strahlenmolke an Cs-137-Aktivität. Hinzu kommt, daß die chemischen und radiobiologischen Eigenschaften von K-40 und Cs-137 ähnlich, die von ihnen pro Bequerel auf den Menschen ausgeübten Wirkungen also vergleichbar sind.

Eine ausgezeichnete Darstellung der radiologischen Konsequenzen von Tschernobyl und ihre verzerrte Wahrnehmung durch die Öffentlichkeit hat A.J. Gonzáles in seinem Vortrag "The Radiological Consequences of Chernobyl: A Saga Towards the Truth?" ([2], S.23) gegeben. Ich möchte hier seinen Epilog im Original zitieren:

"As the end of the saga on the Chernobyl consequences seems to be approaching, some reflections are in order. A major responsibility of contemporary radiation protection science is to show the Chernobyl consequences in the proper light. The facts stated should be represented as true rather than fiction. This will not be an easy task. The media's fable of Chernobyl has already raised his head. It has been fuelled by local political interest, scandalmongers and sensation hunters. A catastrophe as Chernobyl had to have far-reaching consequences: the fact that it may

have had relatively modest health consequences was simply undesired news, particularly in the atmosphere of *glasnost* and *perestroika*. Scientists nonetheless have the obligation to write the facts as they are and these should be readable at least twice rather than grasped all at once. They must stick to the stable truth and avoid the temptation of considering the truth as a fluid. If the scientist persists, the truth about Chernobyl will finally emerge."

## 6. Die Zukunft der Kernenergie

Zweifellos markiert Tschernobyl eine Zäsur in der weltweiten Entwicklung der Kernenergetik. Deren Perspektive kann nur dann Bestand haben, wenn in Zukunft Unfälle vergleichbarer Dimension mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können. Die Katastrophe wurde durch eine sehr unglückliche Kombination physikalisch-technischer Unzulänglichkeiten der Reaktorkonstruktion, einer inkompetenten Betriebsführung und der vollkommenen Vernachlässigung sicherheitstechnischer Aspekte bei der Planung und Durchführung eines riskanten Experiments verursacht. Daraus sind kurz-, mittel- und langfristig die Lehren zu ziehen.

Bei den noch arbeitenden RBMK-Reaktoren im Bereich der früheren Sowjetunion wurde kurzfristig durch Veränderungen der Steuer- und Regeltechnik und eine Erhöhung der Brennstoffanreicherung die Beherrschung des Voideffekts wesentlich verbessert, die Gefahr einer promptkritischen Leistungsexkursion damit wirksam reduziert. Mittelfristig sollen auch die noch intakten beiden anderen Blöcke des KKW Tschernobyl stillgelegt werden. Langfristig werden sicher keine weiteren Reaktoren dieses Typs gebaut werden.

International haben die meisten KKW mit Wasser moderierte und gekühlte Reaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren). Hier hat der Voideffekt negatives Vorzeichen und verhindert damit in jedem Betriebszustand eine spontane Leistungsexkursion. Das größte Sicherheitsrisiko stellt bei dieser Variante der Störfall Kühlmittelverlust dar, da dieser zum Schmelzen der Brennstoffelemente führen kann. Bei den gegenwärtigen Konstruktionen sind Szenarien nicht völlig auszuschließen, die zu einer Durchbrechung des äußeren Reaktorcontainments und damit zur Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt führen könnten. Bei dem einzigen bisherigen Unfall dieser Art (Harrisburg 1978) konnte allerdings diese

Konsequenz verhindert werden. Mit einer Vielzahl probabilistischer Sicherheitsanalysen der konkreten Auslegungsvarianten wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit eines auslegungsüberschreitenden Kernschmelzunfalls abgeschätzt. Beim gegenwärtigen Stand der Technik entspricht diese hypothetische Eintrittswahrscheinlichkeit einem solchen Ereignis auf 100.000 Reaktorbetriebsjahre. Bei Weiterentwicklung der gegenwärtigen Technologie mit dem Ziel, auch den Kernschmelzunfall innerhalb des äußeren Containments sicher zu lokalisieren (Konzept Europäischer Druckwasserreaktor) wäre das Risiko der Katastrophe dann sicher kleiner als 1 Fall auf einige Millionen Reaktorbetriebsjahre. Es gibt übrigens auch Reaktorkonzepte, wie z.B. den bereits erprobten gasgekühlten Hochtemperaturreaktor, bei denen auch beim vollständigen Ausfall aller Sicherheitseinrichtungen ein Kernschmelzunfall prinzipiell nicht möglich ist. Leider wurde in der BRD diese perspektivreiche Entwicklung abgebrochen.

Die weitere Erhöhung der technischen Sicherheit von Kernkraftwerken weit über den Stand vor Harrisburg und Tschernobyl hinaus ist also keine ferne Utopie. Unabdingbare Voraussetzung aber ist und bleibt außerdem eine hohe Sicherheitskultur im Management sowie fachliche Kompetenz und Verlässlichkeit derjenigen Menschen, denen der Umgang mit dieser sensiblen Technik anvertraut ist.

Es gibt viele Untersuchungen über die mit verschiedenen Energietechnologien verbundenen Risiken für die unmittelbar Beschäftigten und die Bevölkerung im allgemeinen, in denen z.B. die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen durch Unfälle und Katastrophen, typische berufsbedingte Erkrankungen und schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, bezogen auf eine bestimmte Elektroenergieproduktion pro Jahr, abgeschätzt wird. Bei allen Unsicherheiten solcher Abschätzungen ergeben sich regelmäßig für die Kernenergie kleinere Risiken im Vergleich etwa zu Kohle- oder Wasserkraftwerken. Nimmt man noch die Risiken einer möglicherweise drastischen Klimaänderung durch den Treibhauseffekt für das gesamte Leben auf dem Planeten Erde hinzu, dann kann beim Risikovergleich mit Kernenergie nicht unbeachtet bleiben, daß sie zum Treibhauseffekt keinen Beitrag leistet. Ihre Kombination mit Wasserkraftwerken und verstärkter Nutzung anderer Verfahren der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen eröffnet mit den heute bereits etablierten Technologien die Möglichkeit, den Elektroenergiebedarf ohne Emission von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen zu decken [8]. Frankreich, Schweden und die Schweiz sind diesem Ziel schon sehr nahe gekommen.

## Literatur

1. Ten Years After Chernobyl: What Do We Really Know? Based on the proceedings of the IAEA/WHO/EC International Conference, Vienna, April 1996 (Broschüre der Division of Public Information der IAEA)
2. A. Bayer, A. Kaul, Chr. Reiners (Hsg.), Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz, Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, München, 6.-7. März 1996, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1996
3. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Hsg.), Tschernobyl - Zehn Jahre danach. Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, Köln, Februar 1996
4. W.G. Berjachtar (Hsg.), Die Tschernobyl-Katastrophe, Naukowa Dumka, Kiew 1995 (russ.)
5. Nuclear Wastelands. A Global Guide to Nuclear Weapons Production and its Health and Environmental Effects. The MIT Press, Cambridge u. London 1995, p. 418
6. Health Consequences of the Chernobyl Accident. Results of the IPHECA Projects and related national programmes. Summary report. 1995
7. B. Müller-Ullrich, Medienmärchen - Gesinnungstäter im Journalismus, Karl Blessing Verlag, München 1996
8. K.F. Alexander, Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weltenergiewirtschaft, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 5 (1995) H.5, S.29