



# Gefährdung deutscher Atomkraftwerke durch den Absturz von Verkehrsflugzeugen

Dr. Helmut Hirsch, wissenschaftlicher Berater

Hannover, November 2001

## Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung .....	2
2	Gebäude und Einrichtungen eines Atomkraftwerkes .....	2
3	Schutzstandards für die Gebäude eines Atomkraftwerks .....	4
4	Belastungen beim Absturz eines Verkehrsflugzeugs:.....	6
5	Folgen eines Absturzes: .....	7
6	Gegenmaßnahmen – Schutz durch Abschalten? .....	9
7	Andere Gegenmaßnahmen .....	12

# 1 Einleitung

Der Absturz eines Verkehrsflugzeugs auf ein Atomkraftwerk war vor dem 11. September 2001 ein in den Köpfen der Verantwortlichen nahezu nichtexistenter Risikofaktor. Nicht nur Atomkraftwerks-Betreiber, auch Vertreter von Sachverständigenorganisationen hatten ein solches Ereignis unter ‚extrem unwahrscheinlich‘ abgelegt.

„Fakt ist aber auf jeden Fall, dass für sonstige Flugzeuge, also diese Großraumflugzeuge und so etwas, die Absturzwahrscheinlichkeiten viele Größenordnungen niedriger [als jene von Kampfflugzeugen] liegen ...“ – dieser Aussage des Vertreters einer wichtigen Gutachterorganisation vor knapp zwei Jahren hätte wohl kaum jemand widersprochen<sup>1</sup>. Da die Absturzwahrscheinlichkeit eines Militärflugzeugs bei etwa 1 : 1 Million bis 1 : 10 Millionen pro Jahr und Atomkraftwerksstandort angenommen wurde, folgt daraus, dass ein großes Verkehrsflugzeug eine jährliche Absturzwahrscheinlichkeit von etwa 1 : 1 Billion (1 : 1.000.000.000.000) haben müsste, eine winzige Zahl, praktisch von Null nicht zu unterscheiden.

Nun ist schlagartig die Frage aktuell geworden, was eigentlich passieren kann, wenn ein Verkehrsflugzeug auf ein Atomkraftwerk stürzt – sei es unfallbedingt oder bewusst herbeigeführt.

Um einen ersten Versuch einer Antwort zu geben, wird in der Folge nach einer Bestandsaufnahme der Gebäude und Einrichtungen, die zu einem Atomkraftwerk gehören, sowie ihres Sicherheitsstandards in Deutschland untersucht werden, welche Belastungen im Falle eines Absturzes einer mittleren oder großen Maschine auftreten und zu welchen Unfallabläufen sie führen können. Schließlich wird auch die Frage diskutiert, welche Gegenmaßnahmen denkbar wären, insbesondere solche, die innerhalb relativ kurzer Zeit ohne besonderen technischen Aufwand durchgeführt werden können.

Die Bundesrepublik Deutschland war lange Zeit ein Frontstaat des Kalten Krieges, mit einer hohen Flugdichte an Militärflugzeugen. Dies widerspiegelt sich in den geforderten Sicherheitsstandards gegen Flugzeugabsturz. Diese beziehen sich lediglich auf Militärflugzeuge; die Standards sind aber jedenfalls im westeuropäischen Vergleich eher hoch.

Dennoch ist, wie sich zeigt, der Schutz gegen den Absturz von Verkehrsflugzeugen auch in Deutschland äußerst mangelhaft – selbst bei den modernsten und relativ am besten geschützten Anlagen. Es ist zu befürchten, dass diese Einschätzung in verstärktem Maße auf die anderen EU-Staaten und die Staaten in Mittel- und Osteuropa zutrifft, die Atomkraftwerke betreiben.

## 2 Gebäude und Einrichtungen eines Atomkraftwerkes

Das Gelände eines Atomkraftwerkes umfasst mehrere Zehntausend Quadratmeter. Das Herzstück der Bauwerke auf dieser Fläche ist das Reaktorgebäude, das, wie der Name sagt, den

---

<sup>1</sup> Aussage des Sachverständigen Dr. Rinkleff, TÜV Hannover/Sachsen-Anhalt, auf dem Erörterungstermin für das Standort-Zwischenlager Lingen, 17.12.1999 (lt. Wortprotokoll, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2000, S. 3-49)

Reaktor mit dem hochradioaktiven Kernbrennstoff sowie wichtigen Kühl- und Sicherheitseinrichtungen enthält.

Daneben gibt es weitere Gebäude und Einrichtungen von unterschiedlicher sicherheitstechnischer Bedeutung. Die wichtigsten sind, bei einem modernen Druckwasserreaktor<sup>2</sup>:

- Schaltanlagegebäude mit Kraftwerkswarte sowie den zentralen elektrischen und elektronischen Anlagen
- Reaktorhilfsanlagegebäude mit Wasserreinigungs- und Lüftungsanlagen
- Maschinenhaus mit Turbine und Generator
- Transformatorenstation mit Netzeinspeisung und Eigenbedarfs-Transformator
- Notstromgebäude mit Notstromdieseln und Kaltwasserzentrale
- Notspeisegebäude mit Einrichtungen zur Notbespeisung der Dampferzeuger (d.h. Kühlung des Reaktors über den sekundären Kühlkreislauf) einschl. Notsteuerstelle
- Abluftkamin
- Werkstatt- und Sozialgebäude
- Kühltürme (bei Rückkühlung)
- Kühlwasserentnahme- und Rückgabebauwerke

Die Gegebenheiten bei Siedewasserreaktoren sind ähnlich. Allerdings verfügen diese über keine Notspeisegebäude, da sie nur einen Kühlkreislauf und somit keine Dampferzeuger aufweisen.

Das Reaktorgebäude enthält sehr große Mengen radioaktiver Stoffe – typischerweise rd. 100 Tonnen Kernbrennstoff im Reaktor und bis zu einige 100 Tonnen in einem Lagerbecken für abgebrannten Brennstoff. Es ist daher mit Abstand der kritischste und am besten vor einem Flugzeugabsturz zu schützende Bereich.

Bei den anderen Bauwerken wurde bisher überwiegend davon ausgegangen, dass bei einem Flugzeugabsturz nur eine für die Sicherheit wichtige Einrichtung zerstört wird, da es sich um eine punktuelle Einwirkung handelt. Eine solcher Fall soll auslegungsgemäß beherrscht werden.

So kann beispielsweise bei Ausfall der Elektrizitäts-Eigenbedarfsversorgung über den entsprechenden Transformator die Notstromversorgung mit Dieselgeneratoren einspringen. Bei Zerstörung der Warte mit den wichtigen Leit- und Kontrolleinrichtungen sollten die Einrichtungen des Notspeisegebäudes in der Lage sein, die minimal erforderlichen Sicherheitsfunktionen (Wärmeabfuhr aus dem Reaktor) zu gewährleisten.

Bei modernen Siedewasserreaktoren wird davon ausgegangen, dass bei Ausfall der Warte die mindestens erforderlichen Funktionen von Notsteuerstellen innerhalb des Reaktorgebäudes aus gewährleistet werden können.

---

<sup>2</sup> Alle 19 in Deutschland laufende Atomkraftwerke sind Leichtwasserreaktoren, d.h. mit Wasser gekühlte und moderierte Reaktoren. 13 davon gehören zum Typ Druckwasserreaktor (zwei Kühlkreisläufe zwischen Reaktor und Turbine, die durch Dampferzeuger verbunden sind), 6 zum Typ Siedewasserreaktor (ein Kühlkreislauf zwischen Reaktor und Turbine).

### 3 Schutzstandards für die Gebäude eines Atomkraftwerks

#### Reaktorgebäude:

Das Reaktorgebäude, und damit der Schutz für das radioaktive Inventar, weist bei den deutschen Atomkraftwerken sehr unterschiedliche Standards auf.

Bei den ältesten Anlagen wurde kein spezieller Schutz gegen Flugzeugabsturz gefordert. Die Wanddicke des Reaktorgebäudes liegt bei rd. 60 cm Stahlbeton. Dies ist allenfalls ausreichend, dem Absturz eines leichten, langsam fliegenden Flugzeugs (z.B. eines Sportflugzeugs, Masse maximal 10 t, Geschwindigkeit unter 300 km/h) standzuhalten.

Einige Altanlagen sind mit einer Wandstärke von 80 – 100 cm etwas besser geschützt. Diese Auslegung soll ausreichend sein, um dem Absturz eines Starfighter-Kampfflugzeugs<sup>3</sup> standzuhalten, bei einer Masse von ca. 10 t und einer Tieffluggeschwindigkeit von 650 km/h.

Die zehn neuesten Atomkraftwerke in Deutschland sind gemäß einer 1981 in Kraft getretenen Leitlinie der Reaktorsicherheitskommission<sup>4</sup> gegen den Absturz eines Militärflugzeugs ausgelegt, das eine Masse von 20 t aufweist und im Tiefflug 774 km/h erreicht. Dies entspricht etwa dem Absturz eines Phantom-Kampffjets<sup>5</sup>.

Neben dem direkten Aufprall wird dabei auch der Trümmerflug und die Wirkung eines möglichen Treibstoffbrandes berücksichtigt.

Im Einzelnen ergibt sich folgendes Bild<sup>6</sup>:

<b>AKW</b>	<b>Typ</b>	<b>Leistung (netto)</b>	<b>Bau- beginn</b>	<b>Betriebs- beginn</b>	<b>Auslegungs- Kategorie</b>
Obrigheim	DWR	340 MWe	1965	1968	Sportflugzeug
Stade	DWR	640 MWe	1967	1972	Sportflugzeug
Biblis A	DWR	1.167 MWe	1970	1974	Sportflugzeug
Brunsbüttel	SWR	771 MWe	1970	1976	Sportflugzeug
Philippshurg-1	SWR	890 MWe	1970	1979	Sportflugzeug
Biblis-B	DWR	1.240 MWe	1972	1976	Starfighter
Neckar-1	DWR	785 MWe	1972	1976	Starfighter

<sup>3</sup> F-104, ein von Lockheed entwickeltes Kampfflugzeug. In den 60er und 70er Jahren waren in der Bundesrepublik Deutschland knapp 1000 Starfighter verschiedener Varianten im Einsatz.

<sup>4</sup> RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren; 3. Ausgabe vom 14. Oktober 1981, zuletzt geändert bzw. berichtigt 1996

<sup>5</sup> F-4E, ein von McDonnell Douglas entwickeltes Kampfflugzeug, seit 1974 in der Bundesrepublik Deutschland im Einsatz.

<sup>6</sup> Diese Tabelle wurde aus veröffentlichten Unterlagen sowie anhand einer Recherche bei Behörden, AKW-Betreibern und anderen Institutionen erstellt.

Unterweser	DWR	1.345 MWe	1972	1978	Starfighter
Isar-1	SWR	878 MWe	1972	1977	Starfighter
Grafenrheinfeld	DWR	1.275 MWe	1974	1981	Phantom
Krümmel	SWR	1.260 MWe	1974	1983	Phantom
Brokdorf	DWR	1.370 MWe	1976	1986	Phantom
Grohnde	DWR	1.360 MWe	1976	1984	Phantom
Gundremmingen B	SWR	1.284 MWe	1976	1984	Phantom
Gundremmingen C	SWR	1.288 MWe	1976	1984	Phantom
Philippsburg-2	DWR	1.392 MWe	1977	1984	Phantom
Emsland	DWR	1.329 MWe	1982	1988	Phantom
Isar-2	DWR	1.400 MWe	1982	1988	Phantom
Neckar-2	DWR	1.269 MWe	1982	1989	Phantom

DWR Druckwasserreaktor  
SWR Siedewasserreaktor  
MWe Megawatt (elektrisch)

### Sonstige Gebäude:

Die Notspeisegebäude der neueren Druckwasserreaktoren sind wie die Reaktorgebäude gegen den Absturz eines Phantom-Kampfflugzeugs ausgelegt; die bloße räumliche Trennung von der Reaktorwarte wurde also in diesem Fall als nicht ausreichend angesehen. Ebenso ausgelegt sind die Rohrleitungen, die das Notspeisegebäude mit dem Reaktorgebäude verbinden.

Fast alle älteren Anlagen wurden mit Notstandssystemen nachgerüstet, die bei Zerstörung der Warte die gleiche Funktion ausüben wie die Systeme im Notspeisegebäude (bzw. bei Siedewasserreaktoren direkt die Einspeisung in den Kühlkreislauf sicherstellen sollen).

Diese Notstandssysteme sind im Allgemeinen nicht vollständig gegen Phantom-Absturz ausgelegt, da sie von der Reaktorwarte räumlich getrennt sind und nicht angenommen wird, dass sie gleichzeitig mit dieser zerstört werden können. So kann z.B. das Notstandssystem in Stade lediglich dem Trümmerflug standhalten, zu dem es bei einem solchen Absturz kommt, und nicht einem direkten Aufprall.

Die einzige Ausnahme sind die Blöcke in Biblis. Das Notstandssystem fehlt an diesem Standort. Bei einem Flugzeugabsturz auf einen Reaktor sollen seine Funktionen vom Reaktorgebäude des anderen aus gewährleistet werden – obwohl beide Blöcke nur in geringem Maße gegen Flugzeugabsturz gesichert sind und eine derartige Verknüpfung bei sicherheitstechnisch sehr wichtigen Funktionen als äußerst problematisch angesehen werden muss.

Alle anderen Gebäude sind auch bei modernen Anlagen allenfalls teilweise gegen Flugzeugabsturz geschützt.

## 4 Belastungen beim Absturz eines Verkehrsflugzeugs

Selbst bei den am besten geschützten deutschen Anlagen sind bei Flugzeugabstürzen Lasten möglich, die weit über die Beanspruchungen hinausgehen, gegen die sie ausgelegt sind.

Schon beim Absturz von Kampfflugzeugen kann der Aufprall heftiger sein, als bei einem Phantom-Jet. Eine Phantom ist zwar im Hinblick auf Masse und Geschwindigkeit mit modernen Kampfflugzeugen wie Eurofighter und MIG-29 vergleichbar<sup>7</sup>. Das Tornado-Mehrzweckkampfflugzeug<sup>8</sup> ist dagegen etwas schwerer.

Davon abgesehen wird bei der Auslegung gegen den Absturz eines Kampfflugzeugs nicht berücksichtigt, dass dieses eine Ladung scharfer Waffen (Bomben, Raketen, Munition) mit sich führen könnte. Es bedarf keiner weiteren Erläuterung, dass dadurch die Einwirkung sehr verstärkt werden kann.

Bei der Betrachtung von Verkehrsflugzeugen ergeben sich gegenüber Kampfjets völlig andere Dimensionen im Hinblick auf Masse und mitgeführte Treibstoffmengen.

In der folgenden Tabelle sind Daten für einige beispielhaft ausgewählte Verkehrsflugzeuge, im Vergleich mit dem Phantom-Kampfflugzeug zusammengestellt<sup>9</sup>:

Flugzeugtyp	Max. Startgewicht	Max. Treibstoffvorrat
F-4E Phantom II	26.309 kg	6.000 l +)
Boeing 737-600	65.090 kg	26.035 l
Boeing 747-400	396.890 kg	216.840 l
Boeing 767-400 ER	204.120 kg	90.770 l
Airbus A-320	77.000 kg	29.660 l
Airbus A-340-600	365.000 kg	194.880 l
Airbus A-380-F ++)	590.000 kg	310.000 l

+) Geschätzt; nur interne Tanks

++) Beim Airbus A-380 wird mit dem Beginn der kommerziellen Nutzung 2006 gerechnet. Alle anderen Flugzeugtypen sind bereits im Einsatz.

---

<sup>7</sup> Eurofighter EJ2000 Typhoon, gemeinsam von Deutschland, Großbritannien, Italien und Spanien entwickelt, zur Zeit in Auslieferung; Mikojan MIG-29, russisches Mehrzweckkampfflugzeug, in den 80er Jahren in der DDR geflogen und nach der Wiedervereinigung von der Bundesluftwaffe übernommen.

<sup>8</sup> Panavia Tornado IDS, gemeinsam von Deutschland, Großbritannien und Italien entwickelt, erste Auslieferung 1979.

<sup>9</sup> Nach Angaben der USAF ([www.af.mil](http://www.af.mil)), des Airbus-Konsortiums ([www1.airbus.com](http://www1.airbus.com)) sowie von Boeing ([www.boeing.com](http://www.boeing.com))

Bei der Diskussion der Auswirkungen des Absturzes eines großen Verkehrsflugzeugs sind folgende Punkte zu betrachten:

- Die mechanische Belastung des getroffenen Gebäudes (Stoßlast)
- Die Zerstörungen durch Trümmerflug
- Die Folgen eines Treibstoffbrandes

Die Stoßlast hängt von Masse und Geschwindigkeit des auftreffenden Flugzeugs ab, im Hinblick auf das Durchschlagen von Betonstrukturen auch von der Aufprallfläche (je kleiner die Fläche, desto konzentrierter und damit stärker die Wirkung).

Die größere Masse eines Verkehrsflugzeugs wirkt beim Auftreffen auf eine größere Fläche ein. Andererseits stellen die Triebwerke kompakte ‚Geschosse‘ dar, die eine Masse von mehreren Tonnen haben können. Die Aufprallgeschwindigkeit wird bei einem unfallbedingten Absturz voraussichtlich niedriger sein als die für den Phantom-Absturz gemäß den Leitlinien angenommene (um 400 km/h gegenüber 774 km/h), da mit unfallbedingten Abstürzen in erster Linie während der Start- und Landephase zu rechnen ist. Bei einem bewusst herbeigeführten Absturz, der mit einem schrägen Sturzflug aus größerer Höhe verbunden sein kann, müssen auch bei einem Verkehrsflugzeug größere Geschwindigkeiten angenommen werden (dies setzt allerdings entsprechende Fähigkeiten des Piloten voraus).

Insgesamt ist nach derzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass schon bei einem unfallbedingten Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs ein Durchschlagen des Reaktorgebäude – wenn es zentral getroffen wird – wahrscheinlich ist, auch wenn es sich um eine moderne Anlage mit Schutz gegen einen Phantom-Kampfjet handelt. Auch bei einem Verkehrsflugzeug mittlerer Größe (z.B. Airbus A-320) kann dies nicht ausgeschlossen werden. Dies gilt umso mehr bei einem zielbewussten Absturz bei höheren Geschwindigkeiten.

Belastbare Untersuchungen aus Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren, die dem Standard von Sicherheitsnachweisen im Sinne des Atomgesetzes entsprechen, liegen hierzu bisher nicht vor. Es handelt sich also um eine rein spekulative Aussage, wenn die Reaktorsicherheitskommission die Erwartung ausdrückt, dass ein modernes AKW den mechanischen Belastungen eines zufallsbedingten Absturzes einer Maschine mittlerer Größe standhalten kann<sup>10</sup>.

Im Hinblick auf Trümmerwirkung und Folgen von Treibstoffbränden ist offenkundig, dass sie beim Absturz eines mittleren oder großen Verkehrsflugzeugs weit über die Annahmen zum Phantom-Jet hinausgehen und somit sowohl bei älteren als auch bei neueren Anlagen schwere Schäden auf dem Gelände zu erwarten sind.

## 5 Folgen eines Absturzes

Bei den Folgen des Absturzes eines Verkehrsflugzeugs sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Schwere Schäden am Reaktorgebäude (d.h. Durchschlagen der Wand, Einwirkung von Trümmern und evtl. Treibstoffbrand im Inneren)

---

<sup>10</sup> 1. Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission (RSK) – Sicherheit deutscher Atomkraftwerke gegen gezielten Absturz von Großflugzeugen mit vollem Tankinhalt, verabschiedet auf der Sitzung am 11.10.2001 (www.bmu.de)

- Reaktorgebäude bleibt intakt oder wird nur leicht beschädigt, andere Gebäude auf dem Gelände werden zerstört, evtl. auch Schäden im Inneren des Reaktorgebäudes durch aufprallbedingte Erschütterungen.

Die Überlegungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf den Absturz auf einen laufenden Reaktor.

#### Schwere Schäden am Reaktorgebäude:

Das Reaktorgebäude enthält den Reaktor mit Primärkreislauf und Dampferzeugern (bei Druckwasserreaktoren; bei Siedewasserreaktoren einen Teil des Kühlkreislaufs, der zur Turbine führt), sowie die wichtigsten Sicherheitssysteme, insbesondere die Not- und Nachkühlsysteme sowie Kernflutssysteme (Siedewasserreaktor).

Wird die äußere Stahlbeton-Struktur des Gebäudes durch Flugzeugabsturz zerstört, kann auch die innere Stahlhülle (Containment) nicht standhalten. Das Containment ist gegen Einwirkungen von innen ausgelegt (Druckaufbau bei Bruch einer Rohrleitung) und hat keine hohe Widerstandskraft gegen Stöße von außen.

Es ist davon auszugehen, dass der Kühlkreislauf des Reaktors beschädigt wird und dass auch Sicherheitssysteme schwere Schäden erleiden. Bei großen Zerstörungen an den Rohrleitungen des Kühlkreislaufes oder am Reaktordruckbehälter selbst wäre es auch unerheblich, wenn die Notkühlsysteme noch funktionieren, da keine Möglichkeiten für wirksames Einspeisen mehr bestehen.

Dieser Fall führt somit in kurzer Zeit – innerhalb einer Stunde – zum Schmelzen des Reaktorkerns. Radioaktive Stoffe werden aus dem geschmolzenen Brennstoff freigesetzt und können, da Containment und Betonhülle zerstört sind, praktisch ohne Zeitverzögerung und damit auch ohne Rückhalteeffekte im Gebäude ins Freie gelangen. In allen Risikostudien wird ein solches Szenario – Kernschmelze bei offenem Containment – als die schlimmste denkbare Kategorie angesehen. Es führt zu besonders großen und besonders raschen Freisetzungen. Die Zeit, die für Maßnahmen des Katastrophenschutzes zur Verfügung steht, ist sehr kurz.

Die freigesetzten Mengen radioaktiver Schadstoffe können die beim Reaktorunfall von Tschernobyl abgegebenen erreichen und sogar noch übertreffen. Die Folge wäre eine nationale Katastrophe. Flächen in der Größenordnung von einigen 100.000 km<sup>2</sup> können langfristig derart verseucht werden, dass die Bevölkerung umgesiedelt werden muss.

#### Sonstige Schäden:

Bleibt das Reaktorgebäude weitgehend intakt, können Zerstörungen auf dem Standortgelände und durch den Absturz bedingte Erschütterungen im Inneren des Reaktorgebäudes selbst dennoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Kernschmelzunfall führen.

Beschränken sich die Schäden auf eine Einzige der sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen, so entsteht zwar eine Situation mit erhöhtem Risiko, die jedoch voraussichtlich beherrscht werden kann. Bei Ausfall der Elektrizitäts-Eigenbedarfsversorgung bzw. Netzanbindung springen die Notstromaggregate ein; bei Ausfall der Warte müsste es in den meisten Fällen möglich sein, über das Notspeisegebäude (bei Druckwasserreaktoren) den Reaktor in einen sicheren Zustand zu bringen.

Mag es beim Absturz eines kleinen Kampfflugzeugs allerdings noch als einigermaßen plausibel erscheinen, dass nur begrenzte Schäden auftreten, kann dies beim Absturz eines Verkehrsflugzeugs nicht mehr vorausgesetzt werden. Durch Trümmerwirkung und Brände sind weiter ausgebreitete Zerstörungen zu befürchten. Es ist anzunehmen, dass dadurch die Kühlung des Reaktors nicht mehr gewährleistet werden kann, auch wenn die Integrität des Kühlkreislaufes nicht beeinträchtigt wird.

So stehen beispielsweise bei gleichzeitigem Ausfall der Stromversorgung über Netz bzw. Eigenbedarfstransformator und der Notstromanlagen keine Kühlmittelpumpen mehr zur Verfügung. Bei gleichzeitiger Zerstörung von Warte und Notspeisegebäude kann eine Situation entstehen, in der die erforderlichen Systeme an sich noch einsatzfähig sind, aber nicht mehr gesteuert und kontrolliert werden können. Großräumige Zerstörungen auf dem Gelände können darüber hinaus bewirken, dass eine keine Zugangs- und damit Eingriffs- und Reparaturmöglichkeiten für das Personal mehr gibt, jedenfalls nicht innerhalb des erforderlichen Zeitraumes von wenigen Stunden.

Es kommt in diesen Fällen zur Kernschmelze. Die Folgen sind im Vergleich zum ersten Szenario etwas abgemildert. Das Containment wird, falls das Kernschmelzen mit Explosionen verbunden ist, innerhalb von ca. 10 Stunden versagen, andernfalls durch Überdruck innerhalb von Tagen. (Bei manchen Altanlagen ist in jedem Fall mit Versagen durch Durchschmelzen innerhalb einiger Stunden zu rechnen.) Die radioaktiven Freisetzungen verringern sich dadurch etwas, da es zur Kondensation von Radionukliden innerhalb des Gebäudes kommt. Für Maßnahmen des Katastrophenschutzes steht etwas mehr Zeit zur Verfügung.

Auch dieses zweite Szenario führt jedoch zu Freisetzungen, die denen von Tschernobyl vergleichbar sind, und entsprechenden weiträumigen katastrophalen Folgen.

Beide Unfallszenarien sind auch beim Absturz eines Verkehrsflugzeugs auf die modernsten und relativ am besten geschützten deutschen Atomkraftwerke möglich.

## **6 Gegenmaßnahmen – Schutz durch Abschalten?**

Das Grundproblem der Reaktorsicherheit besteht darin, dass wohl durch Schnellabschaltung die Kettenreaktion unterbrochen werden kann, nicht aber die Wärmeentwicklung durch die intensive Radioaktivität des Brennstoff (sogen. Zerfallswärme). Während des Betriebs trägt diese Radioaktivität ca. 7 % zur Gesamtleistung des Reaktors bei. Sie ist dafür verantwortlich, dass es beim Ausfall der Kühlung innerhalb kurzer Zeit zum Schmelzen des Kerns kommt. Nach dem Abschalten fällt sie, anfangs ziemlich rasch, ab.

Kurzfristige Gegenmaßnahmen zielen darauf hin, durch rechtzeitiges Abschalten die Zerfallswärme zu reduzieren und damit die Abläufe zur Kernschmelze zu verlangsamen.

Als konkrete Maßnahmen, die keine technische Nachrüstung erfordern und somit beim jetzigen Status der Anlagen jederzeit durchgeführt werden könnten, sind in Diskussion:

- Abschalten des Atomkraftwerkes, Herstellen des kalten, drucklosen Zustandes, Kernbrennstoff verbleibt im Reaktor
- Abschalten des Atomkraftwerkes, in kalten, drucklosen Zustand bringen, Ausladen des Kernbrennstoffes in des Lagerbecken im Reaktorgebäude

Es dauert etwa einen Tag, bis der Reaktor aus dem Betrieb in den Zustand ‚kalt und drucklos‘ übergeführt ist.

Bei schwerwiegenden Zerstörungen des Reaktorgebäudes, bei denen der Reaktordruckbehälter bzw. das Lagerbecken beschädigt wird und es zum raschen, kompletten Verlust des Kühlmittels kommt, sind diese Maßnahmen allerdings wenig wirksam bzw. ist es kaum möglich, Vorhersagen über ihre Wirksamkeit zu treffen.

Es ist in diesem Fall fraglich, ob Räumarbeiten in einer stark verstrahlten Umgebung so rasch möglich sind, dass noch Gegenmaßnahmen zur Kühlung des Kerns eingeleitet werden können – selbst wenn dafür Tage zur Verfügung stehen.

Allerdings ist festzuhalten, dass die Chancen für erfolgreiche Gegenmaßnahmen beim abgeschalteten Reaktor auf jeden Fall größer sind und zunehmen, je länger der Reaktor bereits im abgeschalteten Zustand war. Auch sind gegebenenfalls die radioaktiven Freisetzungen geringer, wenn kurzlebige Radionuklide (z.B. Jod-131) bereits weitgehend zerfallen sind.

Genauere Aussagen können für den Fall getroffen werden, dass zwar die Kühlsysteme ausfallen, der Kühlkreislauf jedoch im Wesentlichen intakt bleibt, so dass prinzipiell noch Zuspiesung von Wasser möglich ist. Das bedeutet, dass sich die Zerstörungen im Reaktorgebäude in Grenzen halten oder dieses Gebäude überhaupt nicht direkt betroffen ist.

Die entscheidende Frage in diesem Fall ist, wann das Kühlmittel, das die Brennelemente umgibt (mit einer Temperatur von ca. 40 – 50 ° C), durch die Zerfallswärme zu Sieden beginnt, und wie rasch es verdampft. Damit wird ein Zeitrahmen vorgegeben, innerhalb dessen Maßnahmen improvisiert werden können. Dieser wird natürlich durch die Zerfallswärmeleistung bestimmt.

Diese Wärmeleistung entwickelt sich im ersten Jahr nach dem Abschalten wie folgt, ausgedrückt in Prozent der thermischen Leistung des Reaktors während des Betriebs (bei einem Reaktor mit 1.300 MW elektrischer Leistung sind dies ca. 4.050 MW)<sup>11</sup>:

Unmittelbar nach Abschalten	7 %
Nach 1 h	1,5 %
Nach 24 h	0,65 %
Nach 10 d	0,3 %
Nach 100 d	0,1 %
Nach 1 Jahr	0,03 %

Der primäre Kühlkreislauf in einem modernen Druckwasserreaktor mit 1.300 MW elektrischer Leistung enthält im kalten, drucklosen Zustand ca. 400 t Wasser. Falls die Brennelemente im Reaktordruckbehälter verblieben sind und der Kühlkreislauf nicht wesentlich beschädigt wurde, steht diese Menge also zur Kühlung zur Verfügung.

---

<sup>11</sup> Die Angaben sind Näherungswerte. Veröffentlichte Zahlen hierzu sind z.B. zu finden in ‚Kernschmelzunfälle in deutschen Atomkraftwerken und ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt‘, Bürgerinitiative Umweltschutz Hannover, 1998

Zehn Tage nach Abschalten beginnt das Wasser im Primärkreislauf nach ca. 2 Stunden zu sieden; nach hundert Tagen innerhalb ca. 6 Stunden und nach einem Jahr nach etwa einem Tag.

Für das vollständige Verdampfen ist danach etwa die zehnfache Zeitspanne anzusehen<sup>12</sup>.

Es ist davon auszugehen, dass für Gegenmaßnahmen wie das Verlegen von Leitungen zur Wassereinspeisung bzw. das Heranschaffen von Notstromaggregaten u.a. unter den schwierigen Bedingungen, die nach dem Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs auf den Standort herrschen, Zeiten in der Größenordnung von einem Tag erforderlich sind.

Dementsprechend wäre zu fordern, dass mindestens ein Tag Karenzzeit gegeben ist, bevor die Situation im Reaktorgebäude kritisch wird. Wird diese Forderung dahingehend präzisiert, dass es erst nach einem Tag zum Sieden kommen darf (da nach Siedebeginn mit weiteren Erschwerungen bei den Gegenmaßnahmen zu rechnen ist, die vermieden werden sollen), bedeutet dies erforderliche Stillstandszeiten von rd. einem Jahr, um durch Abschalten einen nennenswerten Sicherheitsgewinn zu erzielen. Falls akzeptiert wird, dass Maßnahmen auch noch nach Siedebeginn durchgeführt werden können, ohne dass freilich mehr als ein kleiner Teil des Kühlmittelinventars verdampft, folgen erforderliche Stillstandszeiten, die immer noch in der Größenordnung von einem Vierteljahr liegen.

Die Erwärmung des Primärkreislaufs bei einem Druckwasserreaktor kann dadurch verlangsamt werden, dass Wärme über einen natürlichen Kreislauf zu den Dampferzeugern gelangt und über den Sekundärkreislauf abgeführt wird. Damit kann maximal, grob abgeschätzt, ein Faktor zwei gewonnen werden<sup>13</sup>. Es wäre jedoch problematisch, von diesem Zeitgewinn Kredit zu nehmen, da bei einem realen Unfall oder Terroranschlag nicht vorhergesehen werden kann, inwieweit der Sekundärkreislauf intakt bleibt.

Falls die Brennelemente aus dem Reaktor in das Lagerbecken ausgelagert werden, ergeben sich erheblich längere Karenzzeiten für Gegenmaßnahmen (aufgrund des größeren Kühlmittelinventars des Lagerbeckens etwa drei- bis viermal so lang wie beim Verbleiben im Reaktor).

Dies wird jedoch durch einige Nachteile erkauft:

- Das Umladen der Brennelemente nimmt mehrere Tage in Anspruch; während dieser Zeit ist das Atomkraftwerk besonders verwundbar.
- Die Kühlsysteme des Brennelementelagerbeckens weisen u.U. weniger Sicherheitsreserven auf. Bei Unfallszenarien, bei denen Kühlsysteme überhaupt noch zumindest teilweise funktionieren, ist also der Verbleib im Reaktor sicherer.
- Bei Siedewasserreaktoren liegen die Lagerbecken über dem Reaktor selbst, relativ hoch im Reaktorgebäude. Sie sind also besonders verwundbar für Einwirkungen von außen.

---

<sup>12</sup> Die Zeitspannen für Siedebeginn und Verdampfen wurden durch eigene Rechnungen ermittelt. Die Ergebnisse sind kompatibel mit entsprechenden Zahlen, die für das slowenische Atomkraftwerk Krsko abgeschätzt wurden (Stritar, A. et al.: Some Aspects of Nuclear Power Plant Safety under War Conditions; Nuclear Technology Vol 101, Feb. 1993, 193-201).

<sup>13</sup> Der sekundärseitige Wasserinhalt der vier Dampferzeuger eines modernen deutschen Druckwasserreaktors liegt in kaltem Zustand bei ca. 300 t.

- Die Lagerbecken sind im allgemeinen bereits mit größeren Mengen abgebrannten Brennstoffs beladen. Dessen Wärmeentwicklung ist relativ gering. Sie entspricht aber doch bei einer Beladung mit einigen 100 t etwa der oben angegebenen Nachzerfallswärme nach einem Jahr, fällt somit ins Gewicht, wenn nach dem Abschalten längere Zeiträume vergangen sind.

Grundsätzlich ist das Lagerbecken eine weitere Quelle von Freisetzungen bei einem schweren Flugzeugabsturz. Auch der dort befindliche ältere Brennstoff kann noch zum Schmelzen kommen. Die Karenzzeiten liegen allerdings im Bereich einiger Tage.

## 7 Andere Gegenmaßnahmen

Die Möglichkeiten, die Sicherheit gegen Abstürze mittlerer und großer Verkehrsflugzeuge durch technische Nachrüstungen zu erhöhen, sind außerordentlich begrenzt. Es ist anzunehmen, dass allenfalls Verbesserungen im Detail möglich sind, nicht aber wesentliche Verringerungen des Risikos.

Die zur Zeit in Frankreich in der Diskussion befindliche und in der Tschechischen Republik bereits durchgeführte Maßnahme, militärische Einheiten zur Fliegerabwehr bei Atomkraftwerken zu stationieren<sup>14</sup>, ist als äußerst problematisch anzusehen. Auch abgesehen von der offensichtlichen Gefahr des Abschusses unbeteiligter Flugzeuge, bei denen z.B. die Funk- und Navigationssysteme ausgefallen sind, entstehen dadurch neue Risiken.

So können Boden-Luft-Raketen, die ihr Ziel verfehlen, irrtümlich das Atomkraftwerk treffen und Beschädigungen hervorrufen. Die Luftabwehr-Stellungen könnten selbst zum Ziel von Terrorattacken werden. Terroristen könnten versuchen, sie zu übernehmen, um damit das Kraftwerk zu beschießen. Um dies zu vermeiden, wäre ein dauernder Schutz dieser Stellungen durch Bodentruppen erforderlich – ein großer Schritt zur Militarisierung des gesamten Systems der Elektrizitätsversorgung, der keineswegs als wünschenswert angesehen werden kann.

Die wirkungsvollste Gegenmaßnahme ist das möglichst frühzeitige Abschalten aller Atomkraftwerke. Wie gezeigt, nimmt auch in diesem Fall das Risiko nur langsam ab. Ein gewisser Sicherheitsgewinn könnte durch Einlagerung des abgebrannten Brennstoffe in Behälter erzielt werden, die dann in verbunkerten Hallen gelagert werden.

Die derzeit verfolgten Konzepte zur Zwischenlagerung werden dem Anspruch eines ausreichenden Schutzes gegen Einwirkungen von außen jedoch nicht gerecht (auch davon abgesehen, dass die CASTOR-Behälter technisch in keiner Weise ausgereift sind).

Der Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs auf das Zwischenlager Ahaus oder Gorleben bzw. auf eines der geplanten dezentralen Zwischenlager an den Standorten der Atomkraftwerke könnte, vor allem durch ein langanhaltendes, heißes Treibstofffeuer, zu katastrophalen radioaktiven Freisetzungen führen. Daher wäre es erforderlich, neue Lagerkonzepte zu erarbeiten. Derartige ‚Sicherungs-Lager‘ könnten also erst nach Jahren zur Verfügung stehen.

---

<sup>14</sup> Siehe z.B. Nucleonics Week Vol. 42, Nr. 39, September 27, 2001, 11-12

Auch die Frage nach dem optimalen Standort solcher Sicherungs-Lager ist nicht einfach zu beantworten. Werden sie an AKW-Standorten errichtet, bedeutet dies, dass keine Transporte über öffentliche Verkehrswege erforderlich werden – jedenfalls nicht für einige Jahrzehnte.

Andererseits ist das AKW selbst eine mögliches Ziel für Terrorangriffe, nicht nur, falls damit radioaktive Verseuchung weiter Landstriche angestrebt wird, sondern auch, um die Stromversorgung zu treffen! Dies kann auch zu Auswirkungen auf das Lager führen, an dessen Auslegung in diesem Fall daher besonders hohe Ansprüche zu stellen wären.

Bei der Errichtung eines zentralen Sicherungs-Lagers müssen Transporte durchgeführt werden. CASTOR-Behälter heutiger Bauart sind dabei insbesondere gegenüber Beschuss mit panzerbrechenden Waffen verwundbar. Tragbare Waffen mit Hohlladungsgranaten, die von ein oder zwei Tätern abgefeuert werden können, können die Wand eines CASTOR zerstören und erhebliche Freisetzungen hervorrufen. Ein besserer Schutz wird in diesem Punkt auch durch verbesserte Behälter nur in Grenzen erzielbar sein, da Transportbehälter naturgemäß nicht beliebig schwer sein dürfen, und daher auch die Wanddicke begrenzt ist.

Die Risiken werden also auch beim kurzfristigen Abschalten aller Atomkraftwerke nicht beseitigt. Allerdings werden sie insgesamt merklich reduziert. Bedeutsam auf lange Sicht ist dabei auch, dass bei Stilllegung die Produktion von hochaktivem abgebranntem Brennstoff gestoppt wird. Die Mengen dieses gefährlichen und aufwändig zu schützenden Materials werden also zumindest nicht weiter vergrößert – während eine Weiterbetrieb gemäß ‚Energiekonsens‘ eine Verdoppelung bedeuten würde.