

Aspekte der zukünftigen Kernenergienutzung

P. Biermayr, R. Haas

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

53/2008

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Aspekte der zukünftigen Kernenergienutzung

DI Dr. Peter Biermayr
ao. Univ.Prof. Dr. Reinhard Haas

Technische Universität Wien
Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft(EEG)

Wien, März 2008



1

Die Halbwertszeit des menschlichen Gedächtnisses ist verdammt kurz -
jene von Plutonium beträgt 24.000 Jahre.
Peter Biermayr

¹ Der Atompilz über Hiroshima, fotografiert aus dem Heck der Enola Gay, einem B29 Bomber, welcher kurz zuvor die weltweit erste in einem Konflikt eingesetzte Atombombe abgeworfen hatte. Quelle: US Archiv ARCWEB;

1. Kurzfassung

1.1 Motivation

Die aktuelle Diskussion um die Reduktion von Treibhausgasen und die Reduktion der Abhängigkeit der Industriestaaten von Öl- und Gasimporten hat die mediale Präsenz der Atomkraft in letzter Zeit erhöht. Nach einer langjährigen Phase des Schweigens und Vergessens, welche auf die Katastrophe von Tschernobyl hin folgte, sind nun Stimmen zu vernehmen, welche die Atomkraft als mögliche Lösung der sich abzeichnenden Klima- und Ressourcenkrisen anbieten.

1.2 Methode und Daten

Die vorliegende Studie präsentiert vor diesem Hintergrund eine faktenbasierte Darstellung der wesentlichen Dimensionen der globalen Atomkraftnutzung, wobei die historische Entwicklung, der Status quo, sowie Entwicklungsfragen der zukünftigen Technologiediffusion erörtert werden. Kontroversiell diskutierte Aspekte der Atomkraftnutzung werden strukturiert dargestellt und die problematischen Bereiche werden herausgearbeitet.

Die in der vorliegenden Studie präsentierten Inhalte resultieren einerseits aus Expertenworkshops mit international anerkannten Wissenschaftlern, welche sich langjährig mit diesem Thema auseinandergesetzt haben und andererseits aus der Auswertung von aktueller Literatur und aktuellen Daten zum Thema. An den Workshops waren sowohl Atomkraftbefürworter als auch Atomkraftgegner beteiligt. Die Literatur- und Datenquellen wurden aufgrund deren Seriosität und Transparenz ausgewählt und stammen ebenfalls sowohl aus Bereichen der Atomkraftbefürworter und der Atomkraftindustrie, als auch von Nicht-Regierungsorganisationen, welche sich für den Ausstieg aus der Atomkraft engagieren.

1.3 Ergebnisse

Im Sinne einer umfassenden Technologieanalyse und -bewertung sind zahlreiche Dimensionen der Atomkraftnutzung zu betrachten, um schlussfolgernd Aussagen über die Zukunftsfähigkeit der Technologie und über deren Bedeutung für die Entwicklung nachhaltiger Energie- und Gesellschaftssysteme treffen zu können. Die wesentlichen Fragen, welche sich in diesem Zusammenhang stellen, wurden in der vorliegenden Studie detailliert aufgearbeitet:

I. Kann die Kernenergienutzung so rasch ausgebaut werden, dass sie einen relevanten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leisten kann?

Die historische Marktdiffusion der Atomkraft fand im Zeitraum von 1962 bis 1988 statt, wobei 1989 ein globaler Bestand von 423 Reaktoren mit in Summe 328 GW_{el} installierter Leistung zu verzeichnen war. Der folgende Zusammenbruch der Technologiediffusion ist auf die Katastrophe von Tschernobyl (1986) und die beginnende Liberalisierung der Strommärkte mit der damit einhergehenden Neubewertung des exorbitanten Kapitalbedarfs und des finanziellen Risikos zurückzuführen. 17 Jahre später, im Jahr 2006, waren 442 Reaktoren mit einer installierten Leistung von 368 GW_{el} verfügbar, also nur geringfügig mehr als 1989. Diese Reaktoren lieferten im Jahr 2004 ca. 16% des globalen elektrischen Stromes. In den vergangenen 10 Jahren gingen weltweit 43 neue Anlagen ans Netz, welche zum großen Teil alte abgeschaltete Anlagen ersetzten. Das mittlere Alter des globalen Atomkraftwerksbestandes beträgt im Jahr 2008 bereits 24 Jahre. Die mittlere Lebensdauer

von den bisher 110 stillgelegten Anlagen war 21 Jahre. Es kommt also mehr und mehr zu einer fortgeschrittenen Alterung des Anlagenbestandes.

Ein mittelfristiger globaler Ausbau der Atomkraft, der über einen Ersatz von abzuschaltenden Anlagen hinausgeht, ist in den kommenden 10 bis 20 Jahren nicht zu erwarten. In diesem Sinne kann die Nutzung der Atomkraft auch keinen weiteren Beitrag zum Klimaschutz leisten. In Westeuropa sind derzeit 2 Anlagen in Bau (Finnland und Frankreich). Einzelne Anlagen werden in Osteuropa, Nord- u. Südamerika sowie in Südafrika errichtet. Nur in Asien erfolgt zurzeit ein stärkerer Neubau von insgesamt 19 Anlagen. In Anbetracht der langen Bauzeiten von oftmals 10 bis 20 Jahren ist auch unter Berücksichtigung aller in Planung befindlichen Projekte davon auszugehen, dass im folgenden Jahrzehnt global nie mehr als 4 bis 5 Anlagen pro Jahr in Betrieb genommen werden. Mittelfristig kommt es daher angesichts der Altersverteilung des Anlagenbestandes global zu einer sinkenden Anzahl von Atomkraftwerken.

Die Vermeidung von CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Atomkraftwerken betrug im Jahr 2005 weltweit 2.500 Mio. Tonnen (Nuklear substituiert Erdgas GuD), das sind 7,4% der Gesamtemissionen. Diese Werte erhöhen sich bei einer angenommenen Substitution von Kohlekraft. Die zukünftige Rolle der Atomkraft ist aus den bereits dargestellten Gründen der Technologiediffusion und des Emissionsanstieges in anderen Bereichen (z.B. Verkehr) mittelfristig rückläufig, aber vor allem ist sie angesichts der beschränkten Brennstoffressourcen (Uran) nicht nachhaltig. Überdies ist Atomstrom keinesfalls CO₂-neutral, da die Gewinnung des Brennstoffs mit großem Energieaufwand verknüpft ist, welcher überdies mit abnehmender Erzqualität in Zukunft noch stark ansteigen wird. Die außerordentlich langen Planungs- und Bauzeiten sowie der gewaltige Kapitalaufwand lassen keinen nennenswerten kurzfristigen Ausbau zu, welcher für effektive Klimaschutzmaßnahmen jedoch unabdingbar wäre. In diesem Sinne kommt ein möglicher Beitrag der Atomkraft zum Klimaschutz in jedem Fall zu spät.

II Wie wirtschaftlich ist die Kernenergienutzung langfristig?

Bei der Frage nach der Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Die Laufzeitverlängerung von abgeschriebenen Atomkraftwerken. Diese ist für die Betreiber solcher Anlagen hoch attraktiv. Einerseits können in Zeiten der Laufzeitverlängerung angesichts der kapitallastigen Kostenstruktur von Atomkraftwerken satte Gewinne eingefahren werden. Und andererseits lassen sich damit die enormen Kosten, welche mit der Dekommissionierung und Entsorgung der Anlage in Zusammenhang stehen hinauszögern, oder – wenn der Betreiber in der Zwischenzeit zahlungsunfähig werden sollte – überhaupt auf den Steuerzahler übertragen.

2. Die Errichtung von neuen Atomkraftwerken ist unter marktwirtschaftlichen Randbedingungen im liberalisierten Energiemarkt aufgrund des exorbitanten Kapitalbedarfs und des hohen finanziellen Risikos für Investoren nicht attraktiv. In den USA haben selbst starke Anreize der Regierung keinen Investor auf den Plan rufen können und in Westeuropa hat es 25 Jahre lang gedauert, bis ein neues Atomkraftwerk außerhalb von Frankreich bei der Atomindustrie (hauptsächlich AREVA und Siemens) bestellt wurde (AKW Olkiluoto, Finnland). Und selbst diese Bestellung ist nur durch massives Industriedumping (garantierter Fixpreis von 3 Mrd. Euro) und einen staatlich subventionierten Milliardenkredit der

Bayrischen Landesbank (Zinssatz 2,6%) möglich geworden. Eine versuchte Nachbestellung zu denselben Konditionen wurde von der Atomindustrie bereits abgelehnt.

Die tatsächlichen Baukosten von Atomkraftwerken überstiegen deren Voranschlag in der Vergangenheit immer auf dramatische Art und Weise. In den USA betrug die minimale historische Baukostenüberschreitung über 100% - das heißt, das Kraftwerk kostete bestenfalls den doppelten veranschlagten Preis. Die Kostendaten zahlreicher anderer Kraftwerksstandorte außerhalb der USA sind entweder gar nicht verfügbar oder dermaßen intransparent, dass eine seriöse Analyse selbiger nicht möglich ist. Die obligaten Baukostenüberschreitungen resultieren aus den ebenfalls obligaten Bauzeitüberschreitungen und den damit in Zusammenhang stehenden erhöhten Kapitalkosten, aus den sich während der Bauzeit verändernden sicherheitstechnischen Anforderungen, den Veränderungen am Kapitalmarkt (Wechselkurse, Zinssätze) und vielem mehr.

III Wie lange reichen die Uranreserven?

Laut einer Marktanalyse der IAEO und der IEA ist bei einem Preisniveau von 130 US\$/kg Uran weltweit ein Potenzial an "billigem" Uran von 4,74 Mio. Tonnen verfügbar. Dies würde bei einem gleichbleibenden Verbrauch wie im Jahr 2004 eine rechnerische Verfügbarkeit des Kernbrennstoffes von 70 Jahren ergeben. Andere Studien publizieren geringere Reichweiten, die sich jedoch immer im Bereich mehrerer Jahrzehnte bewegen. Der Uranpreis weist in den vergangenen Jahren eine stark wachsende Volatilität auf und überstieg das Preisniveau von 130 US\$/kg im Jahr 2007 um mehr als 100% womit auch die über lange Perioden gegebene Preisstabilität dieses Brennstoffes nicht mehr gegeben ist.

Gemäß der Potenzial-Kostenkurven müssen in Zukunft immer teurere Lagerstätten mit immer geringerer Urankonzentration ausgebeutet werden, wobei der Abbau damit auch immer größere Umweltprobleme schafft, da pro kg Uran mehr und mehr Erz abgebaut werden muss. Eine Verlängerung der Verfügbarkeit von Kernbrennstoffen ist mittels Wiederaufbereitung von abgebrannten Brennstäben und der Brütertechnologie möglich. Brennstäbe aus wiederaufbereiteten Rohstoffen sind jedoch auch angesichts der gestiegenen Uranpreise nicht konkurrenzfähig und die Brütertechnologie konnte sich bis heute aus technologischen, sicherheitstechnischen (Plutoniumwirtschaft!) und wirtschaftlichen Überlegungen nicht durchsetzen.

IV Ist die Frage der Endlagerung von radioaktiven Abfällen gelöst?

Das Thema der Endlagerung von radioaktiven Abfällen ist nach wie vor nicht gelöst und wird in der betriebswirtschaftlichen Kalkulation von Atomkraftwerken kaum berücksichtigt. Nach der ca. 50-jährigen Geschichte der zivilen Kernkraftnutzung gibt es in Ermangelung von dauerhaften zivilen Endlagern mit einem praxisrelevanten Fassungsvermögen auch keinen Marktpreis für die Endlagerung. Bei der Kalkulation von Atomkraftwerken werden die in ferner Zukunft anfallenden Kosten der Endlagerung verbrauchter Brennstoffe und die Entsorgung der radioaktiven Teile des Reaktors durch die in der Wirtschaftlichkeitsrechnung gebräuchliche Abzinsung gering geschätzt. Faktum ist, dass die durch den Betrieb und die anschließende Stilllegung von Atomkraftwerken produzierten radioaktiven Abfälle die Menschheit bereits jetzt über geologische Zeiträume hinweg beschäftigen werden. Die zukünftige Gesellschaft wird über dieselben geologischen Zeiträume hinweg die Kosten dafür tragen müssen, um die für alle höheren Organismen vernichtenden radioaktiven Abfälle von der Biosphäre fern zu halten.

V Wie ist das Sicherheitsrisiko aus der Kernkraftnutzung heute zu sehen?

Das Risiko von katastrophalen Strahlungsfreisetzungen aus Atomkraftwerken ist der Menschheit spätestens seit dem Super-Gau von Tschernobyl im Jahr 1986 in das Bewusstsein gerückt. Obwohl die Sicherheitsvorkehrungen von Atomkraftwerken auf technischer und personeller Seite nach der Katastrophe von Tschernobyl deutlich verbessert wurden, ist ein weiterer Unfall jederzeit möglich. Die Eintreffenswahrscheinlichkeit ist dabei von der Anzahl der in Betrieb befindlichen Atomkraftwerke und deren Zustand abhängig, was wiederum die ökonomisch attraktive Laufzeitverlängerung in ein kritisches Licht rückt. Seit den terroristischen Anschlägen vom 11.09.2001 haben die Sicherheitsrisiken, die aus dem Betrieb von Atomkraftwerken hervorgehen noch eine weitere Dimension erhalten. Jede Region, die ein Atomkraftwerk beheimatet, ist gefährdet zum Angriffsziel terroristischer Attentate zu werden oder eignet sich im Kriegsfall als strategisches Ziel. Weitere Risiken resultieren aus der radioaktiven Freisetzung des Regelbetriebes von Kernkraftwerken, welche vor allem aus dem Uranbergbau, der Brennstoffnachbehandlung, der Zwischenlagerung und der Endlagerung resultieren.

Zivile und militärische Aspekte der Nukleartechnologie können nicht getrennt werden. Jedes Atomkraftwerk, selbst jeder Versuchsreaktor kann prinzipiell als Quelle für Materialien zur Herstellung von Nuklearwaffen herangezogen werden, auch wenn es große qualitative und quantitative Unterschiede zwischen den Reaktortypen gibt. Nicht umsonst werden die Atomprogramme mancher Staaten (z.B. historisch Irak, aktuell Iran) international mit großer Besorgnis beobachtet. Die Fähigkeit zur Produktion von Nuklearwaffen wird auch durch Anlagen gesteigert, welche den Brennstoffzyklus betreffen. Wiederaufbereitungs- bzw. Anreicherungsanlagen können in diesem Sinne ebenso für zivile oder für militärische Anwendungen herangezogen werden. Mit der Menge der weltweit umgesetzten Nuklear(brenn)stoffe und Nuklearwaffen steigt weiters das Risiko der Proliferation von waffenfähigen Spaltstoffen und Nuklearwaffen. Die nötigen Grundlagen zum Bau von Nuklearwaffen sind z.B. im Internet frei verfügbar und unter Einsatz von entsprechender Ingenieursleistung ist die Herstellung von Nuklearwaffen für Staaten oder Organisationen die über die erforderlichen Spaltstoffe verfügen folglich auch möglich. Bei einer zukünftigen Intensivierung der Brütertechnologie würden sich im Zuge der daraus resultierenden Plutoniumwirtschaft die genannten Probleme deutlich verschärfen.

VI Welche Kostenrisiken von Atomkraftwerken können abgedeckt werden?

Der Betrieb von Atomkraftwerken ist nur beschränkt versicherbar. Ohne Haftungsbeschränkung könnte kein Atomkraftwerk betrieben werden, da weltweit keine Versicherungsgesellschaft bereit ist, ein Atomkraftwerk zu versichern. Internationale Verträge regeln dabei die Haftungsgrenzen. Allfällige Versicherungssummen können die Schäden im Falle eines schweren Reaktorunfalls nicht ansatzweise abdecken. Das Risiko trägt hier nicht der (private) Betreiber des Atomkraftwerks, der auch den Gewinn aus der Anlage abschöpft, sondern die Gesellschaft. Weitere Kostenrisiken, wie die unbekanntenen Kosten der Endlagerung atomarer Abfälle über tausende Generationen hinweg, oder die Kosten der Dekommissionierung und Entsorgung im Falle eines zahlungsunfähigen Betreibers trägt ebenfalls die (zukünftige) Gesellschaft.

VII Wie ist die demokratiepolitische Relevanz einzuschätzen?

Die Zustimmung der Bevölkerung zum Betrieb von Atomkraftwerken ist selbst in zahlreichen Ländern mit Atomkraftnutzung relativ gering. Die demokratiepolitische Relevanz der

Atomkraft kann damit als kritisch angesehen werden. Die Atomindustrie bewirbt entsprechende Projekte stets an der Öffentlichkeit vorbei direkt in den höchsten politischen Gremien eines Staates. Findet die Atomindustrie dort Gehör, so wird in der Regel versucht, die Bevölkerung seitens der Politik von entsprechenden Projekten zu überzeugen, wobei die damit verbundenen Propagandakosten wiederum von der Gesellschaft getragen werden. Dies ist in Demokratien erforderlich, da die Gesellschaft in der Folge einerseits einen guten Teil der Rechnung bezahlt und andererseits einen Großteil des Risikos trägt. Neue Atomkraft-Projekte werden deshalb (mit Ausnahme von Japan) vor allem in Staaten mit nicht demokratischen Entscheidungsstrukturen durchgeführt (China, Russland).

VIII Ist die neue Generation von Kernkraftwerken anders?

Ein kostspieliges Entwicklungsprogramm arbeitet an einer neuen Generation von Kernkraftwerken, der so genannten "Generation IV". Dieses Programm soll eine zukunftsfähige Atomkrafttechnologie hervorbringen. Vor allem jedoch will die Atomindustrie das Vertrauen der Bevölkerung zurückgewinnen um neue Projekte umsetzen zu können. Das Ziel, eine „nachhaltige“ Technologie zu entwickeln wird dabei bereits durch den Brennstoffzyklus verhindert. Beginnend bei der Produktion der Brennstoffe bis zur Endlagerproblematik werden durch die bloße Existenz der Nuklearbrennstoffe in den verschiedenen Stadien ihrer Nutzung massive Probleme für zukünftige Generationen geschaffen, welche mit den Grundsätzen der Nachhaltigkeit nicht vereinbar sind. Die in der "Generation IV" stark vertretenen schnellen Brutreaktoren, die vor allem zu einer besseren Brennstoffausnutzung führen sollen, schaffen zusätzliche Probleme durch die Intensivierung der Plutoniumwirtschaft, welche durch die enorme Toxizität von Plutonium und die spezielle Eignung für Nuklearwaffen eine existenzielle Bedrohung der Menschheit darstellen.

IX Sind die für einen Ausbau der Kernenergienutzung nötigen human capacities (Fachleute, Techniker) verfügbar?

Nach dem Zusammenbruch der Technologiediffusion der Atomkraft im Jahr 1988 ist auch der Bedarf an entsprechenden Fachkräften gesunken. Die Attraktivität von Berufsausbildungen, welche mit der Planung, dem Betrieb und der Entsorgung von Atomkraftwerken verknüpft sind, ist durch die Katastrophe von Tschernobyl und die mangelnde Entwicklung dieser Technologie zu einer zukunftsfähigen Option ständig gesunken. Der angekündigte Ausstieg von großen Staaten aus der Kernkraftnutzung wie in Deutschland bringt eine weitere Depression im Bereich der Ausbildung mit sich. Für junge Menschen sind spezifische Ausbildungen oftmals nicht attraktiv, obwohl auch durch die in den nächsten Jahrzehnten fälligen Stilllegungen ein hoher Bedarf an Fachkräften zu erwarten ist. Eine Diffusionsoffensive der Atomkraft hat somit bereits durch den nötigen Wiederaufbau der human capacities eine lange Vorlaufzeit, möglicher Weise von Jahrzehnten. Die Attraktivität der entsprechenden, meist langwierigen Berufsausbildungen müsste gesteigert werden, entsprechende Anreize müssten geschaffen werden.

1.4 Schlussfolgerungen:

Kann heute von einer Renaissance der Kernkraft gesprochen werden?

Von einer "Renaissance der Atomkraft" kann heute nicht gesprochen werden. Der momentane Neubau von Atomkraftwerken reicht mittelfristig nicht einmal aus, um die aus Altersgründen abzuschaltenden Anlagen zu ersetzen. Die Atomindustrie ist angesichts dieser Situation sehr

bemüht, das Image einer aussterbenden Technologielinie abzuwenden und argumentiert mit zeitgemäßen Aspekten wie dem Klimaschutz. Bei näherer Betrachtung erweist sich dieses Argument jedoch als nicht haltbar. Einerseits ist Atomstrom keineswegs CO₂-neutral, andererseits verhindert bereits die große Trägheit der Technologiediffusion einen effektiven Klimaschutz. In marktwirtschaftlich agierenden Demokratien kommt es nur noch in Sonderfällen zum Neubau von Atomkraftwerken. Die Kostenstruktur von Atomkraftwerken ist aufgrund des exorbitanten Kapitalbedarfs nicht kompatibel mit den Randbedingungen von liberalisierten Strommärkten. Marktwirtschaftlich attraktiv ist hingegen die Laufzeitverlängerung von abgeschrieben Anlagen, welche nicht nur große Gewinne für die Betreiber mit sich bringt, sondern auch ein erhöhtes gesellschaftliches Risiko durch den Betrieb von überalterten Anlagen. Das Risiko aus dem Betrieb von Atomkraftwerken wird aufgrund von internationalen Haftungsbeschränkungen, ohne derer die Atomkraftnutzung gar nicht möglich wäre, von der Gesellschaft getragen. Das Risiko hat dabei zahlreiche Dimensionen wie die radioaktive Freisetzung im Regelbetrieb (Uranbergbau, Wiederaufbereitung, Zwischenlagerung, Endlagerung) und bei katastrophalen Unfällen (z.B. Three Mile Island 1979, Tschernobyl 1986) sowie die Bedrohung der Standortregionen im Fall von Terrorismus und Krieg.

Wirtschaftlich attraktiv werden Atomkraftprojekte erst, wenn ein großer Teil der Kosten durch den Steuerzahler getragen wird. Dies geschieht beginnend bei der staatlichen Propaganda zur "Meinungsbildung", die zur Durchführung von entsprechenden Projekten erforderlich ist, durch staatlich subventionierte Kredite und staatliche Ausfallhaftungen, Industriedumping und Überwälzung der Unfallhaftung auf die Gesellschaft. Nicht zuletzt werden die Probleme und Kosten ignoriert, welche für tausende zukünftige Generationen im Zusammenhang mit der Endlagerung der atomaren Abfälle erwachsen.

Die Motive von Staaten, die sich nach wie vor im Bereich der Atomkraft engagieren, können nach Abwägung aller wirtschaftlichen, versorgungstechnischen oder gar ökologischen Aspekte nur im Bereich des strategischen militärischen Interesses, der Machtdemonstration oder an mangelhaften Alternativen zur Stromproduktion liegen. Bei Sonderfällen wie Frankreich mit einem großen Bestand an Atomkraftwerken und einer einflussreichen Industrielobby sind viele Mechanismen zur Systemerhaltung wirksam, welche einen Ausstieg aus der Atomkraftnutzung zurzeit verhindern.

Die Nutzung der Atomkraft ist, wie dies auch bei der Nutzung fossiler Energieträger der Fall ist, an beschränkt verfügbare Ressourcen (Uranerz) gebunden. Die Reichweite dieser Ressourcen ist bei gleichbleibendem heutigem Verbrauch mit 60 bis 70 Jahren zu beziffern, bei einem Ausbau der Atomkraft entsprechend kürzer. Die Brütertechnologie, welche eine bessere Ressourcenausnutzung ermöglichen würde, konnte sich bis heute nicht durchsetzen und birgt im Zusammenhang mit der damit verknüpften Plutoniumwirtschaft ein hohes gesellschaftliches Risiko.

Die Nutzung der Atomkraft stellt im Sinne der Entwicklung eines nachhaltigen Energie- und Gesellschaftssystems keine Option dar. Im Gegenteil. Die Nutzung der Atomkraft bindet sehr viel Kapital, welches im Bereich der Weiterentwicklung erneuerbarer Energieträger und der Energieeffizienz dringend benötigt werden würde und schafft alleine durch den regulären zivilen Betrieb von Reaktoren durch radioaktive Freisetzung und kumulierenden Atommüll eine ungeheuerliche Hinterlassenschaft. Damit ist die Nutzung der Atomkraft nicht kompatibel mit den Anforderungen an nachhaltige Energie- und Gesellschaftssysteme und muss als zukunftsfähiger Lösungsansatz zur Energieversorgung verworfen werden.

2. Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Kurzfassung | 3 |
| 2. Inhalt | 9 |
| 3. Einleitung | 11 |
| 4. Historische Entwicklung der Kernenergienutzung | 12 |
| 5. Stand der Technik | 14 |
| 5.1 Reaktortypen | 14 |
| 5.1.1 Wassergekühlte Reaktoren | 15 |
| 5.1.2 Hochtemperaturreaktoren (HTR) | 16 |
| 5.1.3 Schneller Reaktor | 16 |
| 5.2 Aspekte der Zukunftsfähigkeit von Reaktorkonzepten | 17 |
| 6. Technologiediffusion und Anlagenbestand | 19 |
| 6.1 Status quo der Technologiediffusion | 19 |
| 6.2 Die zukünftige Diffusion der Atomkraft | 23 |
| 6.3 Zusammenfassung: Technologiediffusion und Anlagenbestand | 27 |
| 7. Die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken | 29 |
| 7.1 Einleitung und Fallbeispiele | 29 |
| 7.2 Die Kosten der Kernkraftnutzung | 30 |
| 7.3 Stromerzeugungskosten im Vergleich | 34 |
| 7.4 Volkswirtschaftliche Aspekte der Kernkraftnutzung | 38 |
| 7.5 Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken | 40 |
| 8. Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Kernenergienutzung? | 42 |
| 8.1 Stellenwert der Atomkraft im globalen Energiesystem | 42 |
| 8.2 Gesamtheitliche Bilanzierung der Atomkraftnutzung | 45 |
| 8.3 Zukünftiges Potenzial der Treibhausgasreduktion durch die Atomkraftnutzung | 46 |
| 9. Brennstoffreserven und Endlagerung | 47 |
| 9.1 Die Urangewinnung und verfügbare Reserven | 47 |
| 9.2 Radioaktive Abfälle und deren Endlagerung | 49 |
| 10. Sicherheitsaspekte: Risiko, Proliferation, Krieg und Terror | 52 |
| 10.1 Risiko der Atomkraftnutzung | 52 |
| 10.2 Die Verbindung ziviler und militärischer Nutzung der Atomenergie | 53 |
| 10.3 Die Bedeutung von Atomkraftwerken als Terrorziel oder im Kriegsfall | 54 |
| 11. Aspekte der demokratiepolitischen Relevanz | 55 |
| 12. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen: Renaissance der Kernenergie? | 57 |
| 13. Literatur | 59 |

Fortsetzung des Inhaltsverzeichnisses

Anhänge:

| | |
|---|-----|
| Anhang A: Unfälle in kerntechnischen Anlagen | 62 |
| Anhang B: Der weltweit erstmalige Einsatz von Atomwaffen in Hiroshima und Nagasaki | 86 |
| Anhang C: Das Atomkraftwerk Zwentendorf: Bau, Proteste, Volksabstimmung: | 101 |
| Anhang D: Expertenworkshops | 105 |

3. Einleitung

Vor dem Hintergrund des stark steigenden Stromverbrauchs der industrialisierten Staaten zeichnen sich aktuell national und international mehrere bedeutende Problemkreise ab, welche in absehbarer Zukunft für die betroffenen Volkswirtschaften von zentraler Bedeutung sein werden und welche auch von der Europäischen Kommission² als zukünftige Herausforderungen erkannt wurden. Ohne den Anspruch auf eine Prioritätenreihung sind folgende zentrale Punkte von Interesse:

- Die Deckung des steigenden Strombedarfs in einem internationalen (z.B. europäischen) Kontext.
- Die Versorgungssicherheit (kurzfristig in Hinblick auf die Systemstabilität und langfristig in Hinblick auf die Verfügbarkeit der eingesetzten Primärenergie).
- Die Reduktion der Auslandsabhängigkeit, welche durch die Verstromung von importierten fossilen Energieträgern oder den Import von Strom selbst entsteht.
- Die angestrebte Reduktion der Treibhausgasemissionen.
- Die Bereitstellung von billigem Strom für eine wettbewerbsfähige Wirtschaft und weiteres Wirtschaftswachstum.

In diesem Zusammenhang werden in der internationalen Diskussion unterschiedliche Lösungsansätze aufgeworfen, wobei auch der zukünftige Stellenwert der Nutzung der Kernenergie thematisiert wird. Die Kernenergie-Industrie, welche nach dem Aufschwung dieser Branche in den 1960er bis 1980er Jahren in der jüngeren Vergangenheit mit einer deutlichen Abnahme der Aufträge konfrontiert war und weiterhin konfrontiert ist, ortet vor dem dargestellten Hintergrund neue Marktchancen, was in der Folge zur Diskussion um eine bevorstehende "Renaissance der Kernenergienutzung" geführt hat.

Inwiefern eine verstärkte Nutzung der Kernenergie einen Beitrag zur Lösung der anstehenden Probleme leisten kann, und welche gesellschaftlichen Auswirkungen aus einer Forcierung der Kernkraftnutzung resultieren würden, wird in der vorliegenden Arbeit auf der Basis eines umfangreichen Literaturstudiums sowie der Auswertung von hierfür durchgeführten Expertenworkshops dargestellt. Die entsprechenden Expertenworkshops wurden am 11.10.2006 und am 23.01.2007 in Wien veranstaltet wobei sowohl internationale Kernkraftbefürworter als auch internationale Kernkraftgegner eingeladen wurden. Die Teilnehmerlisten der Workshops sind in Anhang A dokumentiert. Der Auftakt zu diesen Workshops wurde von einer Veranstaltung im Rahmen der "Energiegespräche" mit dem Titel "Renaissance der Atomenergie in Europa?" am 10. 10. 2006 im Technischen Museum Wien gebildet, welche auch ein breites interessiertes Publikum erreichen konnte.

Der vorliegende Endbericht ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 4 präsentiert eine Kurzübersicht zur historischen Entwicklung der Kernenergienutzung. Kapitel 5 veranschaulicht, auch als Grundlage und Begriffsdefinition für die weiteren Ausführungen, die unterschiedlichen Reaktorkonzepte und deren praktische Relevanz. Kapitel 6 geht auf die historische Technologiediffusion der Atomkraftwerke und die absehbaren zukünftigen Entwicklungen der weiteren Diffusion ein.

² Lit.: Commission of the European Communities (2006)

4. Historische Entwicklung der Kernenergienutzung

Im Nachfolgenden wird die Entwicklung der Kernenergienutzung mit einem speziellen Fokus auf Deutschland anhand der wesentlichen Meilensteine dieser Technologie dargestellt. Die historische Entwicklung umfasst hierbei von der Erforschung der physikalischen Phänomene bis zum aktuellen Zeitpunkt über 110 Jahre. Der aktuelle Stand der Technik sowie die gegenwärtige Verbreitung der Technologie werden in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6 detailliert ausgeführt.

- 1896 Antoine Henri Becquerel entdeckt das Phänomen der Radioaktivität.
- 1898 Marie und Pierre Curie entdecken den Zerfall des Elementes Radium in andere Elemente, wobei sie ionisierende Strahlung beobachten.
- 1911 Ernest Rutherford entwickelt seine Theorie vom Aufbau des Atoms und vom radioaktiven Zerfall; basierend darauf entwickelt später Niels Bohr ein Atommodell.
- 1938 Otto Hahn und Fritz Straßmann gelingt der Nachweis der Spaltung des Uranatoms.
- 1939 Joliot, Halban und Kowarski weisen die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen nach, welche eine Kettenreaktion in Gang setzen. Liese Meitner und Siegfried Flügge berechnen die Größenordnung der bei der Kernspaltung freigesetzten Energiemengen.
- 1941 Der "Uranverein" unter der Leitung von Werner Heisenberg und Walther Bothe bauen einen Versuchsreaktor, in dem bis Kriegsende (1945) keine sich selbst erhaltende Kettenreaktion erzeugt werden kann.
- 1942 Enrico Fermi konstruiert und baut mit seinem Mitarbeiterteam den ersten Versuchs-Kernreaktor. Sie setzen mit dem Chicago Pile No. 1 (CP-1) die erste kontrollierte Kettenreaktion in Gang.
- 1945 6. August u. 9. August: Die weltweit erstmalig in einem Konflikt eingesetzten Atombomben von Hiroshima und Nagasaki töten 265.000 Menschen. 155.000 Menschen sterben sofort, 110.000 erliegen in den Wochen darauf ihren Verletzungen und Strahlenschäden. Unzählige weitere Menschen sterben in den folgenden Jahren an mittel- u. langfristigen Strahlenschäden.
- 1951 Im US-Staat Idaho wird mit dem Versuchsreaktor EBR 1 zum ersten Mal Strom durch Kernenergie erzeugt.
- 1955 Die deutsche Bundesregierung schafft unter Bundeskanzler Konrad Adenauer das Bundesministerium für Atomfragen und ernennt Franz-Josef Strauß zum ersten Atomminister.
- 1959 In der Bundesrepublik Deutschland wird das Atomgesetz verkündet. Es ist in Hinkunft die Rechtsgrundlage für den Bau und Betrieb von Kernkraftwerken.
- 1967 Das Versuchsprogramm zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse wird gestartet.
- 1971 Beginn der Deponierung radioaktiver Abfälle im als Endlager geplanten Lager für radioaktive Abfälle Morsleben.
- 1971 Baubeginn des ersten österreichischen Atomkraftwerkes in Zwentendorf.
- 1972 Die ersten kommerziellen Kernkraftwerke Deutschlands Stade und Würgassen beginnen mit der Stromlieferung.
- 1974 Der weltweit erste 1.200 MW-Block wird in Biblis (Deutschland) in Betrieb genommen.
- 1977 Nach verschiedenen Versuchsanordnungen geht der erste deutsche Reaktor vom Typ Schneller Brüter im Kernforschungszentrum in Karlsruhe in Betrieb.
- 1978 Die Volksabstimmung über die Inbetriebnahme des Atomkraftwerkes Zwentendorf führt in der Folge zum österreichischen Atomsperrgesetz.

- 1979 Am 28. März kommt es zu einem folgenschweren Unfall auf Three Mile Island, Pennsylvania, Vereinigte Staaten. In dem Kernkraftwerk bei Harrisburg führt eine Kombination von versagenden Maschinenteilen und Bedienungsfehler der Mannschaft zum Ausfall der Reaktorkühlung, wodurch es zur partiellen Kernschmelze und Freisetzung von 90 TBq an radioaktiven Gasen kam. Dieser Unfall ist bis heute der schwerste in einem kommerziellen Reaktor in den USA.
- 1979 Die Regierungschefs von Bund und Ländern Deutschlands beschließen die "Grundsätze zur Entsorgungsvorsorge für Kernkraftwerke".
- 1982 Der Grundstein zur ersten großtechnischen Urananreicherungsanlage der Bundesrepublik Deutschland in Gronau wird gelegt.
- 1986 Es ereignet sich am 26. April im Block 4 des sowjetischen Kernkraftwerks Tschernobyl der bisher schwerste Unfall in der Geschichte der friedlichen Kernenergienutzung. Die IAEO-Konvention über Frühwarnung bei einem Nuklearunfall sowie das vom Bundestag verabschiedete Strahlenvorsorgegesetz treten in Kraft.
- 1988 Der prototypische Rückbau des Kernkraftwerkes Niederaichbach beginnt. Die Kerntechnik wird 50 Jahre alt.
- 2000 Es wird eine Vereinbarung über den weiteren Betrieb der deutschen Kernkraftwerke zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen paraphiert. Die EVU verpflichten sich dazu, nur noch eine bestimmte Menge an Strom in den Kernkraftwerken zu produzieren, im Gegenzug sichert die Bundesregierung deren ungestörten Betrieb zu. Am 15. Dezember wird der letzte, bis dahin noch im Betrieb befindliche Block 3 des Kernkraftwerks Tschernobyl außer Betrieb genommen.
- 2003 Im November wird das Kernkraftwerk Stade stillgelegt.
- 2005 Im Mai wird das Kernkraftwerk Obrigheim stillgelegt.

5. Stand der Technik

Prinzipiell unterscheidet sich das anlagentechnische Grobkonzept eines Kernkraftwerks kaum vom Konzept eines Kohlekraftwerks oder eines anderen kalorischen Kraftwerks (siehe Abbildung 5.1). Die Wärmequelle im Kernkraftwerk ist durch den Reaktor gegeben, wobei zwischen unterschiedlichen Reaktortypen unterschieden werden muss. Ausgehend vom nuklearen Gefährdungspotenzial sind die nötigen anlagentechnischen und bautechnischen Maßnahmen in einem Kernkraftwerk jedoch nicht mit den Anforderungen in einem herkömmlichen kalorischen Kraftwerk vergleichbar. Die Sicherheitsmaßnahmen und die Dimensionierung aller sicherheitsrelevanter Bauteile eines Kernkraftwerks erfolgt in Hinblick auf die vernichtenden gesellschaftlichen Auswirkungen im Falle eines schweren Unfalls, was sich in der Folge auch anhand der Investitionskosten, der Bauzeiten und der politischen Brisanz dieser Technologie niederschlägt.

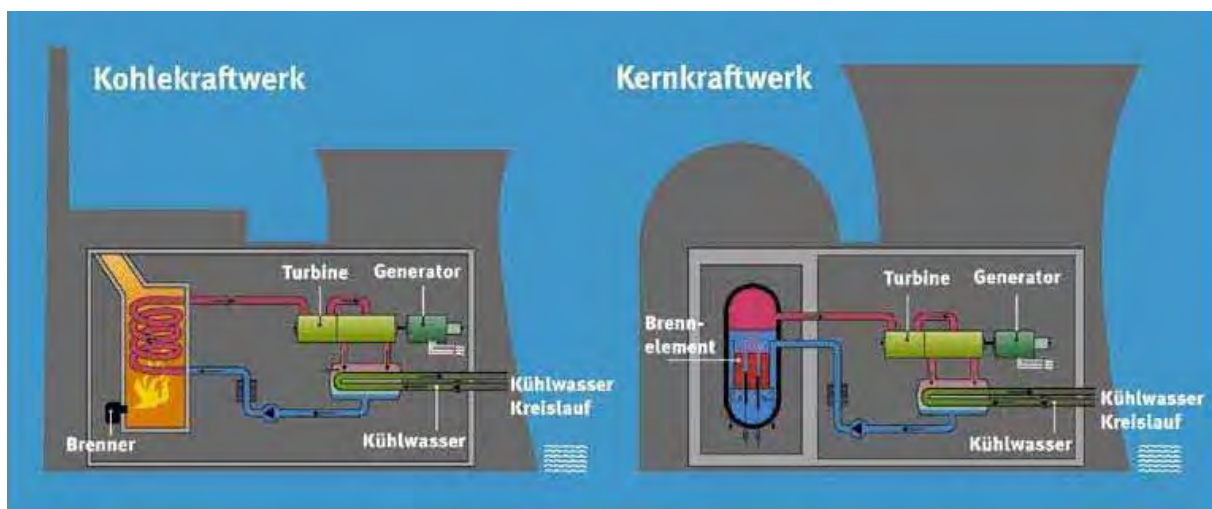


Abbildung 5.1: Vergleich der anlagentechnischen Grobkonzepte eines Kohlekraftwerks und eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor;

Der gegenständliche Abschnitt stellt im Folgenden die wesentlichen Reaktortypen aus der Sicht der technischen Konzepte dar, ohne auf Aspekte der Reaktorsicherheit, der Wirtschaftlichkeit oder auf strategische Aspekte wie die Auskopplung waffentauglichen Spaltmaterials einzugehen. Abschnitt 5 versteht sich in diesem Sinne auch als Begriffsdefinition für die nachfolgenden Abschnitte.

5.1 Reaktortypen

Im Zuge der historischen Entwicklung der Kernenergienutzung entstand eine große Vielfalt von Reaktortypen. Hierbei sind vor allem der Siedewasserreaktor, der Druckwasserreaktor, der Hochtemperaturreaktor und der schnelle Reaktor zu nennen. Parallel zu dieser konzeptorientierten Klassifizierung können die Reaktoren auch nach ihrem vorrangigen Zweck in Leistungsreaktoren (zur Energiegewinnung), in Produktionsreaktoren (zur Gewinnung von waffenfähigen Spaltstoffen) sowie in Forschungsreaktoren eingeteilt werden. Als Kernbrennstoff wird in den meisten Fällen Uranoxid verwendet, wobei die Kernbrennstoffe mit ca. 3 % Uran 235 angereichert sind. Um den Ablauf der Kettenreaktion steuern zu können ist weiters ein Moderator erforderlich, welcher in Abhängigkeit von der Reaktortype leichtes oder schweres Wasser oder auch Grafit sein kann. Zur

Veranschaulichung der Technologie werden im Folgenden die Prinzipien der wassergekühlten Reaktoren, der Hochtemperaturreaktoren und der schnellen Reaktoren erläutert.

5.1.1 Wassergekühlte Reaktoren

Beim Großteil der kommerziellen Leistungsreaktoren handelt es sich um wassergekühlte Reaktoren. Wassergekühlte Reaktoren können als Siedewasserreaktoren (SWR) oder als Druckwasserreaktoren (DWR) ausgeführt sein. In Deutschland beispielsweise sind 11 Druckwasserreaktoren und 6 Siedewasserreaktoren in Betrieb. Weltweit sind Druckwasserreaktoren mit einem Anteil von 61 % nach Anzahl und 66 % nach Leistung bzw. Siedewasserreaktoren mit einem Anteil von 21 % nach Anzahl und 23 % nach Leistung vertreten.

Der im Auftrag von Stromversorgungsunternehmen in Deutschland und Frankreich in Entwicklung befindliche Europäische Druckwasserreaktor (EPR, European Pressurized Reactor) setzt den beschriebenen technologischen Trend fort. Das Ziel der Entwicklung ist die Verbesserung von Sicherheitsmerkmalen und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Der EPR ist auf eine elektrische Leistung von 1.525 MW ausgelegt.

Siedewasserreaktoren (SWR) sind Leichtwasserreaktoren, in denen „Leichtes“, also normales Wasser (H_2O) als Moderator und Kühlmittel dient. Die durch die Kernspaltung erzeugte Wärme wird von diesem Wasser aufgenommen und weitergeleitet. Der Reaktordruckbehälter, in dem das Wasser bei einer Temperatur von etwa $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ zum Sieden kommt, steht unter einem Druck von etwa 70 bar. Der Wasserdampf wird direkt in einer Dampfturbine abgearbeitet, welche mit einem entsprechenden Generator gekoppelt ist. Der Dampf wird nach der Turbine in einem Kondensator wieder zu Wasser kondensiert, das wieder in den Kühlkreislauf gespeist wird. Das Schema des technischen Konzeptes ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

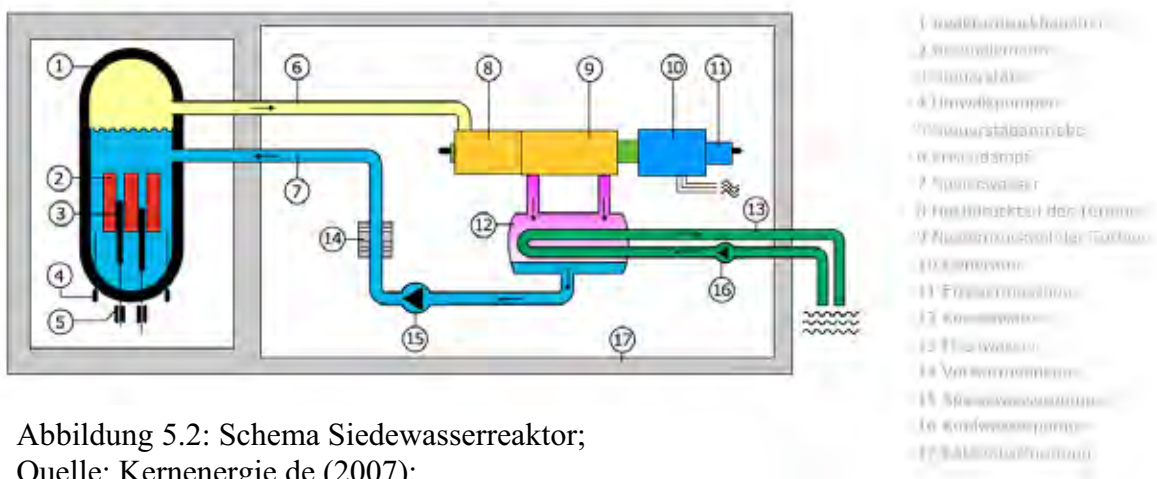


Abbildung 5.2: Schema Siedewasserreaktor;
 Quelle: Kernenergie.de (2007);

Druckwasserreaktoren (DWR) gehören ebenfalls zur Baulinie der Leichtwasserreaktoren. „Leichtes“ Wasser (H_2O) dient wie beim Siedewasserreaktor als Moderator (Neutronenbremsmittel) und als Kühlmittel bzw. Wärmetransportmedium. Der Reaktorbehälter steht unter einem Druck von 150 bis 160 bar. Dieser hohe Druck verhindert das Sieden des

Wassers bei der Betriebstemperatur von etwa 320 °C. Ein in sich geschlossener Hauptkühlmittelkreislauf, der Primärkreislauf, überträgt die im Reaktor erzeugte Wärme an die Dampferzeuger, wo das Wasser des Sekundärkreises verdampft wird. Im Sekundärkreislauf befindet sich die Dampfturbine und in der Folge der Generator. Ein Kondensator kondensiert den abgearbeiteten Dampf des Sekundärkreises. Das Schema des technischen Konzeptes ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

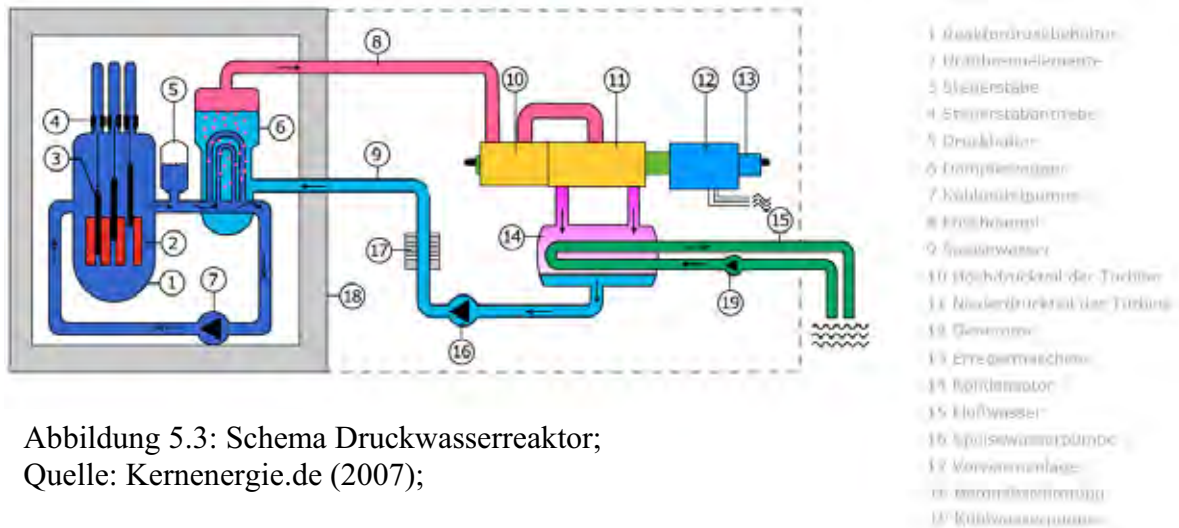


Abbildung 5.3: Schema Druckwasserreaktor;
 Quelle: Kernenergie.de (2007);

5.1.2 Hochtemperaturreaktoren (HTR)

Der Hochtemperaturreaktor (HTR) wurde als Kugelhafenreaktor entwickelt. Der Reaktorkern besteht aus einer Schüttung von kugelförmigen Brennelementen, die von einem zylindrischen Graphitaufbau als Neutronenreflektor umschlossen wird. Die kugelförmigen Brennelemente von 60 mm Durchmesser bestehen aus Graphit, in den der Brennstoff in Form vieler kleiner beschichteter Teilchen eingebettet ist. Die Brennelementbeschickung erfolgt kontinuierlich während des Leistungsbetriebes. Zur Kühlung des Reaktorkerns dient das Edelgas Helium, das beim Durchströmen der Kugelschüttung auf 700 bis 950 °C erhitzt wird. Alle Komponenten des primären Helium-Kreislaufes sind in einem Reaktordruckbehälter eingeschlossen. Der Hochtemperaturreaktor ist eine universell einsetzbare Energiequelle, die Wärme auf einem hohen Temperaturniveau bis 950 °C bereitstellen kann. Neben der Stromproduktion kann dieser Reaktortyp also auch im Bereich der Prozesswärmebereitstellung - wie z.B. bei der Kohlevergasung erforderlich - eingesetzt werden. Eine schematische Darstellung des technischen Konzeptes ist in Abbildung 5.4 ersichtlich.

5.1.3 Schneller Reaktor

Der schnelle Reaktor oder auch "schneller Brüter" genannt ist ein Kernreaktor, dessen Kettenreaktion durch schnelle Neutronen aufrechterhalten wird und der mehr spaltbares Material erzeugt als er verbraucht. Der Brutstoff U-238 wird unter Neutroneneinfang und zwei nachfolgenden Betazerfällen in den Spaltstoff Pu-239 umgewandelt. Die Kernspaltung erfolgt zur Erzielung eines hohen Bruteffekts praktisch ausschließlich mit schnellen Neutronen. Da die Neutronen möglichst wenig abgebremst werden sollen, scheidet Wasser als Kühlmittel wegen seiner Bremswirkung aus. Aus technischen Gründen ist Natrium, das bei

Temperaturen oberhalb 98 °C flüssig ist, besonders gut geeignet. Der Schnelle Brüter kann das Uran bis zu 60-fach besser ausnutzen als die Leichtwasserreaktoren. Eine schematische Darstellung dieses und der zuvor dargestellten technischen Konzepte ist in Abbildung 5.4 ersichtlich.

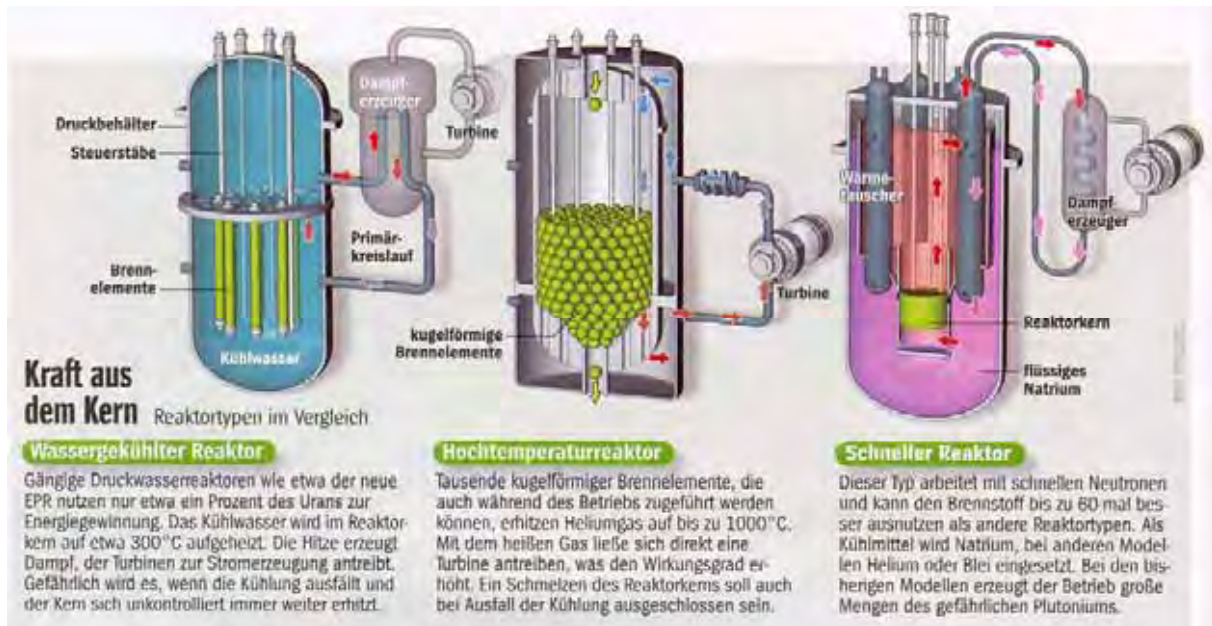


Abbildung 5.4: Technologien zur Nutzung der Kernenergie – Funktionsprinzipien;
Quelle: Spiegel Special (1/2007);

5.2 Aspekte der Zukunftsfähigkeit von Reaktorkonzepten

Aus einer langfristigen strategischen Sicht heraus haben die zuvor dargestellten wassergekühlten Reaktoren und die Hochtemperaturreaktoren das Problem, dass sie eine begrenzt zur Verfügung stehende Ressource, nämlich Uran, in absehbaren Zeithorizonten verbrauchen, wie dies z.B. zur Zeit auch bei Erdöl oder Erdgas der Fall ist. Diese Technologien scheiden in langfristigen strategischen Betrachtungen somit als zukunftsfähige Option aus. Die zugehörigen Reaktorkonzepte werden gemäß der historischen technologischen Entwicklung mit “Generation 1“ bis “Generation 3“ bezeichnet.

Im Zuge der Entwicklung von innovativen Reaktorkonzepten wird oftmals der Begriff “Generation 4“ – Reaktor verwendet. Die Aktion “Generation 4“ wurde vom amerikanischen Department of Energy im Jahr 2000 initiiert und in der Organisation “Generation 4 International Forum (GIF)“ institutionalisiert. Diese Initiative wird von zehn Ländern und von EURATOM getragen. Ziel der Initiative ist es, zukunftsfähige Reaktoren zu entwickeln, die bis zum Jahr 2030 ausgereift sein sollen. Die Ziele für die Generation 4 werden in 4 Bereiche untergliedert. Diese sind:

- Nachhaltigkeit (Zukunftsfähigkeit)
- Wirtschaftlichkeit
- Sicherheit und Zuverlässigkeit
- Proliferationshemmnisse und physischer Schutz

Von den Experten des GIF wurden 6 Reaktorkonzepte definiert, welche in Zukunft beforscht werden sollen. Diese Chancen zur tatsächlichen Umsetzung dieser 6 Konzepte werden unterschiedlich bewertet, wobei aber seitens des GIF auch nicht der Anspruch erhoben wird, dass sich alle Konzepte umsetzen lassen müssen. Grob charakterisiert handelt es sich um folgende Ansätze:

1. Gasgekühlte schnelle Reaktorsysteme (Gas-Cooled Fast Reactor; GFR)
2. Bleigekühlte schnelle Reaktorsysteme (Lead-Cooled Fast Reactor; LFR)
3. Salzschnmelze-Reaktorsysteme (Molten Salt Reactor; MSR)
4. Leichtwasserreaktor mit überkritischen Dampfzuständen (Supercritical Water-Cooled Reactor; SCWR)
5. Natriumgekühlter schneller Reaktor (Sodium-Cooled Fast Reactor; SFR)
6. Höchsttemperaturreaktor (Very High Temperature Reactor; VHTR)

Die strategische Stoßrichtung, der Initiative wird bereits durch die ausgewählten Reaktorkonzepte veranschaulicht. Es geht um schnelle Reaktoren, also um Brutreaktoren, welche als Lösungsansatz für das Brennstoff-Ressourcenproblem gesehen werden und es geht um eine Annäherung an ein Wasserstoffkonzept (Hochtemperaturansätze), bei dem der Energieträger Wasserstoff direkt in Reaktoren erzeugt werden könnte.

Schlüssige und überzeugende Lösungsansätze für die zentralen Probleme der zivilen Atomkraftnutzung wie das bestehende Risiko von Unfällen, die Anfälligkeit im Fall von Krieg und Terror oder die nicht gelöste Frage der Endlagerung von radioaktiven Abfällen sind jedoch in der Diskussion um die Reaktorgeneration 4 noch nicht zu beobachten.

6. Technologiediffusion und Anlagenbestand

Das Thema der zivilen Atomkraftnutzung suggeriert nicht zuletzt wegen der medialen Präsenz und der kontroversiellen Diskussion einen quantitativ hohen Stellenwert in der (globalen) Energieversorgung. Ziel dieses Abschnittes ist es, den tatsächlichen Stellenwert dieser Technologie zu objektivieren und die kritischen Parameter der Technologiediffusion herauszuarbeiten, welche den möglichen zukünftigen Beitrag dieser Technologie zur globalen Energieversorgung limitieren.

6.1 Status quo der Technologiediffusion

Die globale Diffusion der Leistungsreaktoren zur Erzeugung von elektrischem Strom ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Balken in der Abbildung veranschaulichen die Anzahl der im jeweiligen Jahr in Betrieb befindlichen Reaktoren, die durchgezogene Linie zeigt die installierte elektrische Leistung der Anlagen.

Die Anzahl der Reaktoren ist vom Beginn der Technologiediffusion (1950er Jahre) an bis in die beginnenden 1970er Jahre kontinuierlich gestiegen. Ab den 1970er Jahren ist eine Intensivierung des Anstiegs bis zur Trendwende im Jahr 1988 zu beobachten. Nach dieser Trendwende, welche durch mehrere Faktoren herbeigeführt wurde, zeigt sich bis in die Gegenwart ein sehr geringer weiterer Anstieg der Anlagenzahl und der installierten elektrischen Leistung.

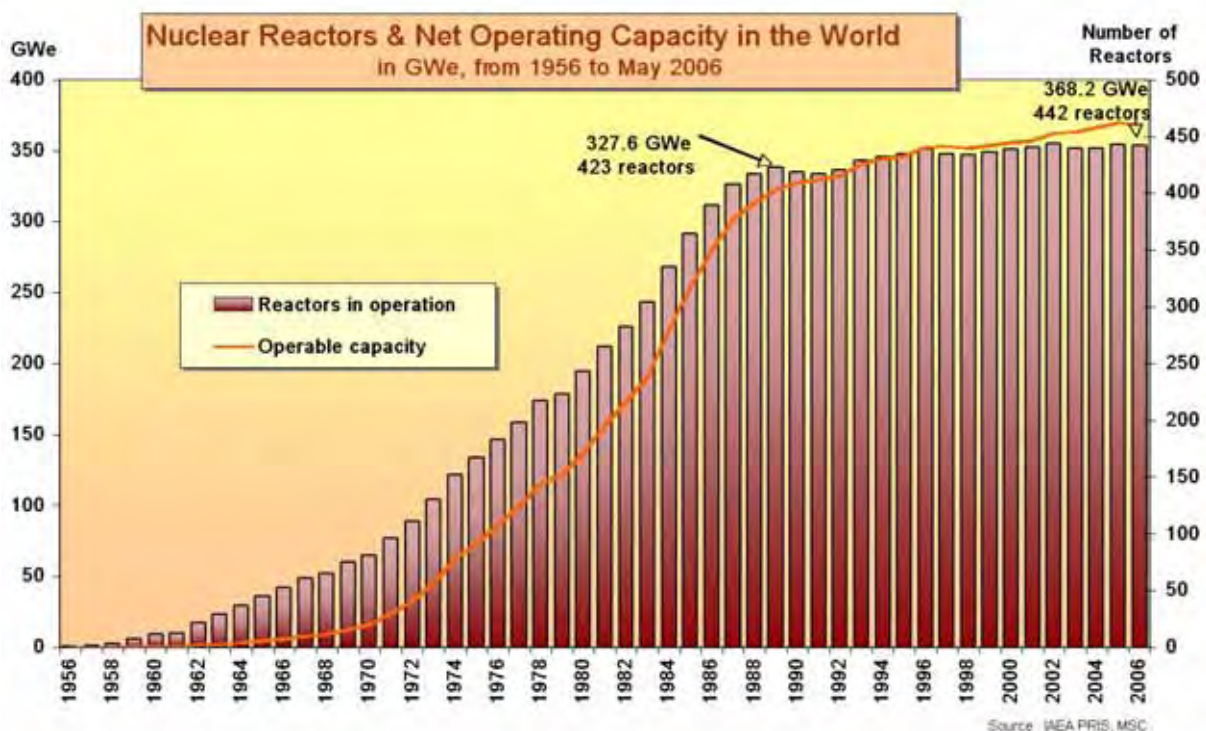


Abbildung 6.1.: Diffusion der Atomreaktoren (Leistungsreaktoren) und deren installierte elektrische Leistung seit dem Jahr 1956; Quelle: Mycle Schneider (2006);

Die Steigerung der Diffusion in den 1970er und beginnenden 1980er Jahren ist großteils den Energie-Hochpreisphasen in dieser Zeit zuzuschreiben. Die Nachlaufzeit über die Energie-Hochpreisphasen hinaus ist dabei auch auf die sehr langen Zeitkonstanten zurückzuführen, die

bei dieser Technologie vom Investitionsentscheid bis zur Inbetriebnahme gegeben sind. Die Trendwende im Diffusionsverlauf der Atomkraftwerke wurde durch die Katastrophe von Tschernobyl³, den anhaltenden Rückgang der Energiepreise und die langsam einsetzende Umstrukturierung der Strommärkte (Liberalisierung) herbeigeführt. Vor allem die Veränderung und Privatisierung der Strommärkte hat die eingeleitete Trendwende stabilisiert, da die Atomtechnologie aus Gründen des hohen Kapitalbedarfs und des hohen Risikos für einen privaten Investor nicht attraktiv war und ist.

Aus dem in Abbildung 6.1 dargestellten Diffusionsverlauf ergibt sich heute eine inhomogene Altersstruktur der in Betrieb befindlichen Leistungsreaktoren. Abbildung 6.2 veranschaulicht die tatsächliche Altersstruktur der Reaktoren. Das mittlere Alter der Anlagen betrug im Jahr 2006 einen Wert von 22 Jahren (im Jahr 2008 bei der gegebenen Verteilung näherungsweise 24 Jahre), wobei der Großteil der Anlagen älter als 16 Jahre ist. Aus dem letzten Jahrzehnt (1996-2006) ist weltweit insgesamt ein Bestand von 43 Anlagen (in Betrieb) verfügbar, das heißt, im vergangenen Jahrzehnt sind weltweit pro Jahr im Durchschnitt 4,3 Anlagen hinzugekommen.

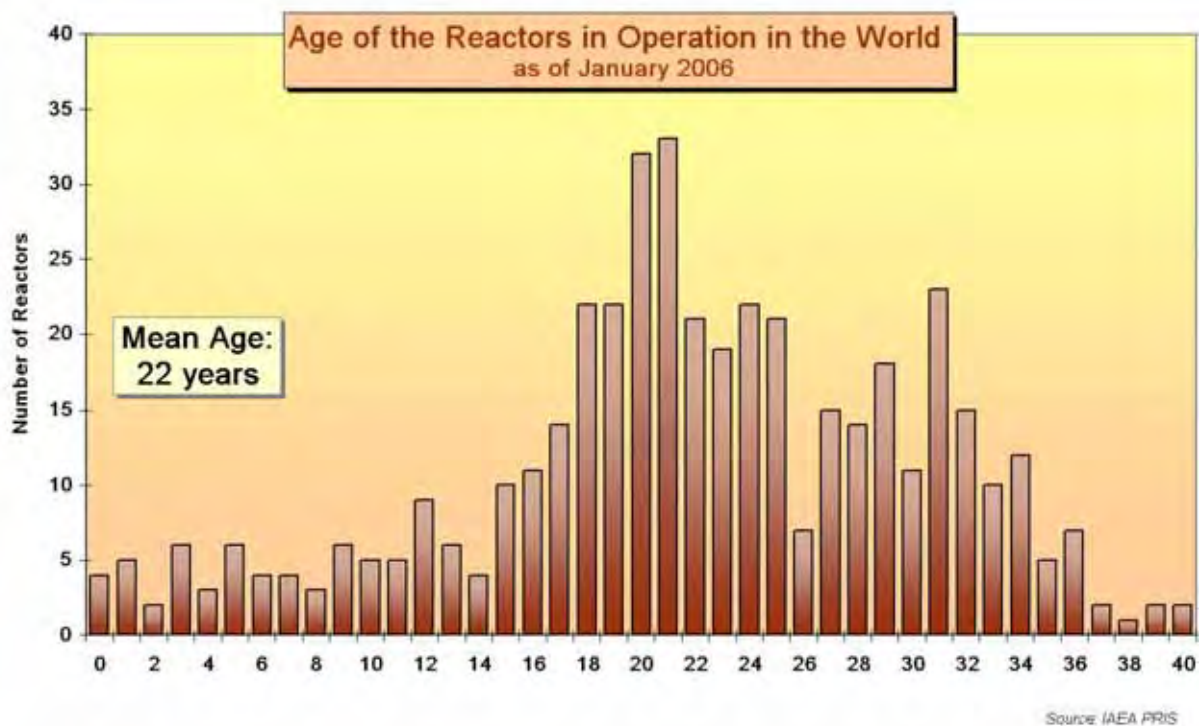


Abbildung 6.2.: Altersverteilung der Atomreaktoren (Leistungsreaktoren) und deren installierte elektrische Leistung seit dem Jahr 1956; Quelle: Schneider (2006);

Aus strategischer (mittel- bis langfristiger) Sicht ist angesichts der gegebenen Altersverteilung anzumerken, dass in einem zukünftigen Zeithorizont von 10-30 Jahren sehr viele, und in Abhängigkeit des zukünftigen Zubaus vielleicht die meisten Anlagen die maximale Anlagenlebensdauer erreichen. Da aus wirtschaftlicher Sicht der Betrieb der alten, bereits abgeschrieben Anlagen besonders attraktiv ist, gleichzeitig jedoch das Betriebsrisiko steigt, ist hier ein Spannungsfeld gegeben, welches sich bereits in der Gegenwart in Form der Diskussion um Betriebsverlängerungen abzeichnet. Neben dem wirtschaftlichen Interesse der Anlagenbetreiber, am Ende der Anlagenlebensdauer noch eine sehr rentable Phase des Betriebes auskosten zu können, ist mittel- bis langfristig auch ein Anstieg des politischen Drucks durch die Verknappung im Bereich der Stromversorgung zu erwarten. Alle diese

³ Siehe hierzu auch die Ausführungen in Anhang A.

Faktoren enthalten Anreize zur Verlängerung der Anlagenlebensdauer, was in der Folge zu einem sicherheitstechnischen Grenzgang führen kann.

Die aktuelle Verteilung der Anlagen in Betrieb, der Anlagen in Bau und der Anlagen in Planung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Darstellung zeigt die inhomogene globale Verteilung des Anlagenbestandes einerseits und der Anlagen in Bau oder Planung andererseits. In Westeuropa ist ein Anlagenbestand von 130 Anlagen zu verzeichnen. Dem gegenüber sind in Westeuropa nur 2 Anlagen in Bau (Finnland und Frankreich) und eine einzige Anlage wird darüber hinaus geplant. Diese Ausgangssituation und Zukunftsperspektive führt in Europa somit zumindest mittelfristig zu einem weiter alternden Technologiebestand und in der Folge, beim Anhalten dieses Trends zu einem Auslaufen der Technologie.

In Osteuropa sind die Verhältnisse ähnlich, mit dem Unterschied, dass mittelfristig 14 Atomkraftwerke geplant werden. Der gegenwärtige Bestand von 66 Anlagen und 4 Anlagen in Bau konzentriert sich auf Russland, die Ukraine und Tschechien. Auch die geplanten Anlagen entfallen zum größten Teil auf Russland und die Ukraine.

In Nord- und Südamerika liegen die Verhältnisse ähnlich wie in Westeuropa. Afrika ist mit Ausnahme von Südafrika nicht mit Atomkraftwerken ausgestattet. Ein etwas anderes Bild ist in Asien zu sehen. Hier steht ein Bestand von 110 Anlagen einem Bau von 19 Anlagen und einer Planung von 43 Anlagen gegenüber. Die meisten in Betrieb befindlichen Anlagen sind hierbei in Japan, Südkorea, Indien und China lokalisiert, die meisten in Bau befindlichen Anlagen in China und Indien und die meisten in Planung befindlichen Anlagen in China, Japan und Südkorea.

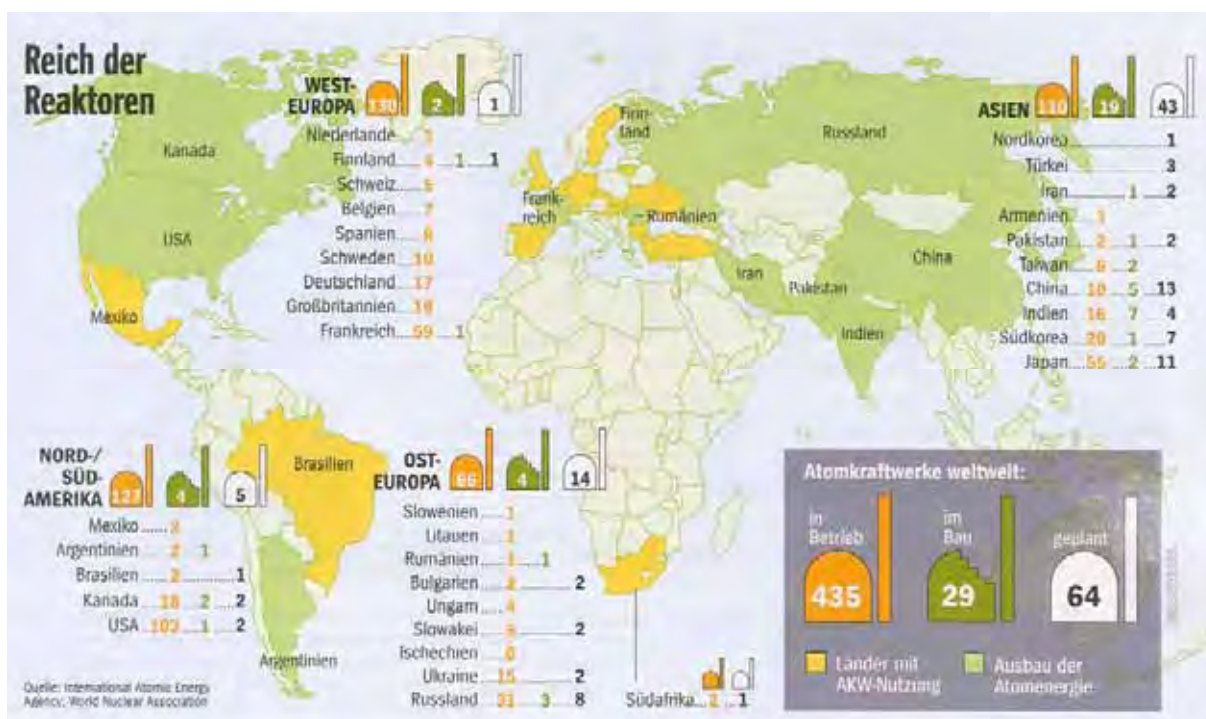


Abbildung 6.3: Atomkraftwerke weltweit; Quelle: Daten: International Atomic Energy Agency (IAEA), World Nuclear Association; Grafik: Spiegel Special (1/2007);

Zusammenfassend waren im Jahr 2006 nach den Aussagen der vorliegenden Statistik weltweit 435 Anlagen in Betrieb, 29 in Bau und 64 weitere Anlagen sind geplant. Unter der Berücksichtigung der üblichen Bauzeiten nährt die dargestellte Verteilung die Annahme, dass sich der bereits oben skizzierte Trend einer konstanten Neuerrichtung von weltweit ca. 4 bis 5 Anlagen pro Jahr noch über geraume Zeit fortsetzen könnte. Eine Änderung des in den Abbildungen 6.1 und 6.2 sichtbaren Trends in absehbarer Zukunft ist jedenfalls aufgrund der momentanen Entwicklung nicht zu erwarten.

Die historische Entwicklung der installierten elektrischen Leistung der Atomkraftwerke der 4 Weltregionen Nordamerika, Osteuropa und CIS-Staaten, OECD-Staaten sowie Asien ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Abgesehen von Asien weisen die dargestellten Diffusionskurven den bereits oben diskutierten Verlauf mit einer deutlichen Trendwende ungefähr ab dem Jahr 1988 auf. Unterschiedlich verläuft die Entwicklung nur in Asien, wo nach wie vor ein Wachstum der installierten Atomkraftwerksleistung zu beobachten ist.

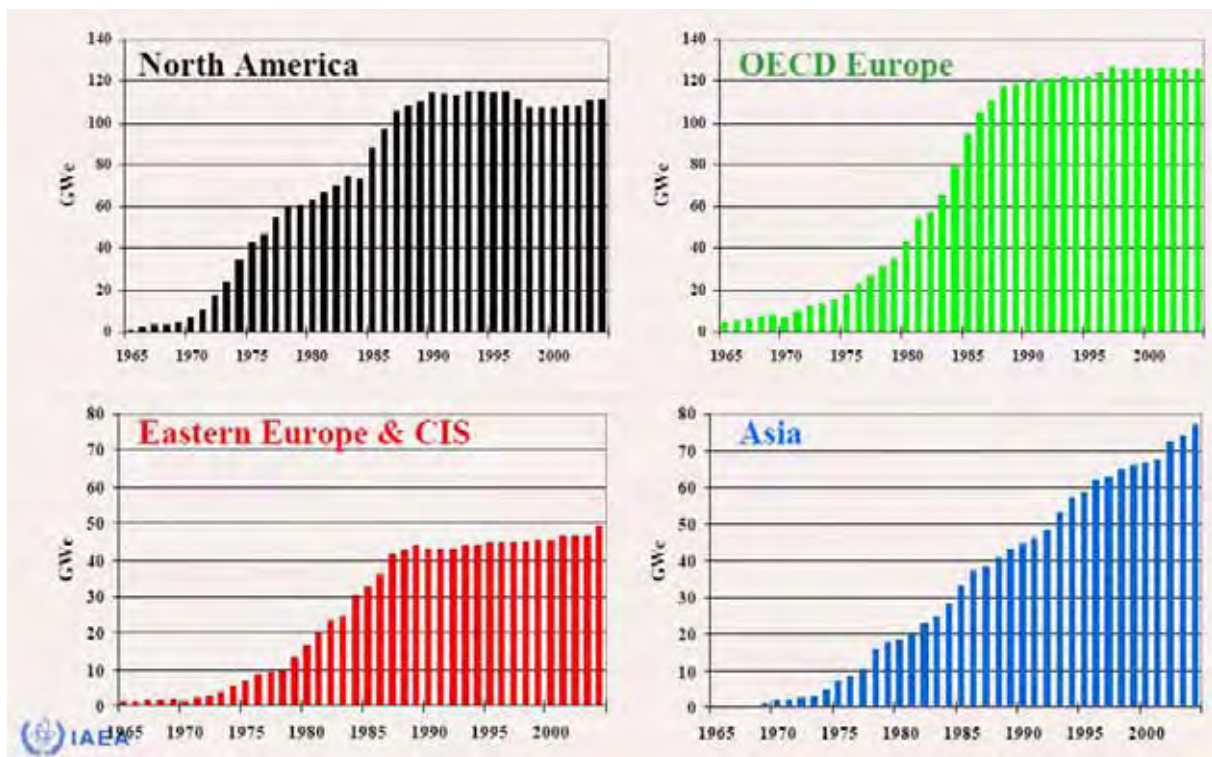


Abbildung 6.4: Entwicklung der installierten elektrischen Kernkraftleistung nach Weltregionen; Achtung: die Skalen der y-Achsen weisen unterschiedliche Maßstäbe auf; Quelle: IAEA, Rogner (2007);

Die Struktur der globalen Stromproduktion im Jahr 2004 ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Der anteilmäßig am stärksten vertretene Sektor ist aus globaler Sicht die Kohle mit knapp 40% Anteil an der Stromproduktion, wobei der dargestellte Sektor sowohl Braun- als auch Steinkohle enthält. Generell ist in der Abbildung die erzeugte Strommenge dargestellt, die dafür nötige Primärenergie würde die Grafik wegen der unterschiedlichen Kraftwerkswirkungsgrade weiter in Richtung einer noch deutlicheren Dominanz der Kohle verschieben. Der zweitstärkste Sektor ist Erdgas mit einem Anteil von ca. 20% gefolgt von Wasserkraft mit ca. 16% und schließlich Strom aus Atomkraftwerken mit einem Anteil von knapp 16%. Weitere, deutlich geringere Bereiche entfallen auf Öl und Erneuerbare Energie (ohne Großwasserkraft).

Bei einer späteren Diskussion der CO₂-Einsparungen durch die Nutzung der Atomkraft ist angesichts des globalen Strommix die Frage zu stellen, welche Energieträger bei welchen Kraftwerkswirkungsgraden von der Atomkraft im jeweiligen Betrachtungszeitpunkt substituiert werden.

Globale Stromproduktion im Jahr 2004: 17.450 TWh

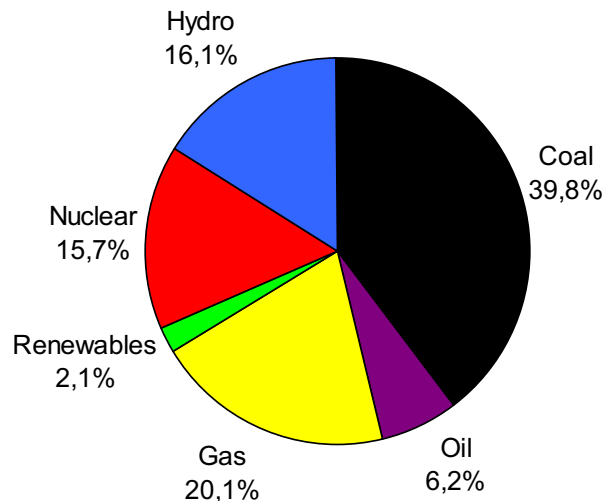


Abbildung 6.5: Globale Stromproduktion im Jahr 2004;
Quelle: Daten: Rogner (2007), Grafik: EEG (2007);

6.2 Die zukünftige Diffusion der Atomkraft

Bereits in Abschnitt 6.1 wurden die Anzahl der weltweit in Bau befindlichen Atomkraftwerksprojekte und die darüber hinaus beabsichtigten Projekte in Planungsphase dokumentiert. In Bau befinden sich gemäß Abbildung 6.1 weltweit zur Zeit 29 Reaktoren und Projektüberlegungen werden zu weiteren 64 Reaktoren angestellt. Bei den in Bau befindlichen Anlagen ist eine Fertigstellung und Inbetriebnahme wahrscheinlich, bei den Projekten in Planung ist die Einleitung einer entsprechenden Bauphase ungewiss.

In Abbildung 6.2 wurde die Altersverteilung der in Betrieb befindlichen Reaktoren dargestellt. Die Lebensdauer der Reaktoren wird von der IAEA bzw. von Reaktorherstellern gerne mit Werten von 40 bis 60 Jahren beziffert, da diese Betriebsdauer schlussendlich bei einer Betrachtung der Wirtschaftlichkeit (je nach Rechenverfahren) von großer Bedeutung ist. Die tatsächliche Lebenserwartung von Atomkraftwerken weicht allerdings von dieser Wunschvorstellung deutlich ab. Abbildung 6.6 dokumentiert, in welchem Alter die bisher stillgelegten Atomkraftwerke in der Realität endgültig abgeschaltet wurden. Bis zum Jahr 2006 wurden in der Geschichte der Atomkraft weltweit 110 Reaktoren endgültig stillgelegt. Das mittlere Alter beim Ausscheiden aus der Stromproduktion betrug dabei 21 Jahre. Somit ist die momentane Realität weit von den Ankündigungen unterschiedlicher Vertreter der Kernkraft entfernt. Die mittlere Lebensdauer kann sich in Zukunft verlängern, zumal auch zahlreiche Anreize zur Ausdehnung der Lebensdauer gegeben sind. Die Anlagenbetreiber haben ein ökonomisches Interesse an der Ausschöpfung der maximalen Anlagenlebensdauer,

die Politik muss sich Gedanken über die Deckung des rasant anwachsenden Stromverbrauchs machen und die Atomkraftindustrie sieht eine Lebensdauerverlängerung mit den damit in Zusammenhang stehenden nötigen Investments als wirtschaftlichen Ausweg in zusammengebrochenen Märkten wie Westeuropa.

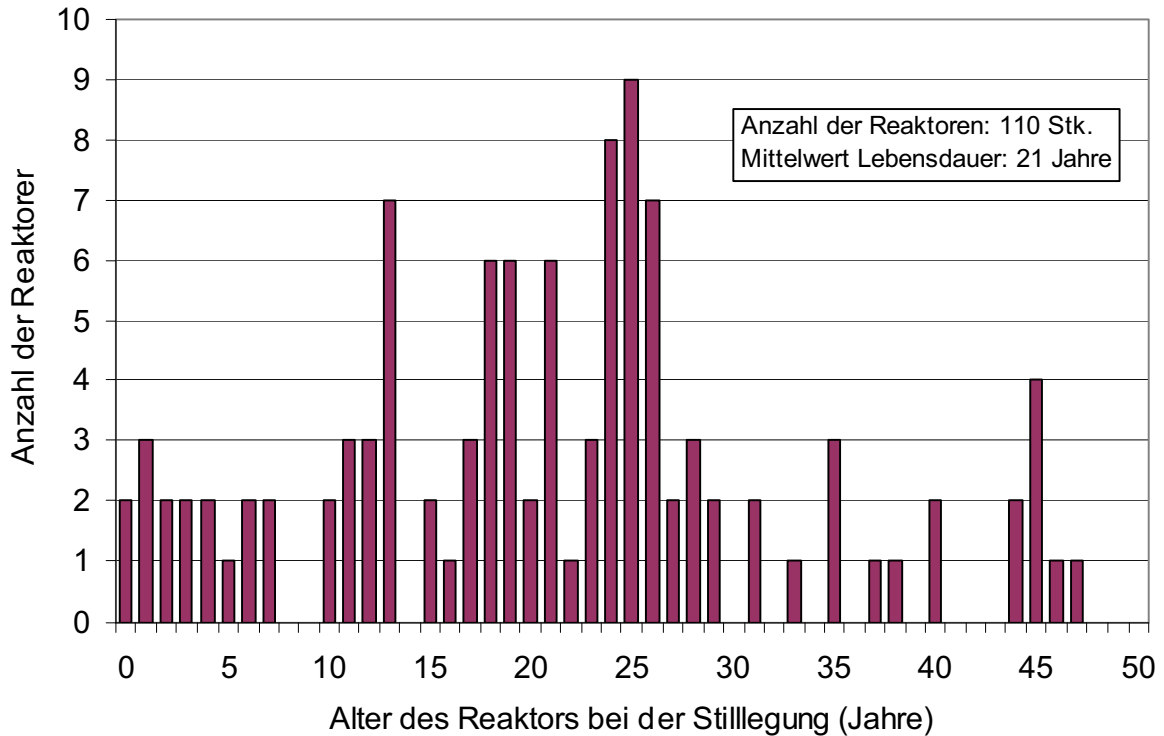


Abbildung 6.6: Mittleres Alter der bis zum Jahr 2006 endgültig stillgelegten Reaktoren;
Quelle: Daten: Schneider (2006), Grafik: EEG (2007);

Selbst wenn die Lebensdauer der technisch dafür geeigneten Anlagen deutlich angehoben werden kann und alle heute in Bau befindlichen Anlagen tatsächlich planmäßig ihren Betrieb aufnehmen können und die heute als Projekte definierten Vorhaben in absehbarer Zeit in die Bauphase gelangen, kommt es angesichts der heutigen Altersverteilung des Anlagenparks in den nächsten Jahrzehnten zu einer deutlichen Abnahme der Anzahl der Atomkraftwerke. Dies insbesondere deshalb, da der Neubau von Anlagen in der Praxis mit einer langjährigen Vorlaufzeit verknüpft ist. Vor allem in Staaten mit einer demokratischen Rechtsordnung sind langwierige innenpolitische Prozesse gefolgt von einer Standortdiskussion mit den abschließenden positiven Beschlüssen Voraussetzung für eine konkrete Planung und schlussendlich Anbotsverhandlung mit entsprechenden Lieferanten. Dieser Prozess nimmt Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch und mündet schlussendlich im Start des Bauvorhabens welches für sich bis zur endgültigen Inbetriebnahme der Anlage wiederum Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nimmt. Die Bauzeit von konkreten Anlagen bewegt sich oftmals zwischen 10 und 20 Jahren.

Einige historische und aktuelle Beispiele:

AKW Zwentendorf (Österreich)

Vom beschlossenen Baubeginn des Atomkraftwerks Zwentendorf im Jahr 1971 bis zum Beschluss der Liquidation des nicht fertig gestellten Kraftwerks im Jahr 1985 ist für den noch

immer nicht fertig gestellten Bau eine **Bauzeit von 14 Jahren** vergangen. Das Projekt Zwentendorf hat in dieser Zeit insgesamt 14 Milliarden Schilling gekostet, wobei alleine 600 Millionen davon für die Konservierung eingesetzt wurden. Die geplante Inbetriebnahme des Kraftwerks im August 1976 (also nach einer geplanten Bauzeit von 5 Jahren) wäre auch ohne politische Probleme absolut unrealistisch gewesen⁴.

AKW Temelin (Tschechien)

Den ursprünglichen Plänen zufolge sollte der erste Reaktorblock des AKW Temelin bei einem Baubeginn Mitte der 1980er Jahre bereits im Jahr 1987 in Betrieb gehen. 1993 wurde mit einer Fertigstellung von Reaktor 1 bis 1995 gerechnet, danach wurde das Jahr 1997 als Termin genannt. Im Herbst 1996 wurde die Inbetriebnahme mit Ende 1999 ins Auge gefasst. Die letzte regierungsamtliche Überprüfung des Projekts Temelin auf die Sinnhaftigkeit des Projekts erfolgte 1998. Eine unabhängige Expertengruppe sollte erneut die Für und Wider abwägen. Der 1999 vorgelegte Bericht enthielt zwar keine definitive Empfehlung zur Baueinstellung, verwies aber auf zahlreiche ökonomische Risiken und den im Zeitraum von 1996 bis 1999 rückläufigen Stromverbrauch in der tschechischen Republik. Aus der Sicht von CEZ, der Betreibergesellschaft, gab es zwei Möglichkeiten: das AKW Temelin in Betrieb zu nehmen ... oder "der Gesellschaft einen Verlust in Höhe von nahezu 100 Milliarden Kronen zuzufügen, der mit hoher Wahrscheinlichkeit den Zusammenbruch von CEZ herbeigeführt hätte⁵. (Homepage CEZ). Am 12. Mai 1999 beschloss die Regierung Zeman die Fertigstellung des Atomkraftwerks Temelin. **Nach einer Bauzeit von 13 Jahren** wurde Block 1 des umstrittenen AKW Temelin am 9. 10. 2000 erstmals aktiviert.

AKW Olkiluoto (Finnland)

Der Grundstein für den Reaktor Olkiluoto 3 mit 1600 MW Leistung wurde am 12. September 2005 gelegt. Finnland kauft den schlüsselfertigen Meiler von AREVA/Siemens um einen Fixpreis von 3 Mrd. Euro wobei die Fertigstellung für 2009 vereinbart wurde. Das Projekt hatte jedoch **nach 16 Monaten Bauzeit bereits eine prognostizierte Verzögerung von anderthalb Jahren**. Der Bau dieses weltgrößten AKWs in Finnland wird durch die Bayerische Landesbank, die sich je zur Hälfte im Besitz des Freistaates und des Sparkassenverbandes befindet, mittels eines Kredits in Höhe von 1,95 Mrd. Euro mit einem Zinssatz von 2,6 % gefördert. Auch der Fixpreis selbst erwies sich bereits als strategischer Dumpingpreis, da eine Nachbestellung Finnlands zu denselben Konditionen nicht mehr möglich war.

AKW Buser (Iran)

Der Iran hat den Bau von zwei weiteren Atomkraftwerken angekündigt⁶. Die Anlagen sollen in Bushehr entstehen, wo russische Techniker gegenwärtig das erste Atomkraftwerk des Landes errichten. Die zwei neuen Kraftwerke sollen den Angaben zufolge eine Leistung von jeweils 1.000 und 1.600 Megawatt haben. Die Kosten betragen jeweils 1,4 bis 1,7 Milliarden Dollar. **Die Bauzeit werde auf neun bis elf Jahre geschätzt**. Das bereits mit russischer Hilfe gebaute Atomkraftwerk in Bushehr sollte ursprünglich im September ans Netz gehen, wegen Unstimmigkeiten bei der Bezahlung wird sich dieser Termin aber voraussichtlich verzögern.

AKW Angra 3 (Brasilien)

⁴ Eine detaillierte Darstellung des Projektes AKW Zwentendorf ist in Anhang C dokumentiert

⁵ Homepage von CEZ; <http://www.cez.cz/en/home.html>

⁶ <http://news.orf.at> vom 11.12.2007

Brasilien wird **nach 21 Jahren Stillstand** das umstrittene Atomkraftwerk Angra 3 mit deutscher Hilfe fertig stellen⁷. Umstritten ist das im Südwesten des Bundesstaates Rio de Janeiro gelegene Angra 3 unter anderem, weil sich in der Nähe ein Naturparadies befindet und weil es sich laut Experten um ein potenzielles Erdbeben- und Erdrutschgebiet mit schlechten Bodenverhältnissen handelt. **Das AKW soll im Jahr 2013 in Betrieb gehen** und eine Leistung von 1350 Megawatt haben. Angra 3 soll vom Konzern Framatome fertig gebaut werden, an dem Siemens und Areva beteiligt sind. Zur Fertigstellung des Projekts sind nach amtlichen Angaben Investitionen von umgerechnet 2,9 Milliarden Euro vorgesehen. Der Bau war 1984 begonnen und zwei Jahre später suspendiert worden. Das Projekt ist Teil des 1975 unterzeichneten Atomabkommens zwischen der damaligen Bundesregierung in Bonn und der früheren Militärdiktatur in Brasilien. Das mit deutscher Hilfe (Siemens/KWU) errichtete brasilianische Atomkraftwerk Angra 2 ging im Jahre 2000 mit einer Leistung von 1275 Megawatt **nach 25-jähriger Bauzeit** ans Netz. Angra 1 mit einer Leistung von 626 Megawatt wurde von den USA (Westinghouse) gebaut. Das deutsch-brasilianische Atomabkommen ist 2004 für weitere fünf Jahre verlängert worden.

Auswirkungen auf die zukünftige Nutzung der Atomkraft

Unter einer realistischen Betrachtung ist aber nicht davon auszugehen, dass alle heute in Bau befindlichen Anlagen oder gar alle im Planungsstatus befindlichen Anlagen tatsächlich in Betrieb gehen werden. Von den zurzeit 29 in Bau befindlichen Anlagen befindet sich ein Drittel, nämlich neun Anlagen, bereits zwischen 18 und 30 Jahre lang als „im Bau“ in der Statistik⁸. Es handelt sich in der Praxis also eher um Bauruinen und es kann bei diesen Anlagen kaum davon ausgegangen werden, dass sie in absehbarer Zeit in Betrieb gehen werden.

Eine Prognose der Entwicklung des Atomstroms bis 2030 ist u.a. in EIA (2007) dokumentiert. Die Ergebnisse für OECD-Europa sind in Abbildung 6.7 dokumentiert. Atomstrom nimmt demnach bis 2030 ab, sowohl in absoluten Werten, als auch in verstärktem Maße in Anteilen. Der Stromverbrauch insgesamt weist ein deutliches Wachstum auf, welches zunehmend durch Erdgas und erneuerbare Energieträger abgedeckt wird. Weiters wird auch Kohle durch Erdgas substituiert.

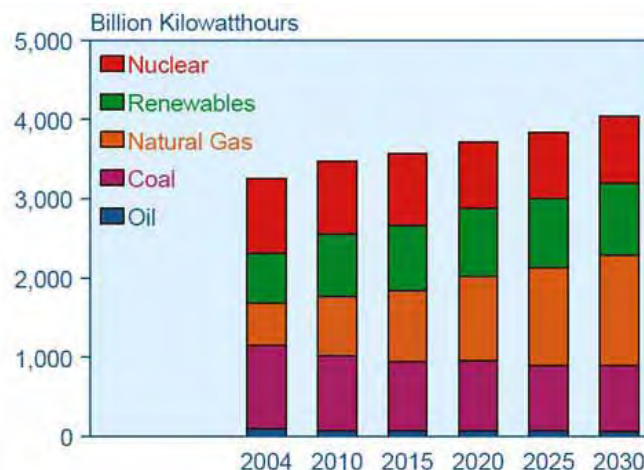


Abbildung 6.7: Prognose der netto-Stromproduktion im OECD-Europa von 2004-2030;
Quelle: EIA (2007);

⁷ <http://www.tagesspiegel.de/politik/international/Umwelt-Energie-Atomkraft;art123,2328680> vom 11.12.2007

⁸ Schneider (2006b)

Die oben dokumentierte Darstellung für OECD-Europa ist kompatibel mit der Extrapolation der historischen Entwicklung der installierten elektrischen Kernkraftwerksleistung, die in Abbildung 6.8 dargestellt ist. Dies trifft in der Folge auch auf die weiteren Weltregionen zu.

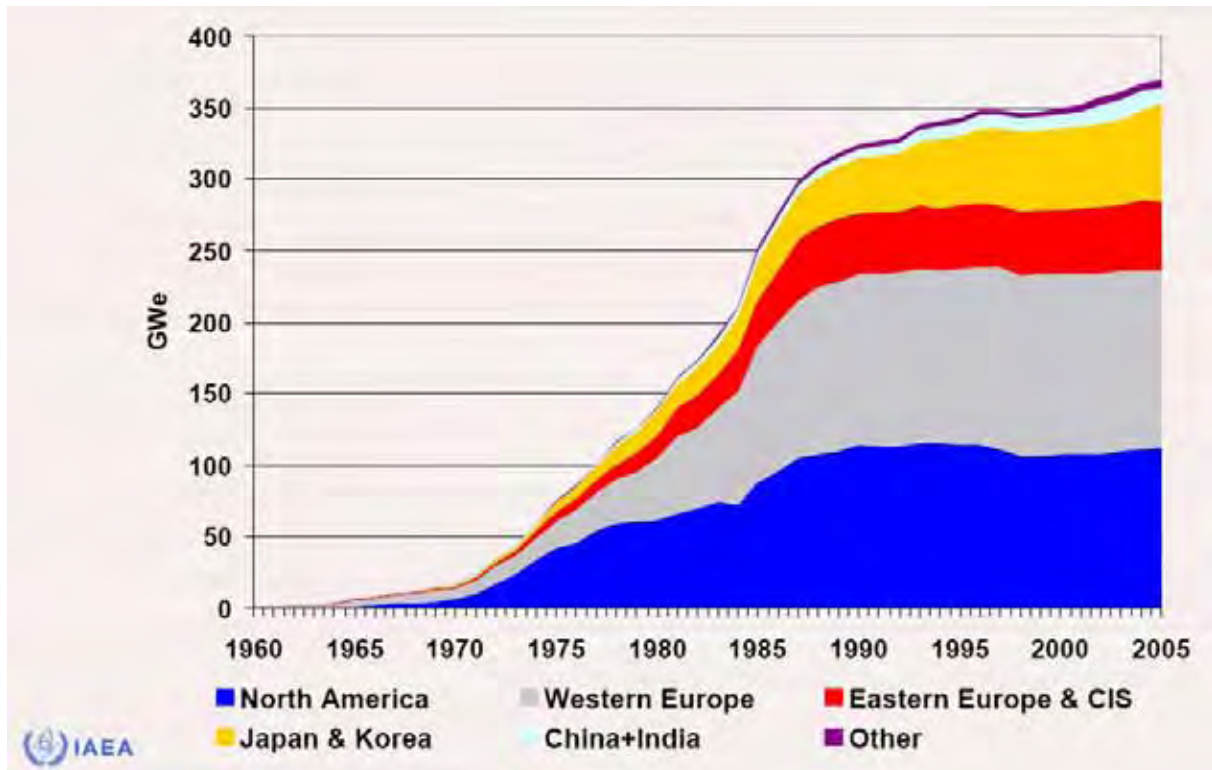


Abbildung 6.8: Entwicklung der globalen installierten elektrischen Kernkraftleistung;
Quelle: IAEA, Rogner (2007);

6.3 Zusammenfassung: Technologiediffusion und Anlagenbestand

Der nukleare Anteil der weltweiten Stromproduktion beträgt heute ca. 16%. Dieser Anteil wird in 435 Anlagen produziert, die ein durchschnittliches Alter von 22 Jahren aufweisen. Die Technologiediffusion der Atomkraftwerke zeigt in der Zeit von 1970 bis Mitte der 1980er Jahre einen starken Aufschwung und bricht um das Jahr 1988 zusammen. Maßgeblich dafür waren die sich verändernden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Liberalisierung des Strommarktes, Neubewertung des gigantischen Kapitaleinsatzes, untragbare Errichtungszeiten, explodierende Baukosten) und die Katastrophe von Tschernobyl im Jahr 1986. Die heute in Betrieb befindlichen Anlagen befinden sich hauptsächlich in den USA (103), Frankreich (59), Japan (55) und Russland (31). Die weiteren Anlagen sind auf 30 Nationen verteilt. Weltweit gibt es zurzeit 29 Anlagen in Bau, wobei jedoch nur bei ca. 20 Anlagen Baufortschritte erzielt werden. Zurzeit werden weltweit ca. 4 Anlagen pro Jahr fertig gestellt.

Aus dem hohen durchschnittlichen Alter der Anlagen des Anlagenbestandes und der geringen Neubauraten resultiert ein vorprogrammierter weltweiter Rückgang der Anlagenzahlen in den nächsten Jahrzehnten durch das Erreichen der Anlagenlebensdauer. Selbst bei einer Forcierung neuer Projekte ist wegen der langen Vorlaufzeiten (von bis zu 10 Jahren) und der langen Bauzeiten (von durchschnittlich 10 Jahren und darüber) dieser Effekt nicht zu

verhindern. Von Vertretern der Atomkraftbranche werden Lebensdauern der Anlagen von 40 bis 60 Jahre genannt. Die Realität zeigt jedoch, dass von den bis jetzt endgültig stillgelegten 110 Anlagen die mittlere Lebensdauer 21 Jahre betrug. Trotzdem zeichnet sich ein Trend zur Lebensdauererlängerung ab, da die Anlagenbetreiber den profitablen Betrieb der abgeschriebenen Anlagen ausschöpfen wollen und die Politik in Hinblick auf die Bereitstellung des Stroms für die steigende Nachfrage zunehmend unter Bedrängnis gerät.

Ein Blick in die Zukunft mittels Extrapolation des historischen Verlaufs oder eines Bestandsmodells zeigt über die kommenden Jahrzehnte eine sinkende Anlagenzahl und eine maximal gleichbleibende Atomstrommenge, da neue Anlagen eine deutlich größere Anlagenleistung aufweisen, als dies historisch der Fall war. Der Diffusionsprozess weist in jedem Fall eine große Trägheit (lange Zeitkonstanten) auf, was darauf schließen lässt, dass sich diese Technologie nicht dazu eignet, dynamische Probleme des globalen Energiesystems zu lösen.

7. Die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken

7.1 Einleitung und Fallbeispiele

Werden die in der Realität oft maßgeblichen hintergründigen Interessen an der Atomkraft wie etwa die Gewinnung von waffenfähigen Spaltstoffen oder gewisse Aspekte des Prestigegewinns oder einer nationalen Machtdemonstration bei Seite gelassen, so müsste in der heutigen Wirtschaftswelt (bei der Vernachlässigung aller gesellschaftlichen Risiken) und im speziellen in der Energiewirtschaft theoretisch alleine das ökonomische Kalkül über die Errichtung neuer Atomkraftwerke entscheiden.

Hier sind prinzipiell zwei Fälle zu unterscheiden. Der weitere Betrieb oder die Betriebsverlängerung eines Atomkraftwerkes, welches bereits geraume Zeit zuverlässig Strom produziert kann aus wirtschaftlicher Sicht hoch attraktiv sein, da die reinen Brennstoffkosten (siehe unten) nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Kapitalkosten ausmachen. Es ist somit klar, dass die Betreiber von Atomkraftwerken die äußerst rentable Betriebsphase einer Laufzeitverlängerung, selbst wenn damit Re-Investments verknüpft sind, unbedingt auskosten wollen. Das steigende technische Risiko, welches durch den fortwährenden Betrieb der alternden Anlage entsteht, wird in der Regel nicht monetär bewertet, zumal dieses Risiko nicht die Betriebsgesellschaft sondern die Allgemeinheit trägt.

Der zweite Fall ist die Neuerrichtung eines Atomkraftwerks. Hier sind potenzielle Investoren mit der ungeheuerlichen Investitionssumme einer solchen Anlage und mit dem vollen finanziellen Risiko des Baus (z.B. die in der Praxis auftretende dramatische Überschreitung der Baukosten und der Bauzeit) konfrontiert. Aus rein energiewirtschaftlichen Überlegungen heraus, ohne Einfluss anderer Faktoren wie der oben angeführten strategischen und militärischen Aspekte oder spezieller Sonderkonditionen, welche aus dem strategischen Interesse der Atomindustrie resultieren (Quersubventionierung durch Dumping, Kredit-Sonderkonditionen, Überwälzung der Risiken der Kernkraftnutzung auf die Gesellschaft), wird heute kein Atomkraftwerk errichtet.

Ein gutes Beispiel hierfür sind die Verhältnisse in den USA, deren Energiewirtschaft im Großen und Ganzen marktwirtschaftlichen Randbedingungen unterliegt. Die amerikanischen Reaktorbauer haben seit 1973 keine Bestellungen mehr entgegengenommen, die nicht im Anschluss wieder zurückgezogen wurden. Das letzte, 1973 bestellte Atomkraftwerk ging nach 20 Jahren Bauzeit an das Netz. US-Präsident Bush fasste bereits im Jahr 2005 den Entschluss, unter anderem den neuerlichen Ausbau von Kernkraft zu fördern. Beim Bau der ersten vier Atomkraftwerke sollten nach den Vorstellungen von Bush die Unternehmen vom Staat gegen Millionenausfälle im Fall von Verzögerungen beim Genehmigungsprozess versichert werden. Außerdem wurden staatliche Kreditgarantien für die Atomindustrie implementiert. Da selbst diese Anreize keine Investoren auf den Plan rufen konnten, muss davon ausgegangen werden, dass eine Investition in Atomkraftwerke in den USA absolut unwirtschaftlich ist.

In Westeuropa hat es 25 Jahre gedauert, bevor ein neues Projekt außerhalb Frankreichs bei der Atomindustrie bestellt wurde. 2004 war dies durch das Projekt Olkiluoto in Finnland der Fall, welches nur durch eine ganze Reihe von Sonderkonditionen als strategisches Projekt und Lebenszeichen der Atomindustrie abgewickelt wird. Finnland kauft den schlüsselfertigen Meiler von AREVA/Siemens um einen Fixpreis von 3 Mrd. Euro wobei die Fertigstellung für 2009 vereinbart wurde. Das Projekt hatte jedoch nach 16 Monaten Bauzeit bereits eine prognostizierte Verzögerung von anderthalb Jahren. Der Bau dieses weltgrößten AKWs in

Finnland wird durch die Bayrische Landesbank, die sich je zur Hälfte im Besitz des Freistaates und des Sparkassenverbandes befindet, mittels eines Kredits in Höhe von 1,95 Mrd. Euro mit einem Zinssatz von 2,6 % gefördert. Auch der Fixpreis selbst erwies sich bereits als strategischer Dumpingpreis, da eine Nachbestellung Finnlands zu denselben Konditionen nicht mehr möglich war.

Von besonderem Interesse sind Volkswirtschaften mit höchsten Wachstumsraten wie z.B. China. Alleine in den Jahren 2002 bis 2005 wurde in China zur Abdeckung des explodierenden Stromverbrauchs ein kohlebefeuerter Kraftwerkspark von 160 GW neu errichtet. Vergleichsweise erhöhen sich seit dem Jahr 2000 die weltweit installierten Kraftwerkskapazitäten jährlich um ca. 150 GW. Atomkraft hatte an diesem weltweiten Wachstum lediglich einen Anteil von ca. 2% (entspricht ca. 3 GW) und wurde damit sogar von der erst aufkeimenden Windkraftindustrie mit einer im Jahr 2006 neu installierten Leistung von 15 GW um das Fünffache (!) übertroffen⁹. Trotz der zu vernachlässigenden Rolle, welche die Atomenergie in China anteilmäßig bei der Bereitstellung von Strom spielt (10 Anlagen sind in Betrieb, 5 in Bau und 13 weitere werden geplant), wird diese Technologie von China gepflegt. Hierbei ist der Gesamtbeitrag zur Abdeckung des Strombedarfs offensichtlich bedeutungslos und die Wirtschaftlichkeit der Anlagen wohl auch, da im Falle einer Konkurrenzfähigkeit ja eine viel größere Anzahl von Anlagen gebaut werden müsste. China ist offensichtlich strategisch daran interessiert, diese Technologie nicht aus den Augen zu verlieren und braucht außerdem eine gewisse nukleartechnische Infrastruktur um waffenfähiges Spaltmaterial herzustellen.

7.2 Die Kosten der Kernkraftnutzung

Die Kosten der Kernenergienutzung setzen sich aus unterschiedlichen Kostenstellen zusammen, welche in Abbildung 7.1 dargestellt sind. Durch den hohen anlagentechnischen und sicherheitstechnischen Aufwand bedingt, belaufen sich rund 60% der Gesamtkosten auf die Investitionskosten. In der Literatur wird dieser Anteil grob mit 2/3 der Gesamtkosten beziffert. Weitere Kostenstellen sind die Brennstoffkosten (ca. 20%) und die Betriebs- und Erhaltungskosten (ca. 20%). Einige Kostenstellen wie beispielsweise die Endlagerung der ausgebrannten Brennelemente können schwer kalkuliert werden, da speziell in diesem Bereich keine Preise bekannt sind und die zur Endlagerung nötige Infrastruktur noch gar nicht existiert.

Die Praxis hat in der Vergangenheit oftmals gezeigt, dass die veranschlagten Baukosten während der Baudurchführung explodiert sind. Wesentliche Unsicherheitsfaktoren, welche die Baukosten entgleisen lassen sind:

- Kapitalkosten: Dieser größte Posten resultiert aus der Rückzahlung der Kredite. Veränderungen am Kapitalmarkt oder/und Veränderungen von Wechselkursen können (in Abhängigkeit von den entsprechenden Verträgen) dramatische Verteuerungen verursachen.
- Stilllegungskosten: Diese sind nicht zu unterschätzen, können jedoch wegen der Langfristigkeit des Gesamtprojektes kaum eingeschätzt werden, zumal weder die tatsächlichen technischen oder juristischen noch die politischen Randbedingungen der Stilllegung 40 bis 60 Jahre im Voraus bekannt sind.

⁹ GWEC (2006)

- Wartungs- und Reparaturkosten bzw. Instandhaltungskosten z.B. in die Sicherheitsausstattung: die Katastrophe von Tschernobyl hat z.B. eine Phase der Nachrüstung der Anlagen mit sicherheitstechnischer Ausrüstung ausgelöst, welche vorweg nicht absehbar war. Im Falle eines neuerlichen dramatischen Unfalls wäre, sofern dies dann nicht das sofortige Ende der Kernenergienutzung im allgemeinem bedeuten würde, mit weiteren Investitionen unvorhersehbaren Umfangs zu rechnen.
- Brennstoffkosten: Obwohl diese Kostenposition die kalkulierbarste von allen ist, muss auch in diesem Bereich wegen der Langfristigkeit der Projekte eine gewisse Unsicherheit eingeplant werden. Die Nachfrage nach entsprechenden Brennstoffen ist aber aus den bereits genannten Gründen über Jahrzehnte gut kalkulierbar, die Potenziale an Brennstoffen sind zumindest über den Zeitraum einer Anlagenlebensdauer hinweg abgesichert verfügbar.

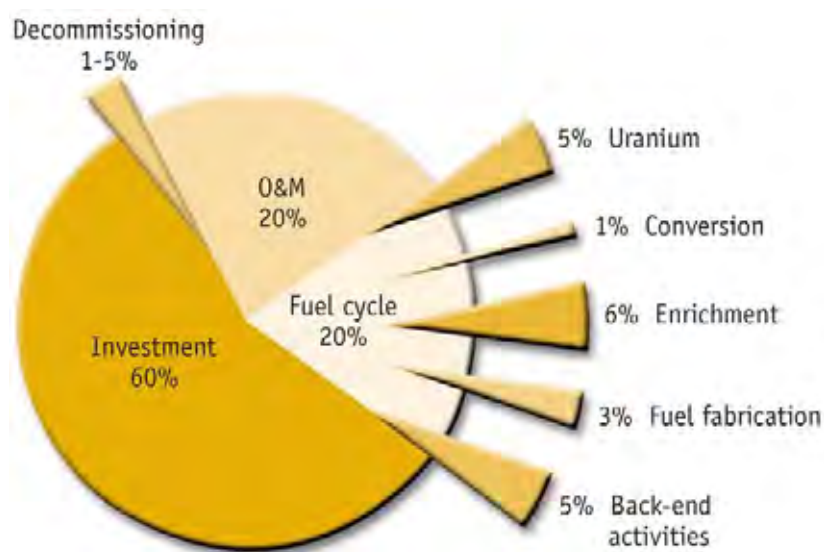


Abbildung 7.1: Aufteilung der Kosten der Kernkraftnutzung auf Kostenstellen;
Quelle: Rogner (2007)

Der hohe Anteil der Investitionskosten der Atomkraft hat historisch in den staatlich regulierten Monopolen der Elektrizitätswirtschaft keine große diffusionshemmende Wirkung entfaltet. Staaten haben diese gewaltigen Investitionen mit oder ohne Zustimmung der Bevölkerung durchgeführt, die entsprechenden Steuerzahler haben die Entscheidungen samt der damit verbundenen volkswirtschaftlichen Risiken getragen. Spätestens seit der Liberalisierung der Strommärkte sehen sich plötzlich private Unternehmen mit den gigantischen Investitionsanforderungen und zumindest mit einem Teil des finanziellen Risikos konfrontiert, was in der Folge dazu geführt hat, dass in den westlichen Ökonomien seit geraumer Zeit keine neuen Atomkraftwerke mehr gebaut wurden. Neue zu errichtende Atomkraftwerke sind aufgrund der hohen Kapitalkosten und der hohen Risiken gegenüber anderen Kraftwerkstypen nicht konkurrenzfähig. Anders verhält es sich natürlich bei alten, bereits abgeschrieben Anlagen, bei denen die Kapitalkosten entfallen und die Betreibergesellschaften aus einer Laufzeitverlängerung große Gewinne abschöpfen können.

Abbildung 7.2 dokumentiert die unterschiedlichen Kostenstrukturen von Atomkraftwerken, Kohlekraftwerken und Gaskraftwerken. Die Atomkraftwerke weisen den mit Abstand größten Anteil an Kapitalkosten auf. Die Kapitalkosten sind hierbei auch mit der Bauzeit korreliert,

was bedeutet, dass Atomkraftwerke die vergleichsweise längsten Bauzeiten aufweisen. Umgekehrt zeichnen sich Gaskraftwerke durch einen geringen Kapitalkostenanteil und eine sehr rasche Bauzeit aus. Die Investitionssicherheit ist bei Gaskraftwerken trotz des in den meisten Ländern importierten Energieträgers Erdgas höher, da eine Amortisation binnen kurzer Zeit gegeben ist und das Risiko, welches mit dem Gasbezug verknüpft ist, über diese kurze Zeit hinweg überschaubar ist. Die kurze Bauzeit von Gaskraftwerken entspricht überdies den Anforderungen des liberalisierten Strommarktes und der dynamischen Verbrauchsentwicklungen. Überdies haben Gaskraftwerke auch aus der Sicht der Betriebsführung, des Teillastverhaltens und der möglichen Dynamik in Hinblick auf das Gesamtversorgungssystem große Vorteile, welche von einem Atomkraftwerk nicht geboten werden können.

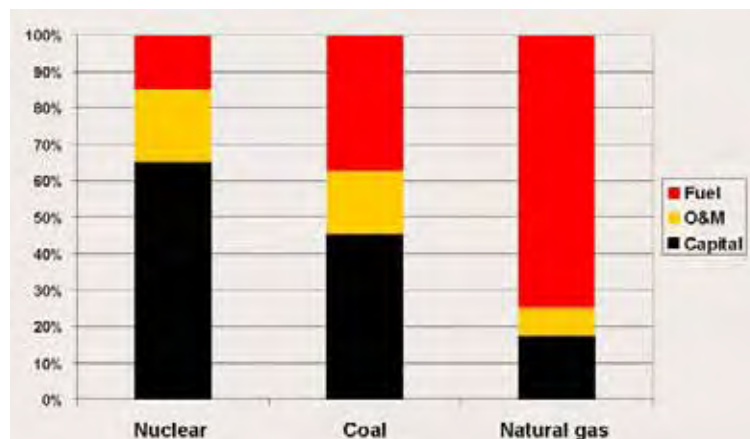


Abbildung 7.2: Vergleich der Kostenstruktur von unterschiedlichen Kraftwerkstypen;
Quelle: Rogner (2007)

Die historische Entwicklung der spezifischen Baukosten von Atomkraftwerken ist in Abbildung 7.3 anhand der tatsächlich aufgetretenen Kosten dargestellt. Die Baukosten sind in der Grafik auf die installierte elektrische Leistung der jeweiligen Anlage bezogen. Das Ergebnis ist diesbezüglich noch interessanter, da die Reaktoren im historischen Verlauf mit stets größerem Leistungsumfang produziert wurden und aus diesem Grund heraus Skaleneffekte bezüglich der spezifischen Kosten auftreten sollten. In der Realität ist jedoch das Gegenteil der Fall. Die Baukosten der Reaktoren haben sich über den Betrachtungszeitraum hinweg ständig erhöht.

Ursachen für die zu beobachtende Verteuerung liegen in den weiterentwickelten Reaktorkonzepten und im gestiegenen Aufwand für die sicherheitstechnische Ausstattung und in der sinkenden Stückzahl. Die jährliche Anzahl der in Auftrag gegebenen Anlagen ist mit der Zeit deutlich gesunken (siehe vorangegangene Abschnitte), was den umgekehrten Effekt einer Serienfertigung (Lerneffekte) bewirkte. Effiziente Produktionslinien sind bei den Stückzahlen der letzten Jahre ebenso wenig möglich, wie die Standardisierung von Komponenten oder die Standardisierung von ganzen Atomkraftwerken. In moderner Zeit wurden Atomkraftwerke zunehmend zu technologischen Unikaten, welche jeweils auch die gesamten Entwicklungskosten tragen müssen.

Aus der Sicht der Bauzeiten sind obige Mechanismen ebenso wirksam und im Endeffekt beeinflusst die Bauzeit auch maßgeblich die Baukosten. Aus Gründen der langen Diffusionszeitkonstanten der Atomtechnologie kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass sich am Trend der spezifischen Kosten in Zukunft rasche Änderungen ergeben.

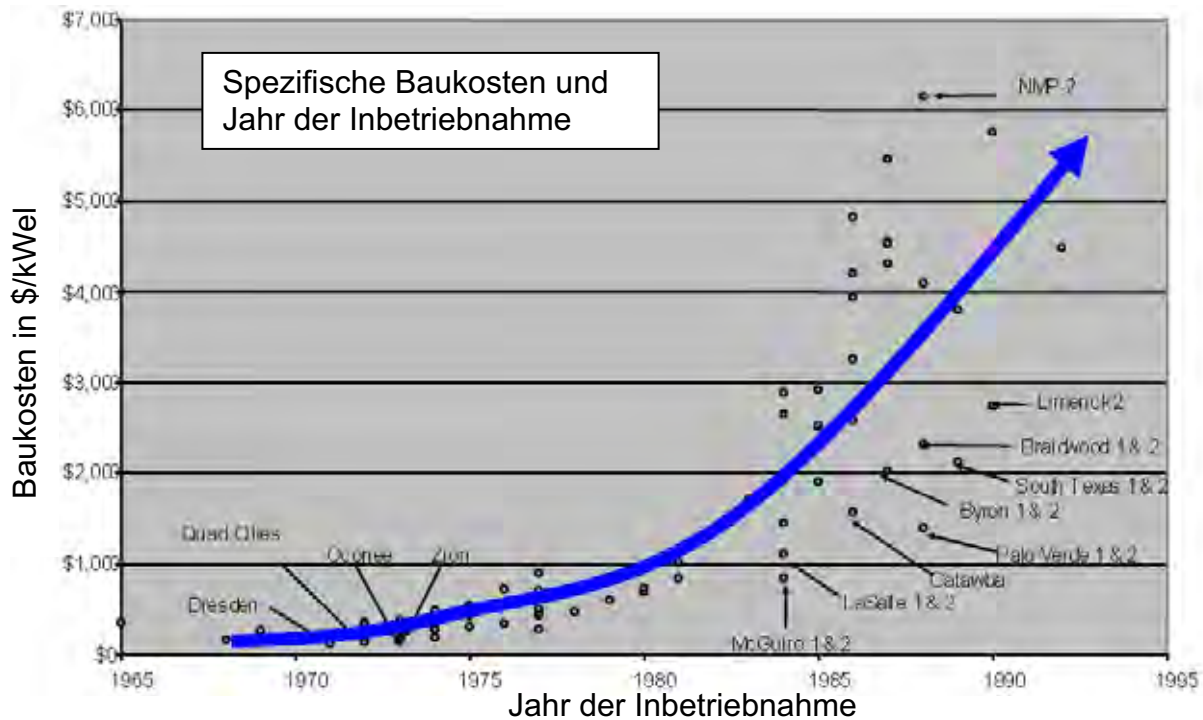


Abbildung 7.3: Die spezifischen Baukosten von Atomkraftwerken nach dem Jahr der Inbetriebnahme der Anlage; Quelle: Harding 2007;

Selbst im Fall des finnischen Atomkraftwerk-Projekts Olkiluoto, welches unter außergewöhnlich attraktiven wirtschaftlichen Randbedingungen (strategische Subventionierung durch Industrie und Kapitalmarkt, siehe oben) zustande gekommen ist, liegen die statischen spezifischen Baukosten bei der Auftragsvergabe bei umgerechnet 2751 US\$/kW¹⁰. Wie Steve Thomas in Böll (2006) beschreibt, sind Daten der tatsächlichen Baukosten von Atomkraftwerken schwierig recherchierbar und in den seltensten Fällen handelt es sich um geprüfte und offiziell bestätigte sowie nachvollziehbare Daten. Die verlässlichsten Daten sind hierbei jene von US-Atomkraftwerken, da diese geprüften Kosten der Behörde vorgelegt werden müssen um entsprechende Investments auf die Stromrechnung umlegen zu können. In den meisten anderen Fällen muss davon ausgegangen werden, dass publizierte Kostendaten einem strategischen Hintergrund dienen sollen. In Tabelle 7.1 sind diesbezüglich die vor Baubeginn geschätzten und die nach Bauabschluss tatsächlich angefallenen Kosten von US-Atomkraftwerken vergleichend gegenüber gestellt.

Tabelle 7.1: Divergenz von geschätzten spezifischen Baukosten und tatsächlichen spezifischen Baukosten von US-Atomkraftwerken; Quelle: Gielecki (1994).

| Baubeginn (Periode) | geschätzte Baukosten | tatsächliche Baukosten | tatsächliche Baukosten in % |
|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 1966-1967 | \$560/kW | \$1170/kW | 209% |
| 1968-1969 | \$679/kW | \$2000/kW | 294% |
| 1970-1971 | \$760/kW | \$2650/kW | 348% |
| 1972-1973 | \$1117/kW | \$3555/kW | 318% |
| 1974-1975 | \$1156/kW | \$4410/kW | 381% |
| 1976-1977 | \$1493/kW | \$4008/kW | 269% |

¹⁰ AKW Olkiluoto: 1600 MW, 3 Mrd Euro, 1875 Euro/kW; Wechselkurs Dollar/Euro 12.12.2007: 1,4672 US\$/€ d.h. 2751 US\$/kW;

In Tabelle 7.1 wird deutlich, dass die minimale Überschreitung der Baukosten über 100% (!) betrug, d.h. die Atomkraftwerke der entsprechenden Bauperiode kosteten im besten Fall das Doppelte der geschätzten Baukosten. In der schlechtesten Bauperiode trat eine Überschreitung von 381% auf, d.h. die Atomkraftwerke kosteten fast das Vierfache der vor Baubeginn geschätzten Summe.

Jene Zeit, welche von einer politischen Beschlussfassung zum Bau eines Atomkraftwerkes bis zur tatsächlichen kommerziellen Stromspeisung in das Stromnetz vergeht, ist noch deutlich länger, als die reine Bauzeit. In der Vorlaufzeit der Bauzeit müssen auch im Hinblick auf die Standortfrage langwierige öffentliche Verfahren durchlaufen werden. Diese Prozesse haben ebenfalls Kosten zur Folge, welche jedoch in der Regel von der Gesellschaft getragen werden und die nicht in den bisher genannten Baukosten enthalten sind.

Die Kosten des Risikos der Kernenergienutzung (siehe Unfälle in kerntechnischen Anlagen, Anhang A) sind nicht versicherbar. Ein internationales Abkommen¹¹ beschränkt die Haftung von Atomkraftwerksbetreiber auf Summen, welche die Schäden eines schweren Reaktorunfalls nicht abdecken können. Diese Haftungsbegrenzung ließ die Entwicklung der zivilen Atomkraftnutzung überhaupt erst zu und stellt eine große staatliche Subvention an die Atomindustrie dar. Im Falle eines schweren Unfalls trägt somit die Gesellschaft die Kosten.

Die Stilllegungskosten von Atomkraftwerken lassen sich aus mangelnder Erfahrung heraus kaum abschätzen. Auch sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen einer Stilllegung und Entsorgung von entsprechenden Kraftwerken in einigen Jahrzehnten heute nicht bekannt. Bei einer von Beginn des Betriebes an erfolgten Rückstellung von Mitteln für die Stilllegung beeinflusst diese Kostenposition die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojektes nur im geringen Umfang. Problematisch werden die Stilllegungskosten erst, wenn die Kosten von Anfang an zu niedrig veranschlagt wurden, innerbetriebliche Rückstellungen aufgelöst werden, oder der Anlagenbetreiber vor Ablauf der Anlagenlebensdauer Konkurs anmeldet. In diesen Fällen trägt wohl wieder die Gesellschaft die entsprechenden Kosten.

Die Endlagerkosten von nuklearen Abfällen (ausgebrannte Brennelemente oder Abfall aus der Stilllegung) sind heute unbekannt, zumal weltweit kein einziges Endlager zur Lagerung von zivilen nuklearen Abfällen aus Atomkraftwerken existiert und somit auch kein Marktpreis angegeben werden kann. Auch in diesem Bereich sind allfällige Rückstellungen von Anlagenbetreibern höchst spekulativ und eine spätere Kostendeckung ungewiss.

7.3 Stromerzeugungskosten im Vergleich

Bei Angaben zu Stromerzeugungskosten von Atomkraftwerken in unterschiedlichen Publikationen ist stets darauf zu achten, welche Kosten (siehe vorangegangene Abschnitte) in den Stromerzeugungskosten berücksichtigt wurden. In vielen Fällen ist dies nicht ersichtlich und nicht nachvollziehbar. Ein weiteres Problem stellen unsichere Kostenfaktoren dar, wie sie ebenfalls in Abschnitt 7.2 dokumentiert wurden. Die Stromerzeugungskosten eines Atomkraftwerkes können seriöser Weise im Prinzip erst nach abgeschlossener Stilllegung und Entsorgung samt Endlagerung des gesamten Kraftwerks angegeben werden. Bei konventionellen Kraftwerken ist diese Unsicherheit nicht gegeben, da die Kosten des

¹¹ Wiener Atomhaftungsabkommen von 1963, ergänzt 1997;

Rückbaus und der Entsorgung bekannt sind, und das Risiko überschaubar ist. Unter Berücksichtigung des gesellschaftlichen Risikos kann wohl überhaupt nur eine untere Schwelle für die Stromerzeugungskosten genannt werden. Wie hoch waren die Stromerzeugungskosten des Atomkraftwerkes Tschernobyl vor dem 26. April 1986 und wie hoch waren selbige danach? Sind diese Stromerzeugungskosten jemals berechnet worden und welcher Stromkonsument hat die Stromerzeugungskosten aus dem Atomkraftwerk Tschernobyl bezahlt?

Werden die angesprochen Unsicherheiten und Externalitäten nicht berücksichtigt, so können Stromerzeugungskosten ermittelt werden. Tabelle 7.2 zeigt einen Überblick über Bandbreiten von spezifischen Stromerzeugungskosten unterschiedlicher Kraftwerkstypen.

Tabelle 7.2: Bandbreite von Stromerzeugungskosten (ohne externe Kosten) für unterschiedliche Kraftwerkstypen; Quelle: Daten: Fritsche (2007), Berechnungen auf Basis der GEMIS-Datenbank; Darstellung: EEG (2007);

| Kraftwerkstyp | Stromerzeugungskosten ¹ in Eurocent/kWh _{el} | |
|---|---|------|
| | von | bis |
| Neues Atomkraftwerk (in Deutschland) | 4,5 | 5,5 |
| Steinkohle-Kraftwerk (Importkohle in Deutschland) | 4,0 | 5,0 |
| Steinkohle-Heizkraftwerk (Importkohle in Deutschland) | 2,5 | 3,5 |
| Erdgas-GuD-Kraftwerk | 4,0 | 5,0 |
| Erdgas-GuD-Heizkraftwerk | 3,5 | 4,5 |
| Erdgas-Blockheizkraftwerk | 7,0 | 8,0 |
| Biogas-Blockheizkraftwerk | 6,0 | 8,0 |
| Windkraft onshore | 8,0 | 9,0 |
| Windkraft offshore | 6,0 | 8,0 |
| Wasserkraft | 5,0 | 10,0 |
| Photovoltaik multikristallin | 30,0 | 50,0 |
| Effizienzmaßnahmen zur Reduktion des Stromverbrauchs | 3,0 | 6,0 |

¹ angenommener Kapitalzins für alle Kraftwerkstypen = real 7%

Die Stromerzeugungskosten von Atomkraftwerken bewegen sich gemäß Tabelle 7.2 in derselben Größenordnung wie etwa Steinkohle-Kraftwerke oder Erdgas-GuD-Kraftwerke. Deutlich günstigere Kosten sind bei Steinkohle-Heizkraftwerken und Erdgas-GuD-Heizkraftwerken zu beobachten. Die Berechnungen gehen dabei immer von der Errichtung von neuen Kraftwerken aus.

Thomas (2005) beschäftigt sich mit den Ursachen der unterschiedlichen Angaben von Stromerzeugungskosten von Atomkraftwerken in 10 verschiedenen aktuellen Studien. In Tabelle 7.3 sind die wesentlichen Annahmen und Kernaussagen dieser Studien vergleichend gegenüber gestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass alle dokumentierten Parameter starke Variationen aufweisen. Dies betrifft sowohl wesentliche Eingangsgrößen wie die Bauzeit, die Verzinsung des Kapitals oder die Laufzeit als auch Ergebnisse wie die spezifischen Erzeugungskosten oder die Baukosten. Auffällig sind weiters die sehr unterschiedlichen Angaben zu den Stilllegungskosten und der entsprechenden Vorsorge zu Bedeckung dieser Kosten.

Die Ergebnisse der Studien, welche alle den Anspruch auf realistische Annahmen in den gerechneten Szenarien erheben, reichen von Stromerzeugungskosten von 1,81 ct/kWh_{el} bis zu

9,06 ct/kWh_{el}. Der Mittelwert aus allen Szenarien der 10 Studien¹² liegt bei 4,9 ct/kWh_{el} und deckt sich damit gut mit den Angaben von Fritsche (2007). Ein großes Problem ist jedoch durch die Schwankungsbreite der Ergebnisse gegeben, die von sehr geringen Erzeugungskosten bis zu Erzeugungskosten reicht, die mit jenen von z.B. Onshore-Windkraftanlagen vergleichbar ist.

Eine weitere aktuelle Publikation von Hultman et al. (2007) untersucht die Stromerzeugungskosten von 99 U.S. Reaktoren. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.4 dargestellt und weist, nun auf empirischer Basis, ebenfalls eine sehr hohe Streuung der Einzelergebnisse auf. Die Verzinsung des Kapitals wurde für die Berechnungen generell mit 6% verhältnismäßig niedrig angesetzt. Die geringsten Stromerzeugungskosten sind bei ca. 3,2 US\$ Cent/kWh_{el} (Basis 2004) und die höchsten bei ca. 14,4 US\$ Cent/kWh_{el}. Der Mittelwert der Stromerzeugungskosten der untersuchten 99 Reaktoren beträgt ca. 6,0 US\$ Cent/kWh_{el}. Immerhin liegen bei 16% der Reaktoren die Stromerzeugungskosten über 8,0 US\$ Cent/kWh_{el} und bei 5% sind sie sogar größer als 12,0 US\$ Cent/kWh_{el}. Die Autoren der Studie beobachten einen Anstieg der Kapital- und Betriebskosten über der Zeit, wobei auch Verbesserungen der Effizienz und der Verfügbarkeit mit diesen Teuerungen einhergehen. Die sukzessive Verlängerung der Bauzeiten wird auf die steigenden sicherheitstechnischen Anforderungen zurückgeführt. Die Verfügbarkeit der Reaktoren ist von 52,9% im Jahr 1982 auf 87,4% im Jahr 2004 angestiegen.

12

1. „The role of nuclear power in enhancing Japan’s energy security“, James A Baker III, Institute for Public Politik an der Rice University, USA, Mai 2000;
2. Lappeenranta University of Technology (LUT), Finnish 5th Reactor Economic Analysis, Finnland, 2002;
3. „The economics of nuclear power“, UK Performance and Innovation Unit, Großbritannien, Februar 2002;
4. „Business case for early orders of new nuclear reactors“, Scully Capital, USA, September 2002;
5. „The future of nuclear power: an interdisciplinary MIT study“, Massachusetts Institute of Technology, USA, Februar 2003;
6. „The costs of generating electricity“, The Royal Academy of Engineers, Großbritannien, März 2004;
7. „The economic future of nuclear power“, University of Chicago, finanziert vom US-Energieministerium, USA, August 2004;
8. „Levelised unit electricity cost comparison of alternative technologies for base load generation in Ontario“, Canadian Energy Research Institute; vorbereitet für die Canadian Nuclear Association, Kanada, August 2004;
9. „Projected costs of generating electricity: 2005 update“, IEA/NEA, März 2005;
10. „Business case for early orders of new nuclear reactors“, OXERA, Großbritannien, April 2005.

Tabelle 7.3: Kosten der Atomkraftnutzung – Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Studien; Quelle: Thomas (2005), Umrechnung auf Euro und Darstellung: EEG (2007);

| Studie | Baukosten (Szenarien) (Euro ³ /kW _{el}) | Bauzeit (Monate) | Kapitalkosten (real) | Leistungsausnutzung (%) | Betrieb u. Wartung (ct/kWh) | Brennstoffkosten (ct/kWh) | Laufzeit (Jahre) | Stilllegungsplan | Erzeugungskosten (ct/kW _{h,el}) |
|---------------------------------------|--|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|---|---|
| Sizewell B ¹ | 3.119 4.158 | 86 | - | 84 | 3,13 | 1,90 | 40 | Sonderfonds und Cashflow | 9,06 ? |
| Rice University | | | | | | | | | 7,55 |
| Lappeenranta Univ. | 1.802 | | 5,0 % | 91 | 1,36 | 0,54 | 60 | | 2,42 |
| Performance & Innovation Unit | 1.155 | - | 8,0 % 8,0 % 15,0 % | >80 | | | 30 15 15 | | 3,49 4,27 5,72 |
| Scully Capital | 693 832 - 970 1.109 | 60 | | 90 | 1,51 | 0,76 | 40 | 393 Mio. Euro Rückstellungen über 40 Jahre Laufzeit | |
| Massachusetts Institute of Technology | 1.540 | 60 | 11,5 % | 85 75 | 2,27 ² | - | 40 25 | | 5,59 6,64 |
| Royal Academy of Engineers | 1.594 | 60 | 7,5 % | 90 | 1,21 | 1,09 | 40 | In den Baukosten enthalten | 3,47 |
| Chicago University | 770 1.155 1.386 | 84 | 12,5 % | 85 | 1,51 | 0,82 | 40 | 294 Mio. Euro | 4,38 5,13 5,89 |
| Canadian Nuclear Association | 1.478 | 72 | 10,0 % | 90 | 1,33 | 0,68 | 30 | Fonds 0,05ct/kWh | 4,98 |
| IEA/NEA | 1.540 – 3.465 | 60–120 | 5,0 – 10,0 % | 85 | 1,03 - 2,42 | 0,41 - 1,77 | 40 | In den Baukosten enthalten | 1,81-4,08 / 2,72 - 5,74 |
| OXERA | 2.252 erste Einheit 1.594 spätere Einh. | | | 95 | 0,95 | 0,82 | 40 | 755 Mio. Euro in Fonds nach 40 Jahren | |

¹ Die Sizewell B Betriebskosten entsprechen dem Durchschnitt aller acht von British Energy betriebenen Anlagen (sieben AGR-Reaktoren und der Sizewell B Druckwasserreaktor).

² Die Betriebs- und Wartungskosten enthalten in der MIT-Studie auch die Brennstoffkosten

³ Wechselkurs für die Umrechnungen (bezogen auf den 15.1.2007): 1 US\$ = 0,77Euro; 1 Pfund = 1,51 Euro;

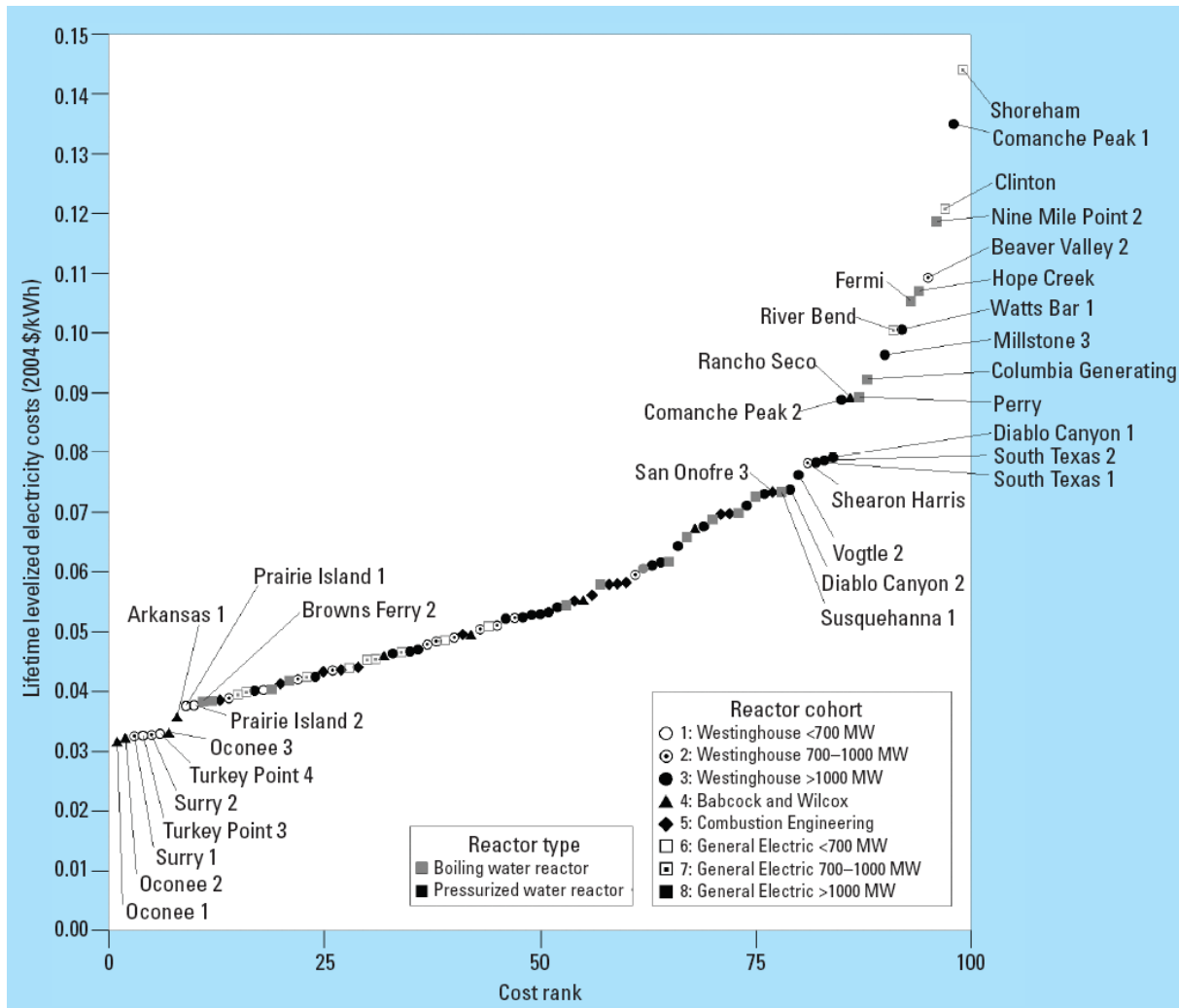


Abbildung 7.4: Verteilung der Stromerzeugungskosten von 99 U.S. Reaktoren; Quelle: Hultman et al. (2007);

7.4 Volkswirtschaftliche Aspekte der Kernkraftnutzung

Bei einem Vergleich von technologischen Optionen sollten zumindest für befassete Politiker und Volkswirte die nationalen volkswirtschaftlichen Gesamteffekte von öffentlichen Ausgaben von großer Relevanz sein. Von Interesse sind hierbei die nationale Wertschöpfung, die nationalen Arbeitplatzeffekte sowie weitere Aspekte wie die gesellschaftlich-strukturellen Effekte (z.B. Auswirkungen zentraler Ansätze vs. dezentraler Ansätze), die Zustimmung bzw. Ablehnung durch die Bevölkerung, oder das gesellschaftliche Risiko, welches aus dem Betrieb von Atomkraftwerken resultiert.

Nationale Wertschöpfung:

Die Höhe der nationalen Wertschöpfung ist direkt von der nationalen Fertigungs- u. Dienstleistungstiefe abhängig. Für ein Land, das selbst Atomkraftwerke herstellt, wie z.B. Frankreich, ist der Export von Atomkraftwerken oder die Installation von Atomkraftwerken im eigenen Land im Hinblick auf die Investition mit einer hohen inländischen Wertschöpfung und mit einem positiven Beitrag zur Außenhandelsbilanz verbunden. Da die Investition ca.

60% der Gesamtkosten eines Atomkraftwerkes ausmacht (siehe Abbildung 7.1), ist die damit verbundene Wertschöpfung z.B. für Frankreich äußerst attraktiv. Anders verhält es sich jedoch für Länder, die diese Technologie importieren wollen und keine eigene Atomindustrie besitzen. Die Wertschöpfungsbilanz bezüglich der Investition ist hier negativ, da es sich um eine sehr spezielle Technologie handelt, bei der nur geringe nationale Wertschöpfungsanteile durch die Beistellung von allgemeinen Arbeiten (z.B. Elemente des Hoch- und Tiefbaus) eingebracht werden können.

Die Möglichkeiten zur Generierung einer nationalen Wertschöpfung aus den weiteren Kostenbereichen des Brennstoffzyklus und des allgemeinen Betriebs sind ebenfalls differenziert zu sehen. Der Brennstoff selbst ist zumindest für den Bereich der EU immer ein Importgut. Die Brennstoffanreicherung und die Herstellung der Brennelemente sind wenigen Staaten wie z.B. Frankreich vorbehalten. Und auf eine mögliche Wertschöpfung aus der Zwischen- und Endlagerung der atomaren Abfälle wird jeder Politiker und Volkswirt angesichts der Popularität dieses Themas gerne verzichten. Eine nationale Wertschöpfung aus dem Betrieb eines Atomkraftwerkes resultiert vor allem aus dem Verkauf des produzierten elektrischen Stromes. Dieser kann wiederum im Inlandsmarkt oder als Exportgut verkauft werden.

Arbeitsplatzeffekte

Im Bereich der Arbeitsplatzeffekte liegen ähnliche Verhältnisse wie bei der nationalen Wertschöpfung vor. Länder mit einer etablierten Atomindustrie können auf Arbeitsplatzeffekte durch den Bau und Export von Atomkraftwerken verweisen. Länder, die Atomkraftwerke ohne entsprechende eigene industrielle Infrastruktur importieren, können Arbeitsplatzeffekte maximal im Bereich des Betriebes der Anlage verzeichnen, obwohl auch diese Effekte beim Fehlen jeglicher historischer Expertise gering sind, das entsprechende Humankapital also zugekauft werden muss.

Gesellschaftlich-strukturelle Effekte

Durch die heute aus ökonomischen Gründen notwendiger Weise sehr großen Leistungsgrößen von Atomkraftwerken (größer 1000 MW) stellt eine entsprechende Anlage ein zentrales System dar. Dieses führt nicht nur zu einer räumlichen Konzentration von volkswirtschaftlichen Effekten, sondern stellt auch in Hinblick auf die Versorgungssicherheit ein höheres Risiko dar, als dies bei verteilten Strukturen der Fall ist.

Gesellschaftliche Risiken

Die gesellschaftlichen Risiken sind multidimensional und werden in aller Regel bei einer Bewertung von Atomkraftwerken nicht monetarisiert, da die Errichtung und der Betrieb entsprechender Anlagen unter der Berücksichtigung dieser Aspekte nicht durchführbar wären.

Die gesellschaftlichen Risiken können in die folgenden Bereiche untergliedert werden:

- Staatliche Garantien im Zuge der Errichtung von Atomkraftwerken. Diese Garantien sollen Anreize für Investoren schaffen. Je nach Gestaltung dieser Garantien übernimmt die Gesellschaft einen Teil des wirtschaftlichen Risikos des Investors. Entsprechende Garantien wurden beispielsweise von der Bush-Administration für Atomkraft-Investoren in Aussicht gestellt (allerdings ohne dass diese etwas bewirken konnten).

- Unfallrisiko. Der Betrieb von Atomkraftwerken ist nur beschränkt versicherbar. Internationale Verträge regeln dabei Haftungsgrenzen, welche die katastrophalen Folgen von schweren Atomkraftunfällen nicht annähernd abdecken können. Die Risiken werden somit von der Bevölkerung getragen (siehe die Katastrophe von Tschernobyl).
- Dekommissionierung. Das wirtschaftliche Risiko der vorweg nicht kalkulierbaren Kosten der Dekommissionierung eines Atomkraftwerkes wird weitestgehend von der Bevölkerung getragen. Dekommissionierungsrückstellungen werden automatisch aufgrund konservativer Annahmen über die entsprechenden Prozeduren und deren Kosten dimensioniert. Bei einer allfälligen Zahlungsunfähigkeit des Anlagenbetreibers übertragen sich die Kosten der Stilllegung überhaupt zur Gänze auf den Staat.
- Endlagerung. Die Kosten der Endlagerung, welche heute noch immer nicht bezifferbar sind, werden von den zukünftigen Generationen bezahlt werden müssen. Durch die in der dynamischen Kostenrechnung gebräuchliche Abzinsung von zukünftigen Zahlungen wird diese Position kaum bewertet, was die mit dem Atommüll konfrontierten Generationen wohl anders bewerten werden.

7.5 Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken

Die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken ist nach einer strukturellen qualitativen und quantitativen Betrachtung vor allem durch sehr lange Zeitkonstanten (Genehmigungsverfahren, Projektierungszeit, Bauzeit), großen Kapitalbedarf und durch große ökonomische Unsicherheiten charakterisiert.

Alleine diese Eigenschaften können schon erklären, weshalb unter den Rahmenbedingungen liberalisierter Energiemärkte in westlichen Industriestaaten neue Atomkraftwerke nur in Ausnahmefällen unter besonderen Randbedingungen errichtet werden. Ausnahmen wie das in Bau befindliche Atomkraftwerk in Finnland kommen nur durch strategisch motiviertes industrielles Preisdumping (garantierter niederer Fixpreis) und hochgradig subventionierte Kredite (Zinssatz 2,6%!) zu Stande. Wirtschaftlich hoch attraktiv ist für die Betreiber von Atomkraftwerken jedoch die Laufzeitverlängerung von alten (abgeschriebenen) Atomkraftwerken. Der Gewinn aus diesen Anlagen kann aufgrund der Kostenstruktur von Atomkraftwerken aus betriebswirtschaftlicher Sicht sehr hoch sein.

Eine Realisierung von Atomkraftwerken ist nur durch eine Haftungsbegrenzung bei atomaren Unfällen möglich, die in einem internationalen Abkommen geregelt ist. Das entsprechende Risiko und die damit in Zusammenhang stehenden Kosten werden in der Folge von der Gesellschaft getragen, was ebenfalls eine hohe öffentliche Subvention für die Atomindustrie darstellt.

Selbst Volkswirtschaften mit sehr großem Energieverbrauchswachstum wie etwa China, setzen nicht auf die nukleare Option. Nur ein kleiner Bruchteil des chinesischen Stromverbrauchs wird atomar gedeckt, obwohl die Errichtung von neuen Atomkraftwerken in China angesichts der politischen Strukturen rasch in die Wege geleitet werden könnte und wegen des möglicher Weise anderen Zugangs zu sicherheitstechnischen Aspekten auch geringere Baukosten als z.B. in Westeuropa verursachen würde. China betreibt und baut indes nur eine geringe Anzahl an Atomkraftwerken. Diese Anlagen werden wohl einerseits aus technologiestrategischen und andererseits aus militärischen Gründen errichtet.

Die Risikofaktoren für einen Investor sind die unzuverlässigen Angaben über die Baukosten, die Bauzeit und die nicht verfügbaren Angaben über die Kosten des Rückbaus und der Entsorgung bzw. Endlagerung der nuklearen Abfälle. Durch die langen Bauzeiten ergeben sich weitere Unsicherheiten durch die in diesen Zeiträumen möglichen Veränderungen der Kapitalmärkte, der Wechselkurse, der politischen Landschaft in einem Staat sowie der langfristigen Entwicklung des Energieverbrauchs.

Ökonomische Lernkurven können im Fall der Atomkraftwerke nicht beobachtet werden. Durch die sukzessive Verschärfung der Sicherheitsvorschriften (besonders jedoch nach der atomaren Katastrophe von Tschernobyl) und der stark abnehmenden Stückzahlen der neuen Atomkraftwerke und fortlaufendem Entwicklungsaufwand kommt es zu einer ständigen Verteuerung der Anlagen. Die Atomindustrie wurde im Laufe der Geschichte dieser Technologie nicht müde, das Einsetzen von Lerneffekten anzukündigen (siehe Abbildung 7.4), diese sind in der Praxis jedoch noch nicht eingetreten.

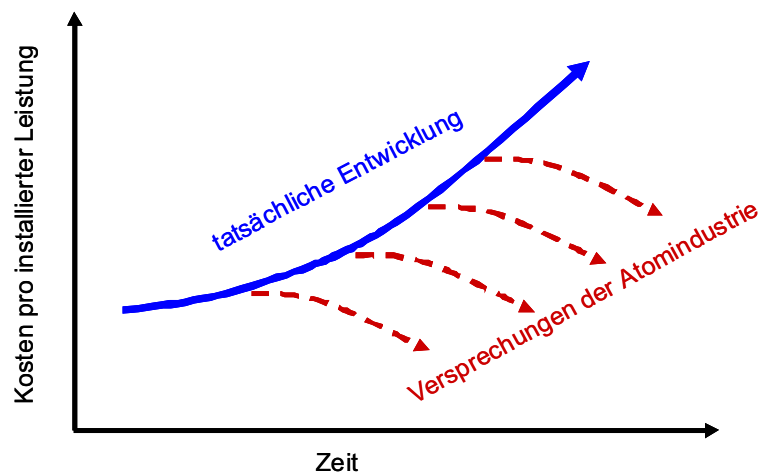


Abbildung 7.4: qualitative Entwicklung der spezifischen Kosten von Atomkraftwerken;
Quelle: EEG (2007);

8. Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Kernenergienutzung?

Dieses Argument wird heute gerne von Vertretern der Atomindustrie und von entsprechenden Politikern verwendet, um den Betrieb, die Betriebsverlängerung oder sogar den Neubau von Atomkraftwerken zu argumentieren. Manche Atomkraft-Lobbyisten gehen sogar so weit, eine zukünftige Lösung der Treibhausgasproblematik auf Basis von Atomkraft in Aussicht zu stellen. Es werden dabei jedoch zwei wesentliche Aspekte außer Acht gelassen:

1. Wenn die Atomkraft in Zukunft einen bedeutsamen Beitrag zur Treibhausgasminderung leisten sollte, müsste ein noch nie dagewesener Bau von Atomkraftwerken in einer Geschwindigkeit erfolgen, die weder aus technischer noch aus volkswirtschaftlicher Sicht in irgend einer Weise vorstellbar oder gar machbar wäre.
2. Der Bau und der Betrieb von Atomkraftwerken sind keineswegs CO₂-neutral. Sowohl in den Atomkraftanlagen als auch im Kernbrennstoff selbst ist ein hohes Maß an Grauer Energie enthalten. In einer gesamtheitlichen Bilanzierung ist der Effekt der Treibhausgasminderung somit deutlich kleiner als in einer naiven Betrachtung.

8.1 Stellenwert der Atomkraft im globalen Energiesystem

Die Datenbasis für die nachfolgenden Überlegungen ist aus dem World Energy Outlook 2007 der IEA entnommen und bezieht sich auf das Referenzszenario¹³. Der weltweite Primärenergieverbrauch nach Primärenergieträgern ist in Tabelle 8.1 dokumentiert und in Abbildung 7.1 dargestellt.

Tabelle 8.1: Primär-Weltenergieverbrauch im Referenzszenario nach Primärenergieträgern; Quelle: IEA (2007);

| Energieträger | Primärenergieverbrauch in Mtoe | | | | | durchschn. Wachstum in der Periode 2005-2030 |
|-----------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|--|
| | 1980 | 2000 | 2005 | 2015 | 2030 | |
| Kohle | 1.786 | 2.292 | 2.892 | 3.988 | 4.994 | 2,2% |
| Öl | 3.106 | 3.647 | 4.000 | 4.720 | 5.585 | 1,3% |
| Gas | 1.237 | 2.089 | 2.354 | 3.044 | 3.948 | 2,1% |
| Nuklear | 186 | 675 | 721 | 804 | 854 | 0,7% |
| Wasserkraft | 147 | 226 | 251 | 327 | 416 | 2,0% |
| Biomasse und Müll | 753 | 1.041 | 1.149 | 1.334 | 1.615 | 1,4% |
| Andere Erneuerbare | 12 | 53 | 61 | 145 | 308 | 6,7% |
| Summen / Durchschnitt | 7.227 | 10.023 | 11.428 | 14.362 | 17.720 | 1,80% |

Das Szenario zeigt eine konservative Entwicklung mit einem bis zum Jahr 2030 ungebrochenen Energieverbrauchswachstum. Das Wachstum des Gesamt-Primärenergieverbrauchs beträgt im Zeitraum von 2005 bis 2030 dabei 1,8% pro Jahr. Die größte Wachstumsrate weisen die "anderen Erneuerbaren" mit 6,7% pro Jahr auf. In diesem Sektor sind biogene Treibstoffe, Windkraft, Geothermie, Solarthermie, Photovoltaik und weitere Erneuerbare zusammengefasst. Trotz dieser hohen Wachstumsrate erlangen die

¹³ Das Referenzszenario des World Energy Outlook berücksichtigt die Umsetzung aller bis Mitte 2007 implementierten Maßnahmen. Die Annahmen bezüglich demografischer Entwicklung, Entwicklung der GDP und der Energiepreise sind als moderat und plausibel zu bezeichnen.

“anderen Erneuerbaren“ bis 2030 wegen des geringen Startwertes und des weiteren Wachstums der anderen Sektoren im Betrachtungszeitraum jedoch nur einen sehr kleinen Anteil von 1,7%. Der mit Abstand größte Anteil des Wachstums wird mittels zusätzlichen Einsatzes der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas abgedeckt.

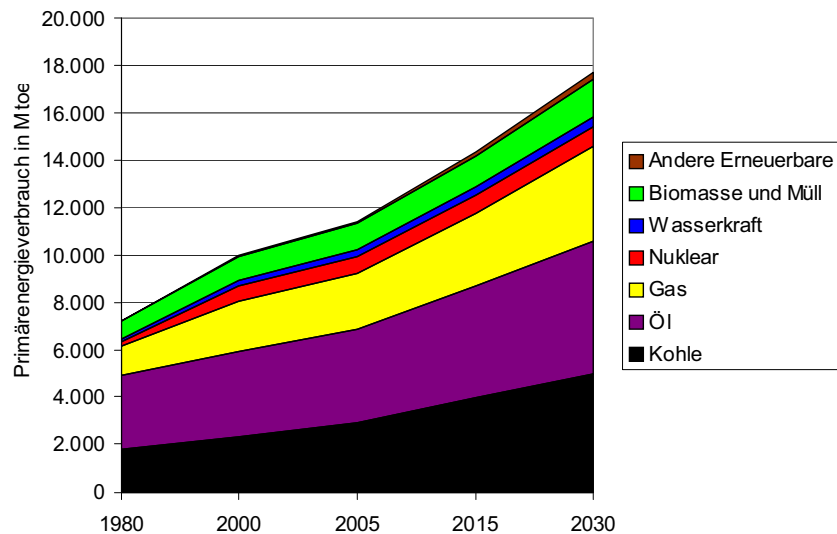


Abbildung 8.1: Die Entwicklung des Primär-Weltenergieverbrauchs nach Primärenergieträgern im Referenzszenario; Quelle: IEA (2007);

Die Rolle der Atomkraft ist von dem bereits ausführlich in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten historischen Wachstum und einer anschließenden Stagnation geprägt. Der energetische Output der Atomkraft ist bis zum Jahr 2030 leicht steigend, wobei die Wachstumsrate mit 0,7 % pro Jahr die geringste Rate von allen Energieträgern ist. Dieses Ergebnis ist aus der Warte der Atomenergie insofern besonders ernüchternd, da es sich um ein sehr konservatives Szenario handelt. Wird die Entwicklung der Anteile der einzelnen Energieträger am Gesamt-Primärenergieverbrauch betrachtet, so sinkt der Deckungsanteil der Kernenergie sogar sehr deutlich (siehe Abbildung 8.2). Ein weiterer anteilsmäßiger Rückgang ist bei Erdöl zu verzeichnen, große Steigerungen treten bei Kohle und Gas auf.

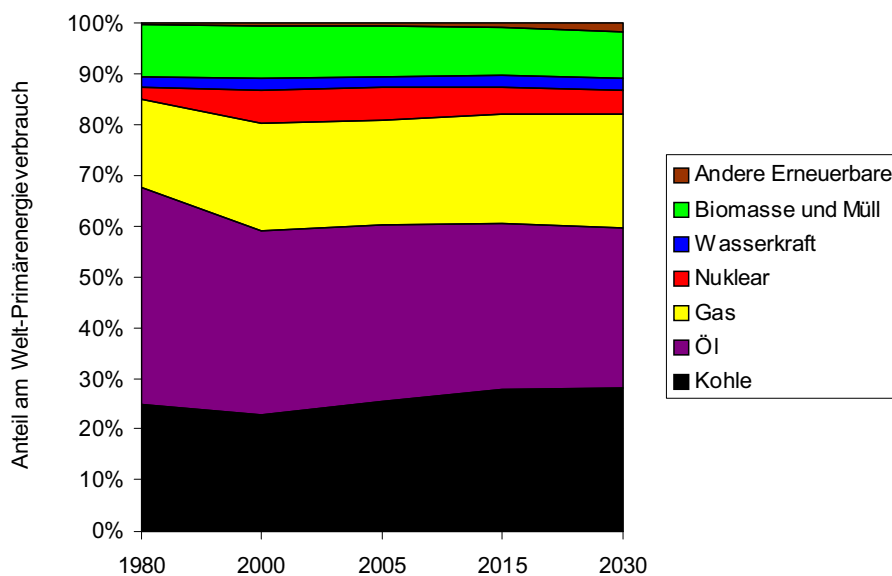


Abbildung 8.2: Die Entwicklung des Anteils der Primärenergieträger am Weltenergieverbrauch im Referenzszenario; Quelle: IEA (2007);

Die Verhältnisse im Jahr 2005 sind in Abbildung 8.3 dargestellt. Der Gesamt-Primärenergieverbrauch der Welt beträgt im Jahr 2005 einen Wert von 11.428 Mtoe. Der Anteil der Kernenergie am Gesamtverbrauch war dabei 721 Mtoe (das sind 6,3% des Gesamtverbrauchs).

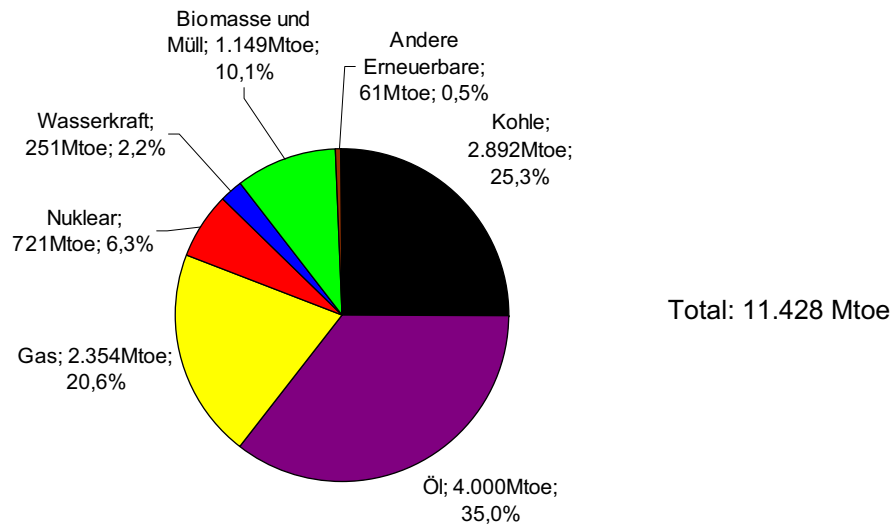


Abbildung 8.3: Der Primär-Weltenergieverbrauch nach Primärenergieträgern im Jahr 2005; Quelle: IEA (2007);

Bei der Diskussion der Bedeutung der Atomkraft für die Treibhausgasemissionen sind in der Folge 2 Aspekte von wesentlicher Bedeutung: 1. Bei der Beurteilung der momentanen Bedeutung stellt sich die Frage, welche Energieträger von der Kernenergie substituiert werden – denn davon hängt die Menge an eingespartem CO₂ ab. 2. Bei der Beurteilung der zukünftigen Bedeutung ist der zukünftige Ausbau der Kernenergie die wesentliche Einflussgröße. Als Hintergrundinformation ist in Tabelle 8.2 die Entwicklung des Weltstromverbrauchs nach Weltregionen dargestellt. Beachtlich ist hierbei vor allem das große Stromverbrauchswachstum in den Entwicklungsländern.

Tabelle 8.2: Weltstromverbrauch im Referenzszenario nach Regionen; Quelle: IEA (2007);

| Weltregionen | Stromverbrauch in TWh | | | | | durchschn. Wachstum in der Periode 2005-2030 |
|---------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| | 1980 | 2000 | 2005 | 2015 | 2030 | |
| OECD | 4738 | 8226 | 8948 | 10667 | 12828 | 1,5% |
| Nordamerika | 2385 | 4140 | 4406 | 5227 | 6390 | 1,5% |
| Europa | 1709 | 2700 | 2957 | 3467 | 4182 | 1,4% |
| Pazifik | 645 | 1386 | 1585 | 1973 | 2257 | 1,4% |
| Schwellenländer | 1098 | 1015 | 1099 | 1381 | 1729 | 1,8% |
| Russland | k.A. | 607 | 647 | 792 | 968 | 1,6% |
| Entwicklungsländer | 958 | 3368 | 4969 | 9230 | 15180 | 4,6% |
| China | 259 | 1081 | 2033 | 4409 | 7100 | 5,1% |
| Indien | 90 | 369 | 478 | 950 | 2104 | 6,1% |
| Rest-Asien | 129 | 575 | 766 | 1306 | 1927 | 3,8% |
| Mittlerer Osten | 75 | 371 | 501 | 779 | 1228 | 3,6% |
| Afrika | 158 | 346 | 457 | 669 | 1122 | 3,7% |
| Lateinamerika | 248 | 626 | 734 | 1116 | 1700 | 3,4% |
| Welt | 6794 | 12609 | 15016 | 21278 | 29737 | 2,8% |
| EU | k.A. | 2524 | 2755 | 3179 | 3786 | 1,3% |

8.2 Gesamtheitliche Bilanzierung der Atomkraftnutzung

Bei einer oberflächlichen Betrachtung emittiert ein einmal fertig gestelltes und mit Brennstoff versorgtes Atomkraftwerk keine Treibhausgase. Dabei werden jedoch zwei wesentliche Punkte vernachlässigt:

1. In einem Atomkraftwerk steckt Graue Energie, welche bei der Produktion und der Verarbeitung der Baustoffe (es werden alleine für das Containment große Mengen an Stahl und Beton eingesetzt) aufgebracht werden müssen. Die dabei eingesetzte Energie stammt fast ausschließlich aus fossilen Ressourcen und stellt damit zunächst eine massive fossile "Einzahlung" auf das CO₂-Konto eines Atomkraftwerks dar.
2. Der eingesetzte Brennstoff wird in aufwändiger Bergbautätigkeit gewonnen und in zahlreichen Arbeitsschritten bis zum verwendbaren Brennelement weiter verarbeitet, wobei sämtliche Schritte der Brennstoffgewinnung wiederum mit fossiler Energie bewerkstelligt werden. Die Gewinnung des Brennstoffes ist sehr energieintensiv was in der Folge auch bei einer CO₂-Bilanzierung mit berücksichtigt werden muss.

Die CO₂-Äquivalente für Strom aus Atomkraftwerken werden unter anderem von Fritsche (2007) errechnet und mit 0,032 kg/kWh_{el} für den Betrieb mit dem Uran-Mix von Deutschland und mit 0,065 kg/kWh_{el} für den Betrieb mit Uran aus Russland angegeben. In einer Studie von Bilek et al. (2006) wird ein Wert von 0,065 kg/kWh_{el} für Australien angegeben, wo Uranerz mit einem Urangehalt von 0,15% gefördert wird. Die Tendenz ist im allgemeinen als steigend zu betrachten, da die verarbeiteten Uranerze einen sukzessiv sinkenden Urangehalt aufweisen, was wiederum einen erhöhten Verarbeitungsaufwand mit sich bringt. Für die weiteren Abschätzungen wird der CO₂-Äquivalent Emissionskoeffizient von Atomstrom mit 0,050 kg/kWh_{el} angenommen. Dieser Wert und die Emissionskoeffizienten der anderen Primärenergieträger sind in Tabelle 8.3 dokumentiert.

Tabelle 8.3: Primärenergie – Emissionskoeffizienten zur Abschätzung der CO₂-Relevanz der Atomkraft; Quelle: EEG (2007);

| Primärenergieträger | kg CO _{2äqu} /kWh _{primär} |
|----------------------|--|
| Kohle (globaler Mix) | 0,349 |
| Öl | 0,279 |
| Gas | 0,202 |
| Nuklear | 0,050 |
| Wasserkraft | 0,040 |
| Biomasse und Müll | 0,030 |
| Andere Erneuerbare | 0,050 |

In Tabelle 8.4 werden 3 Szenarien verglichen, die den Stellenwert der Kernenergie in Hinblick auf die Einsparung von Treibhausgasen veranschaulicht. Ausgangspunkt ist die globale Treibhausgasemission aus dem energetischen Bereich. Im Jahr 2005 wurden gemäß der Kalkulation global 31.206 Mio. Tonnen CO_{2äqu} emittiert. Wenn alle Atomkraftwerke durch moderne Erdgas-GuD-Kraftwerke substituiert werden würden, käme es zu einer zusätzlichen Emission von 2.501 Mio. Tonnen CO_{2äqu}. Dies entspricht umgekehrt einer Einsparung von Treibhausgasen durch die Atomkraft auf das Erdgasszenario bezogen von 7,4%. Wenn alle Atomkraftwerke durch moderne Kohlekraftwerke ersetzt werden würden, käme es zu einer Zunahme der Emissionen um 6.084 Mio. Tonnen CO_{2äqu}. Auf das Kohleszenario bezogen entspricht dies einer Einsparung von 16,3% durch den Einsatz der

Atomkraft. Diese beiden Grenzwerte beschreiben den Raum, in dem sich der Effekt der Atomkraft – je nach Substitutionsszenario – bewegen kann.

Tabelle 8.4: Einsparungen von Treibhausgasen durch den Einsatz von Atomkraft; Quelle: EEG (2007);

| Primärenergieträger | globale CO _{2äqu} Emissionen im Jahr 2005 in Mio. Tonnen | | |
|---------------------|---|---|---|
| | Nuklear (nicht substituiert) | Nuklear substituiert durch Erdgas GuD $\eta = 58\%$ | Nuklear substituiert durch Kohlekraft $\eta = 45\%$ |
| Kohle | 11.724 | 11.724 | 11.724 |
| Öl | 12.979 | 12.979 | 12.979 |
| Gas | 5.530 | 5.530 | 5.530 |
| Nuklear | 419 | 2.920 | 6.503 |
| Wasserkraft | 117 | 117 | 117 |
| Biomasse und Müll | 401 | 401 | 401 |
| Andere Erneuerbare | 35 | 35 | 35 |
| Summe | 31.206 | 33.707 | 37.290 |
| Einsparung absolut | | 2.501 | 6.084 |
| Einsparung relativ | | 7,4% | 16,3% |

8.3 Zukünftiges Potenzial der Treibhausgasreduktion durch die Atomkraftnutzung

Wie in den Abschnitten 8.1 und 8.2 gezeigt wurde, kommt es durch den Einsatz der Atomkraft zu Einsparungen von Treibhausgasen in einer Größenordnung von ca. 2.500 Mio. Tonnen bei einer Substitution von Gaskraftwerken und von ca. 6.100 Mio. Tonnen bei einer Substitution von Kohlekraftwerken. Das weitere zukünftige Einsparpotenzial, vor allem in Anteilen der globalen Gesamtemissionen muss jedoch aufgrund der rasanten Wachstumsraten des Energieverbrauchs und der schleppenden Technologiediffusion der Atomkraft als gering eingeschätzt werden. Bereits in den nächsten Jahren entsteht ein zusätzlicher globaler elektrischer Leistungsbedarf von 70 bis 100 GW_{el} pro Jahr. Hinzu kommt zusätzlich der Ersatz von alten Kraftwerken, die ihre Lebensdauer erreicht haben. Bei den momentanen Diffusionsraten der Atomkraft von 4 bis 5 Anlagen pro Jahr ist der Beitrag zu diesem Wachstum marginal. Die zukünftige Bedeutung der Atomkraft in Hinblick auf die Reduktion der globalen Treibhausgase wird, bedingt durch den allgemeinen Verbrauchsanstieg, in der Folge deutlich reduziert.

9. Brennstoffreserven und Endlagerung

9.1 Die Urangewinnung und verfügbare Reserven

Die großtechnische Gewinnung von Uran begann nach dem Zweiten Weltkrieg. Zunächst, um Spaltmaterial für Atomwaffen zu gewinnen und anschließend auch für die zivile, energetische Nutzung der Atomkraft. Es entwickelte sich ein Markt für kommerziell gehandeltes Uran. Am Ende des Kalten Krieges wurde eine große Menge Uran aus militärischen Beständen verfügbar, das ebenfalls dem Markt für die energetische Nutzung zugeführt wurde und viele Jahre einen großen Teil des Uranbedarfs abgedeckt hat. Dies bewirkte einen Rückgang des Uranpreises und nur noch die ertragreichsten Minen konnten wettbewerbsfähig produzieren. Laut IAEA und IEA belief sich der weltweite Uranverbrauch im Jahr 2004 auf 67.450 Tonnen. Davon stammten 40.263 Tonnen (das sind ca. 60%) aus dem Bergbau, der Rest stammt aus der sekundären Verwertung von Atomwaffen. Der Anteil aus dem Bergbau ist von 2003 auf 2004 um 12% gestiegen. Der sinkende Anteil „billigen“ Spaltmaterials erhöhte in der Folge die Uranpreise. Abbildung 9.1 skizziert den historischen Verlauf des Uranpreises.

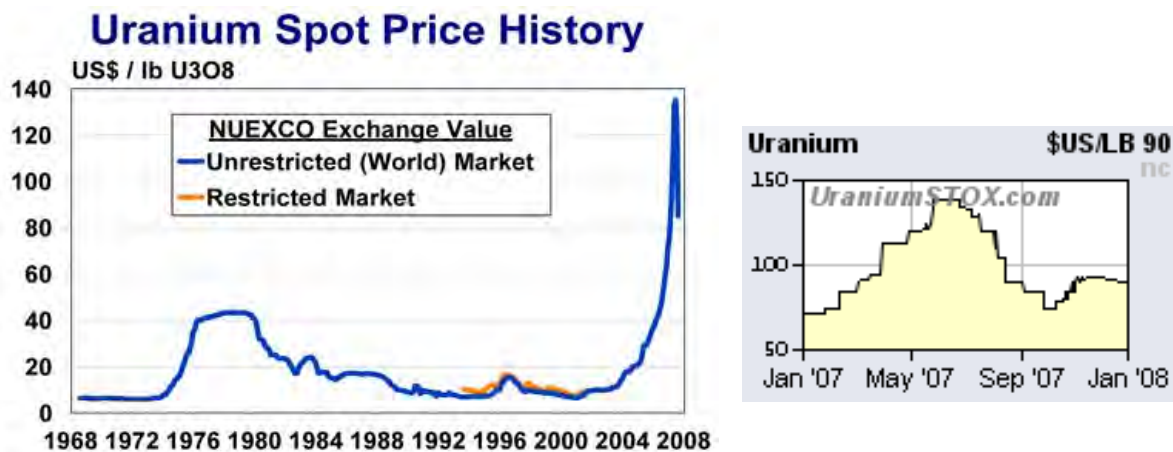


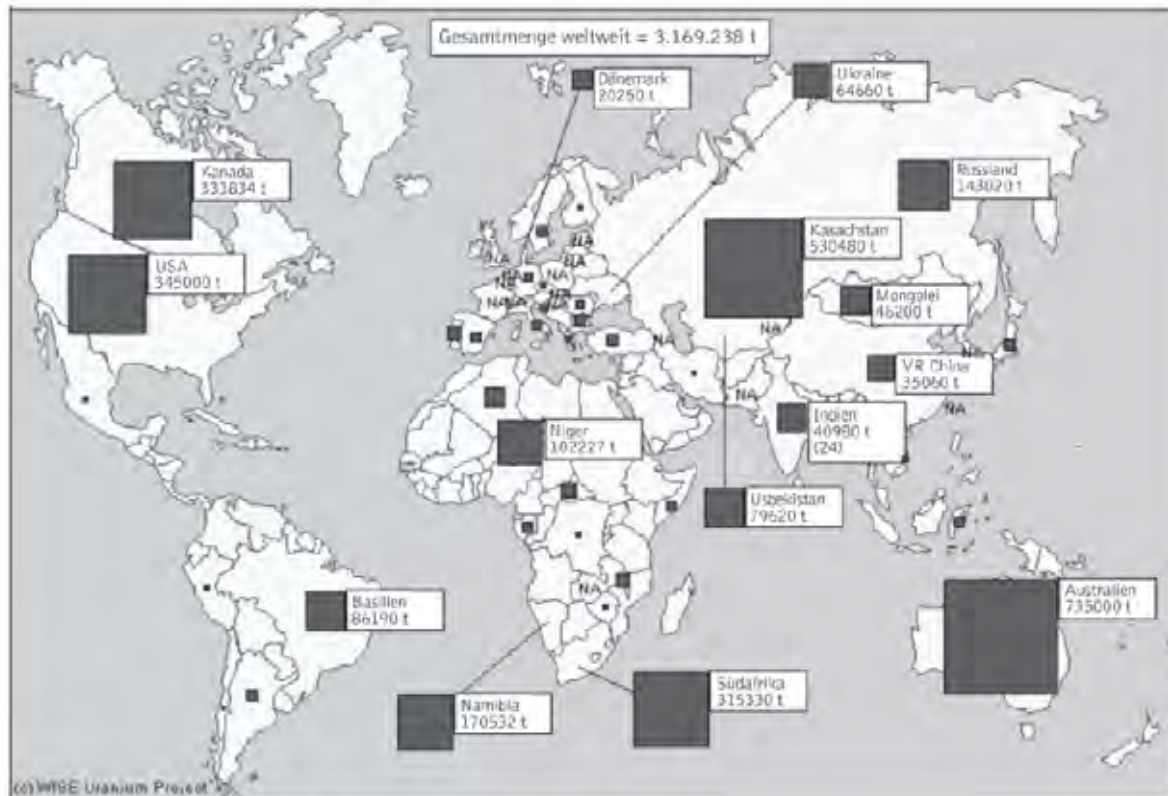
Abbildung 9.1: Historische Entwicklung des Uranpreises in US\$/Pfund (1 Pfund = 454 Gramm); Quelle: www.uranium-stocks.net/;

Die zukünftige Nutzung der Atomkraft basiert also nach dem Verbrauch der militärischen Überschüsse wieder auf jenen Brennstoffen, welche direkt aus der Bergbautätigkeit stammen. Die Auswirkungen auf den Marktpreis sind hierbei bereits evident. Da es sich bei Uran ebenso wie bei den fossilen Energieträgern um eine beschränkt zur Verfügung stehende Ressource mit stark unterschiedlichen Abbaukosten handelt, wird der Uranpreis gemäß der gegebenen Potenzial-Kostenkurve in Zukunft weiter steigen.

Im Bereich des Uranbergbaus existieren nur noch wenige Lagerstätten mit sehr hohen Urankonzentrationen. Das Erz mit der höchsten Urankonzentration wird zurzeit in der MacArthur-River-Mine in kanadischen Saskatchewan mit knapp 18% Konzentration unter Tage abgebaut. Das minderwertigste Erz wird mit 0,029% Konzentration in der Namibischen Rössing-Mine im Tagebau abgebaut. Im Allgemeinen kann ein wirtschaftlicher Abbau des Erzes erst ab einer minimalen Konzentration von 0,1% erfolgen. Die Erze der meisten Minen weisen Konzentrationen zwischen 0,1% und 0,5% auf.

Laut einer Marktanalyse der IAEO und IEA ist bei einem Preisniveau von 130 US\$/kg Spaltstoff weltweit ein Potenzial von 4,74 Millionen Tonnen Uran verfügbar. Dies würde eine rechnerische Verfügbarkeit bei einem gleichbleibenden Verbrauch wie im Jahr 2004 von 70 Jahren ergeben.

In der umfassenden Publikation Heinrich Böll Stiftung (2006) wird unter Berufung auf OECD (2004) ebenfalls bei einem Preisniveau von 130 US\$/kg Spaltstoff ein weltweites Potenzial von 3,17 Millionen Tonnen Uran genannt. Die Verteilung dieser Ressourcen ist in Abbildung 9.2 dargestellt.



t = metrische Tonne NA = keine Daten verfügbar

Abbildung 9.2: Weltweite Verteilung der Uranressourcen; Quelle: Heinrich Böll Stiftung (2006);

Die technisch ausbeutbaren Gesamtreserven (ohne Berücksichtigung der Kosten, also inklusive aller minderwertigen Lagerstätten) werden von IAEO und IEA mit ca. 35 Millionen Tonnen angegeben. Weitere Faktoren, die zu einer Verlängerung der Verfügbarkeit von energetisch verwertbaren Spaltstoffen führen können sind die Wiederaufbereitung von Brennelementen und die Brütertechnologie.

Die Gewinnung von Uran aus abgebrannten Brennelementen findet global zurzeit hauptsächlich in den Wiederaufbereitungsanlagen La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien) statt. Bis heute wird jedoch nur ein kleiner Teil der, in den Wiederaufbereitungsanlagen gewonnenen Rohstoffe, auch wieder zu Brennelementen verarbeitet, da dies einen aufwendigen und kostspieligen Prozess darstellt, welcher bei den vorliegenden Marktpreisen für Uran nicht wirtschaftlich machbar ist. Der Großteil der gewonnenen Rohstoffe wird in den Wiederaufbereitungsanlagen langfristig gelagert.

Die Brütertechnologie konnte sich bis heute nicht durchsetzen. Einerseits stellt der großtechnische Umgang mit Plutonium ein deutlich höheres Sicherheits- und Gesundheitsrisiko dar, als dies bei Uran der Fall ist, und andererseits ist die Wirtschaftlichkeit von in Brutreaktoren produzierten Brennstoffen bei weitem nicht gegeben. Weitere Probleme technischer Natur sind durch den Natrium-Kühlkreislauf gegeben. Derzeit wird kein evolutionärer Brütertyp entwickelt. In den Konzepten für eine Reaktorgeneration IV werden jedoch auch mehrere Schnelle Brutreaktoren in Betracht gezogen.

9.2 Radioaktive Abfälle und deren Endlagerung

Der Betrieb von Atomkraftwerken verursacht eine große Menge an radioaktiven Abfällen. Diese entstehen bei der Herstellung der Brennelemente, durch die abgebrannten Brennelemente selbst, bei der Wiederaufbereitung entsprechender Brennelemente und nicht zuletzt bei der Entsorgung der Reaktoren am Ende ihrer Lebenszeit. Der Brennstoffkreislauf ist in Abbildung 9.3 dargestellt, wobei der radioaktive Abfall in die Kategorien "low active waste (LAW)", "medium active waste (MAW)" und "high active waste (HAW)" eingeteilt wird.

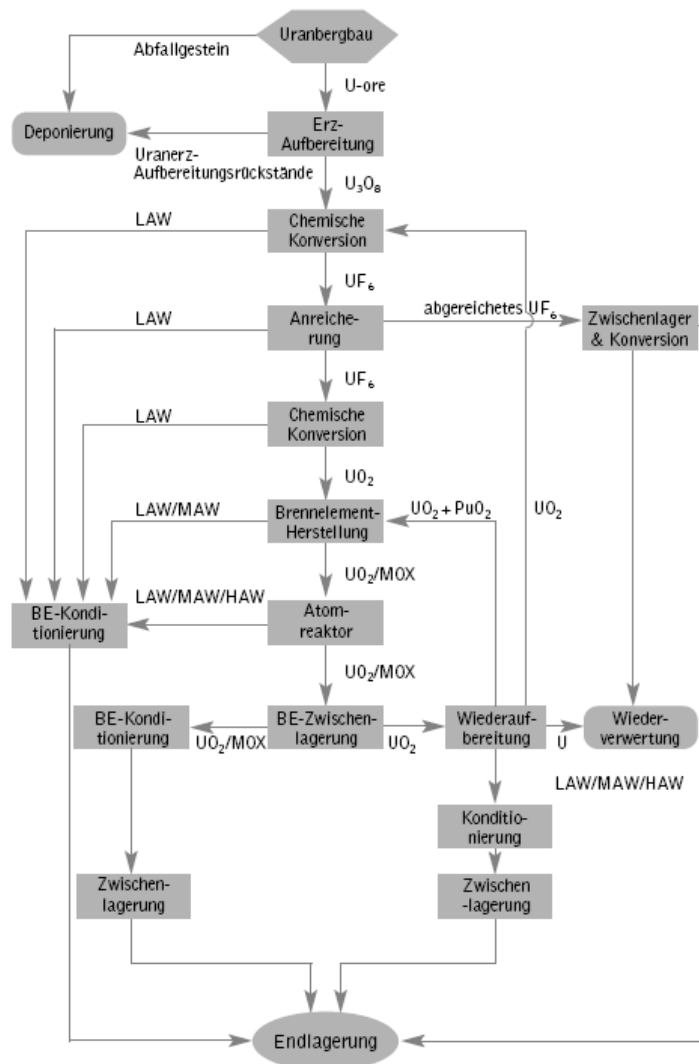


Abbildung 9.3: Der Brennstoffkreislauf; Quelle: Böll Heinrich Stiftung (2006);

Die Gefahr von radioaktiven Abfällen ist in deren Freisetzung in die Biosphäre zu sehen. Eine Freisetzung kann durch den Betrieb von Atomkraftwerken (z.B. bei Störfällen oder Unfällen), durch den Transport der Brennstoffe und der Abfälle aus dem Brennstoffzyklus und bei der Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Materialien passieren.

Die radioaktiven Stoffe weisen dabei ein unterschiedliches Gefährdungspotenzial auf. Plutonium ist aufgrund seiner Toxizität und Radioaktivität durch ein besonderes Gefahrenpotenzial gekennzeichnet. Die letale Dosis von Plutonium beträgt in Hinblick auf die Toxizität für den Menschen wenige Milligramm, zur sicheren Entstehung von Krebs reicht jedoch schon die Inhalation von wenigen Mikrogramm aus. Der Grenzwertwert der Jahresaktivitätszufuhr für Arbeiter ist bereits mit 40 Nanogramm Plutonium 239 gegeben.

Plutonium ist nicht zuletzt wegen seines direkten Gefährdungspotenzials das Schlüsselement der zivilen Atomkraftnutzung. Abgebrannte Brennelemente von Leichtwasserreaktoren enthalten etwa 1% Plutonium. Das sind in Summe über alle existierenden Reaktoren ca. 5 bis 6 Tonnen Plutonium pro Jahr. Dies bedeutet, dass pro Jahr ca. die ein-milliardenfache toxisch letale Dosis und die tausend-milliardenfache sicher krebserregende Dosis PU 239 durch den Betrieb der Reaktoren erzeugt wird.

Der Umgang mit radioaktiven Abfällen ist also mit einem außergewöhnlichen Maß an Verantwortung gegenüber der globalen Gesellschaft verknüpft. Die Lagerung von radioaktiven Abfällen gliedert sich in die Zwischenlagerung und in die Endlagerung. Die Zwischenlagerung ist bei hochradioaktiven Substanzen zum Abklingen der Wärmeproduktion erforderlich, bei mittel- und schwach radioaktiven Substanzen ist die Zwischenlagerung meist aus logistischen Gründen erforderlich. Unterschieden werden die nasse und die trockene Zwischenlagerung, die zumeist in überirdischen Lagern durchgeführt werden. Die Zwischenlager befinden sich dabei entweder dezentral direkt am Areal der jeweiligen Atomkraftwerke, oder in zentralen Zwischenlagern. Zwischenlager weisen deutlich geringere Sicherheitsausstattungen auf, als das bei den Atomkraftwerken selbst der Fall ist. Zwischenlager haben aus wirtschaftlichen Gründen im Allgemeinen z.B. keine Schutzvorkehrungen gegen die Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes.

Die Anforderungen an die Endlagerung von radioaktiven Abfällen werden durch das Risikopotenzial der verschiedenen Abfallarten bestimmt. Wesentliche Faktoren sind hierbei die Intensität der Strahlung und die Länge der Zeitspanne der Strahlung. Ein zusätzlicher Faktor, der bei der Endlagerung zu berücksichtigen ist, ist die Wärmeentwicklung, die durch den Zerfall von Radionukliden hervorgerufen wird. Maßgeblich für die Zeitkonstanten der Endlagerung sind die Halbwertszeiten der gelagerten Radionuklide. Die Bandbreite ist hierbei sehr groß und reicht von wenigen Tagen (z.B. 5,3 Tage bei Kobalt 60) bis zu hunderten Millionen Jahren (z.B. 704 Mio. Jahre bei Uran 235).

“Kurzlebiger“, schwach- bis mittelradioaktiver Abfall mit einer Halbwertszeit kleiner als 30 Jahre wird in der Regel oberirdisch in geeigneten Behältern oder knapp unter der Erdoberfläche gelagert. Einzelne Länder (z.B. Deutschland) streben jedoch auch eine Lagerung in tiefen geologischen Formationen an. Die Lagerung von langlebigen und hochradioaktiven Abfällen soll in Zukunft ausschließlich in tiefen geologischen Formationen für sehr lange (geologische) Zeitspannen erfolgen. Bis heute gibt es jedoch kein Endlager für langlebigen, hochradioaktiven Abfall. Die Errichtung der Endlager verzögert sich einerseits wegen technischer Gründe, andererseits wegen dem Widerstand der Bevölkerung in den betroffenen Gebieten.

Die Risiken von Zwischenlagern und Endlagern, die sich nicht in tiefen geologischen Schichten befinden sind vielgestaltig. Immer geht es jedoch darum, dass radioaktiver Abfall frei in die Biosphäre gelangen könnte. Mögliche Ursachen können dabei technisches Versagen (leckere Tanks, Schäden an Kühlsystemen etc.), Unfälle oder Naturkatastrophen (Erdbeben, Brände, Flugzeugabsturz etc.), terroristische Anschläge oder kriegerische Auseinandersetzungen sein.

10. Sicherheitsaspekte: Risiko, Proliferation, Krieg und Terror

Bei keiner anderen Technologie, welche auf der Erde genutzt wird, liegt ein derartig hohes und vielgestaltiges gesellschaftliches Risiko vor, wie dies bei der Atomkraftnutzung der Fall ist. Das Risiko reicht dabei von der radioaktiven Belastung der Biosphäre des Menschen durch den planmäßigen Betrieb von Atomkraftwerken (beginnend beim Uranbergbau über den Betrieb von Wiederaufbereitungsanlagen bis zur Zwischen- und Endlagerung des Atommülls) über die, in der aus historischer Sicht kurzen Geschichte der Atomkraft zahlreichen Unfälle und Katastrophen (siehe Anhang A) bis zur Gefährdung der gesamten Menschheit durch Atomwaffen, egal ob sie in Kriegen oder im Zuge terroristischer Aktivitäten eingesetzt werden.

Die relativ geringe Aufmerksamkeit, die der Atomkraft von Seiten der globalen Gesellschaft angesichts des vernichtenden Gefährdungspotenzials entgegengebracht wird, erklärt sich einerseits aus dem mangelnden Verständnis und der fehlenden Sichtbarkeit vieler Phänomene der einschlägigen Physik, wie etwa der Radioaktivität und ihrer Wirkungen, und andererseits aus der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit von katastrophalen Ereignissen. Ein historischer Moment in diesem Zusammenhang war die Katastrophe von Tschernobyl. Nach zahlreichen kleinen und großen Unfällen (siehe Anhang A), welche von den entsprechenden Lobbys nach Möglichkeit stets vor der Öffentlichkeit verharmlost und verheimlicht wurden, war die Katastrophe von Tschernobyl derartig sichtbar, dass eine Verharmlosung nicht einmal von der Atomindustrie oder den entsprechenden Lobbyisten versucht wurde. Die Angaben über Tote, verletzte oder verstrahlte Personen, Krebsraten, genetische Schäden oder die Größe der Landesflächen, die Menschen in geologischen Zeiträumen nicht mehr ohne Schutzanzug betreten werden können variieren zwar in unterschiedlichen Studien, kein Autor stellt jedoch in Abrede, dass es sich dabei um eine nukleare Katastrophe mit nachhaltigen Auswirkungen auf die Gesellschaft gehandelt hat.

10.1 Risiko der Atomkraftnutzung

Wie bereits angemerkt handelt es sich bei katastrophalen Ereignissen im Zusammenhang mit der Atomkraftnutzung (wie bei der Katastrophe von Tschernobyl) um Ereignisse mit einer geringen Eintreffenswahrscheinlichkeit und katastrophalen Auswirkungen. Symptomatisch ist in diesem Zusammenhang, dass Atomkraftwerke nur eingeschränkt versichert werden können, da sich global keine einzige Versicherungsgesellschaft auf die unbeschränkte Schadensabdeckung einlässt. Durch internationale Abkommen wurde eine Beschränkung der Haftung vereinbart, da der Betrieb von Atomkraftwerken sonst nicht möglich gewesen wäre. Die tatsächlichen Schäden im Falle einer Katastrophe werden somit nicht von den Kraftwerksbetreibern, sondern von der Gesellschaft getragen.

Vor der Katastrophe von Tschernobyl hat wohl niemand mit dem tatsächlichen Eintritt eines Super-GAUs gerechnet, obwohl stets klar war, dass das Geschehen aus der Sicht der Risikoforschung prinzipiell möglich ist. Das Eintreten eines entsprechenden prinzipiell möglichen Ereignisses ist nur von der Zeit und der Anzahl der in Betrieb befindlichen Atomkraftwerke (und der Qualität ihrer Sicherheitssysteme) abhängig. An diesem Prinzip hat sich auch nach der Katastrophe von Tschernobyl nichts geändert. Zwar wurden viele Anstrengungen in Hinblick auf die Nachrüstung von Sicherheitssystemen unternommen und die Anzahl der Anlagen hat sich nicht erhöht, doch die Möglichkeit eines neuerlichen Super-GAUs besteht weiterhin. Faktoren die das Risiko hierfür erhöhen sind die fortschreitende Alterung der Anlagen auch in Hinblick auf die lukrative Laufzeitverlängerung, die

ökonomischen Restriktionen die sich aus dem liberalisierten Energiemärkten ergeben, sowie die Tendenz, Atomkraftwerke zunehmend in Schwellen- und Entwicklungsländern zu installieren, wo geringere Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden.

10.2 Die Verbindung ziviler und militärischer Nutzung der Atomenergie

Proliferation bezeichnet die Weiterverbreitung bzw. die Weitergabe von Massenvernichtungswaffen und ihren Trägersystemen sowie von spezifischem Know-how von Staaten, die über derartige Technologien verfügen, an andere Staaten, die noch nicht darüber verfügen. Dabei kann es sich um komplette Waffen oder auch um einzelne Komponenten oder entsprechendes Wissen handeln.

Die internationale Staatengemeinschaft versucht, Proliferation durch Abkommen und Überwachung einzudämmen (Atomwaffensperrvertrag, Chemiewaffenkonvention). Große Bedenken bezüglich möglicher Proliferation existieren in Hinblick auf die historischen Waffenarsenale der ehemaligen UdSSR. Es wird befürchtet, dass Massenvernichtungswaffen aus diesen Beständen gestohlen und z.B. an Terroristen verkauft werden könnten.

Proliferation steht heute an der Spitze der Gefahrenliste für die internationale Sicherheit. Seit dem 11. September 2001 hat die Diskussion rund um Proliferation eine neue Dimension bekommen. Waren es bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich Staaten, welche als Konsumenten der Proliferation gesehen wurden, müssen seit den Anschlägen in den USA auch nichtstaatliche Akteure wie Terroristen als potenzielle Kunden der Proliferation gesehen werden.

Proliferationsrisiken können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Einerseits können Nuklearmaterialien, Nukleartechnologien und Wissen von einem Staat, der ein legales ziviles Atomprogramm betreibt in einen anderen Staat transferiert werden, der ein Atomwaffenprogramm verfolgt. Andererseits kann von einem legalen zivilen Atomprogramm eines Staates auch ein illegales Atomwaffenprogramm im selben Staat abgeleitet werden.

Für den Bau einer Atombombe sind laut IAEA im Minimum entweder 25 kg hoch angereichertes Uran ^{235}U (HEU mit minimal 90% U-235) oder 8 kg Plutonium ^{239}Pu erforderlich. HEU kann in verschiedenen Typen von Anreicherungsanlagen hergestellt werden, wobei die Zentrifugenanreicherung¹⁵ der aktuell gängigste Prozess ist. Plutonium ist ein Nebenprodukt der Bestrahlung nuklearen Brennstoffs in verschiedenen Reaktortypen. Abhängig von Reaktortyp und Bestrahlungsdauer werden im nuklearen Brennstoff unterschiedliche Mengen Pu-239 und Pu-240 produziert. Das Plutonium muss in chemischen Wiederaufbereitungsanlagen abgetrennt werden, bevor es für den Bau einer Atomwaffe verwendet werden kann.

Jedes zivile Atomkraftprogramm schafft also theoretisch die Grundvoraussetzungen zur Produktion von Atomwaffen. Nebenbedingung ist jedoch entweder die Verfügbarkeit einer Anreicherungsanlage (zur Herstellung von waffenfähigem HEU) oder die Verfügbarkeit einer

¹⁴ high enriched Uranium (HEU);

¹⁵ Die physikalische Trennung von U-238 und U-235 nach dem Atomgewicht ist erst in der Gasphase effektiv möglich. Dazu wird die chemische Verbindung Uranhexafluorid (UF_6) herangezogen. In der Verbindung UF_6 existieren somit ein "schweres" UF_6 aus U-238 und F und ein "leichtes" UF_6 aus U-235 und F. Das serielle Durchlaufen des Gases von zahlreichen Zentrifugen führt in der Folge zur Anreicherung auf die gewünschte Konzentration an U-235.

Wiederaufbereitungsanlage (zur Abtrennung von waffenfähigem Plutonium) erforderlich. Zur Produktion von atomwaffenfähigen Materialien sind prinzipiell keine großtechnischen Anlagen wie Atomkraftwerke nötig. Sofern genug Zeit zur Verfügung steht, können die benötigten Materialien auch in Kleinreaktoren (Versuchs- bzw. Forschungsreaktoren) hergestellt werden.

Nuklearprogramme, die von Beginn an militärische Ziele verfolgten, wurden in den Vereinigten Staaten, in Großbritannien, in der Sowjetunion und in China umgesetzt. Beispiele für Länder, die ihre Nuklearprogramme offiziell als zivile Programme gestartet haben und letztlich ebenfalls Atomwaffen produziert haben sind Frankreich, Indien, Israel, Nordkorea und Südafrika.

Neben dem verfügbar machen von Atomwaffen mittels Proliferation wird auch der Bau und der Einsatz von sogenannten "schmutzigen Bomben" als potenzielle Bedrohung gesehen. Es handelt sich dabei um konventionelle Sprengsätze, die mit radioaktiven Materialien verunreinigt werden um eine Kontamination des Einsatzortes zu bewirken. Im Sinne der Proliferation ist das Zustandekommen solcher Waffen jedoch nicht unbedingt an die klassischen Kernbrennstoffe und deren Spaltprodukte gebunden. Entsprechende Materialien können auch aus anderen technologischen Bereichen, z.B. aus dem Gebiet der Medizin stammen.

10.3 Die Bedeutung von Atomkraftwerken als Terrorziel oder im Kriegsfall

Atomkraftwerke und zugehörige Einrichtungen wie Zwischenlager, Anreicherungsanlagen oder Wiederaufbereitungsanlagen können je nach Strategie eines Angreifers attraktive Ziele von terroristischen Anschlägen oder im Zuge von kriegerischen Auseinandersetzungen sein.

Das radioaktive Inventar und der Energieinhalt eines Atomkraftwerkes würden den Effekt eines konventionellen militärischen oder terroristischen Angriffes vervielfachen, wobei es im schlimmsten Fall zu einem Super-GAU kommen kann. Die Folgen wären hierbei wohl mit jenen der Katastrophe von Tschernobyl vergleichbar (siehe Anhang A), wobei die betroffenen Flächen auch für einen potenziellen Angreifer langfristig nicht mehr verwendbar sein würden, was im Kriegsfall für einen Angreifer auch ein Hemmnis darstellen kann. Ein weiterer strategischer Aspekt ist die Ausschaltung der Stromversorgung eines Kriegsgegners, wobei dieser Aspekt natürlich auch auf jedes große konventionelle Kraftwerk zutrifft.

Atomkraftwerke stellen weiters einfach zu identifizierende, auch auf Distanz gut wahrnehmbare Strukturen dar, welche z.B. mit einem Flugzeug gut getroffen werden können. Ein terroristischer Akt nach dem Vorbild des 11. September 2001 ausgeübt auf ein Atomkraftwerk hätte fatale Folgen für eine große Region. Zahlreichen Studien zu Folge würden die üblichen zivilen Atomkraftwerke dem Absturz einer großen Verkehrsmaschine nicht standhalten.

11. Aspekte der demokratiepolitischen Relevanz

Die öffentliche Akzeptanz der Atomkraft variiert in unterschiedlichen Ländern deutlich. Abbildung 11.1 dokumentiert das Ergebnis der Eurobarometer-Umfrage für die EU-25 im Jahr 2005. Demnach sind nur 37% der befragten Europäer gänzlich oder im Großen und Ganzen mit der Nutzung der Atomkraft einverstanden.

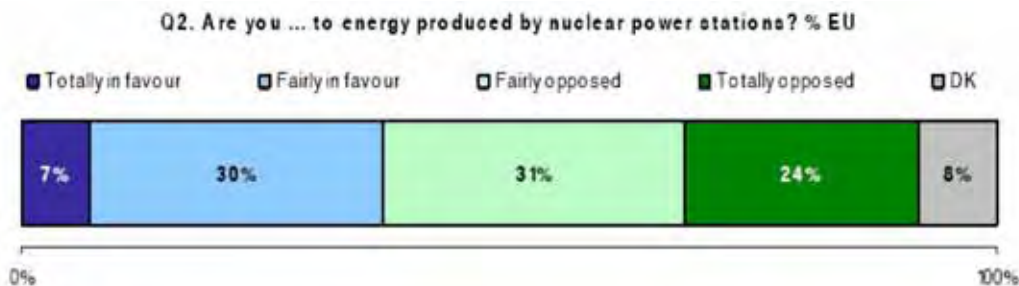


Abbildung 11.1: Durchschnittliche Akzeptanz von Atomkraft in den Mitgliedsstaaten der EU 25 im Jahr 2005; Quelle: Eurobarometer 2005; DK = dont know;

Nebenstehende Grafik dokumentiert die Länderergebnisse für die EU-25 Staaten. Angegeben ist jeweils der Prozentsatz der Befragten, die gänzlich oder im Großen und Ganzen mit der Nutzung der Atomkraft einverstanden sind. Die höchste Akzeptanz ist dabei mit 65% in Ungarn zu beobachten, die geringste Akzeptanz mit 8% in Österreich. Im EU-25 Schnitt beträgt die Akzeptanz (wie schon in Abbildung 11.1 dargestellt) 37%. Bemerkenswert ist die relativ geringe Akzeptanz in den Atomkraftländern Frankreich (52%) und England (44%). Die geringe Zustimmung in Deutschland (38%) lässt erahnen, in welchem demokratiepolitischen Spannungsfeld der Betrieb der deutschen Atomkraftwerke im Moment aufrecht erhalten wird.

Die Errichtung von neuen Atomkraftwerken ist auf Basis der vorliegenden Akzeptanz nur in wenigen Ländern möglich, ohne gegen den Willen der Bevölkerung zu handeln und damit ein entsprechend hohes politisches Risiko einzugehen. Ein gutes Beispiel für ein solches Vorgehen und auch für die resultierenden politischen Konsequenzen ist die Geschichte des Atomkraftwerk Zwentendorf (siehe Anhang C), welches knapp vor der Inbetriebnahme per Volksentscheid abgelehnt wurde und in der Folge sogar zu einem Atomsperrgesetz geführt hat.

Die Veränderung der Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber der Atomkraftnutzung mittels Kampagnen und ähnlichen Methoden ist langwierig, kostenintensiv und riskant. Die Atomindustrie ist sich dessen bewusst und beschreitet aus diesem Grund bei der Bewerbung ihrer Produkte niemals den Weg über die Öffentlichkeit, sondern versucht stets, die höchsten nationalen politischen Ebenen anzusprechen und zur Umsetzung von Atomkraftprojekten zu bewegen. Das

| Member States Results | |
|-----------------------|-----|
| Hungary | 65% |
| Sweden | 64% |
| Czech Republic | 61% |
| Lithuania | 60% |
| Finland | 58% |
| Slovakia | 56% |
| France | 52% |
| The Netherlands | 52% |
| Belgium | 50% |
| United Kingdom | 44% |
| Slovenia | 44% |
| Estonia | 40% |
| Latvia | 39% |
| Germany | 38% |
| EU25 | 37% |
| Luxembourg | 31% |
| Italy | 30% |
| Denmark | 29% |
| Poland | 26% |
| Portugal | 21% |
| Malta | 17% |
| Spain | 16% |
| Ireland | 13% |
| Cyprus | 10% |
| Greece | 9% |
| Austria | 8% |

(konzern)politische Risiko eines Imageverlustes und die hohen Kosten der Veränderung der öffentlichen Meinung werden damit auf die entsprechenden Politiker, bzw. was die Kosten betrifft, überhaupt auf die Steuer zahlende Bevölkerung eines Landes übertragen. Alleine diese übliche Vorgehensweise stellt bereits ein demokratiepolitisch bedenkliches Prozedere dar.

12. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen: Renaissance der Kernenergie?

Von einer "Renaissance der Atomkraft" kann heute nicht gesprochen werden. Der momentane Neubau von Atomkraftwerken reicht mittelfristig nicht einmal aus, um die aus Altersgründen abzuschaltenden Anlagen zu ersetzen. Die Atomindustrie ist angesichts dieser Situation sehr bemüht, das Image einer aussterbenden Technologielinie abzuwenden und argumentiert mit zeitgemäßen Aspekten wie dem Klimaschutz. Bei näherer Betrachtung erweist sich dieses Argument jedoch als nicht haltbar. Einerseits ist Atomstrom keineswegs CO₂-neutral, andererseits verhindert bereits die große Trägheit der Technologiediffusion einen effektiven Klimaschutz. In marktwirtschaftlich agierenden Demokratien kommt es nur noch in Sonderfällen zum Neubau von Atomkraftwerken. Die Kostenstruktur von Atomkraftwerken ist aufgrund des exorbitanten Kapitalbedarfs nicht kompatibel mit den Randbedingungen von liberalisierten Strommärkten. Marktwirtschaftlich attraktiv ist hingegen die Laufzeitverlängerung von abgeschriebenen Anlagen, welche nicht nur große Gewinne für die Betreiber mit sich bringt, sondern auch ein erhöhtes gesellschaftliches Risiko durch den Betrieb von überalterten Anlagen. Das Risiko aus dem Betrieb von Atomkraftwerken wird aufgrund von internationalen Haftungsbeschränkungen, ohne derer die Atomkraftnutzung gar nicht möglich wäre, von der Gesellschaft getragen. Das Risiko hat dabei zahlreiche Dimensionen wie die radioaktive Freisetzung im Regelbetrieb (Uranbergbau, Wiederaufbereitung, Zwischenlagerung, Endlagerung) und bei katastrophalen Unfällen (z.B. Three Mile Island 1979, Tschernobyl 1986) sowie die Bedrohung der Standortregionen im Fall von Terrorismus und Krieg.

Wirtschaftlich attraktiv werden Atomkraftprojekte erst, wenn ein großer Teil der Kosten durch den Steuerzahler getragen wird. Dies geschieht beginnend bei der staatlichen Propaganda zur "Meinungsbildung", die zur Durchführung von entsprechenden Projekten erforderlich ist, durch staatlich subventionierte Kredite und staatliche Ausfallhaftungen, Industriedumping und Überwälzung der Unfallhaftung auf die Gesellschaft. Nicht zuletzt werden die Probleme und Kosten ignoriert, welche für tausende zukünftige Generationen im Zusammenhang mit der Endlagerung der atomaren Abfälle erwachsen.

Die Motive von Staaten, die sich nach wie vor im Bereich der Atomkraft engagieren, können nach Abwägung aller wirtschaftlichen, versorgungstechnischen oder gar ökologischen Aspekte nur im Bereich des strategischen militärischen Interesses, der Machtdemonstration oder an mangelhaften Alternativen zur Stromproduktion liegen. Bei Sonderfällen wie Frankreich mit einem großen Bestand an Atomkraftwerken und einer einflussreichen Industrielobby sind viele Mechanismen zur Systemerhaltung wirksam, welche einen Ausstieg aus der Atomkraftnutzung zurzeit verhindern.

Die Nutzung der Atomkraft ist, wie dies auch bei der Nutzung fossiler Energieträger der Fall ist, an beschränkt verfügbare Ressourcen (Uranerz) gebunden. Die Reichweite dieser Ressourcen ist bei gleichbleibendem heutigem Verbrauch mit 60 bis 100 Jahren zu beziffern, bei einem Ausbau der Atomkraft entsprechend kürzer. Die Brütertechnologie, welche eine bessere Ressourcenausnutzung ermöglichen würde, konnte sich bis heute nicht durchsetzen.

Die Nutzung der Atomkraft stellt im Sinne der Entwicklung eines nachhaltigen Energie- und Gesellschaftssystems keine Option dar. Im Gegenteil. Die Nutzung der Atomkraft bindet sehr viel Kapital, welches im Bereich der Weiterentwicklung erneuerbarer Energieträger und der Energieeffizienz dringend benötigt werden würde und schafft alleine durch den regulären

zivilen Betrieb von Reaktoren durch radioaktive Freisetzung und kumulierenden Atommüll eine ungeheuerliche Hinterlassenschaft, mit der noch tausende zukünftige Generationen befasst sein werden. Damit ist die Nutzung der Atomkraft nicht kompatibel mit den Anforderungen an nachhaltige Systeme und muss als zukunftsfähiger Lösungsansatz verworfen werden.

13 Literatur

- Bethge Philip**, 2007, "Die nukleare Versuchung", Spiegel Special, Nr. 1/2007;
- Bilek Marcela**, Clarence Hardy, Manfred Lenzen, 2006, "Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia" Universität Sydney, November 2006, Studie im Auftrag der Australischen Regierung
- Böll Heinrich Stiftung**, 2006, "Mythos Atomkraft – ein Wegweiser", ISBN: 3-927760-51-X, Hrsg. Heinrich Böll Stiftung, 1. Auflage, Berlin 2006;
- Bundesamt für Verfassungsschutz**, 2001, "Proliferation", Vereinigte Verlagsanstalten, Düsseldorf, Januar 2001
- Cohn Steven Mark**, 1997, "Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream" Taschenbuch, Verlag: State University of New York Press (Juli 1997), ISBN-10: 0791433900, ISBN-13: 978-0791433904;
- Commission** of the European Communities, 2006, "Green Paper - A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy", Brussels, 8.3.2006, COM(2006) 105 final;
- Commission** of the European Communities, 2007, "Nuclear Illustrative Programme", Communication from the Commission to the Council and the European Parliament, Brussels, 10.01.2007, COM(2006) 844 final;
- De Esteban Fernando**, 2002, "The future of nuclear energy in the European Union", Background paper for a speech made to a group of senior representatives from nuclear utilities in the context of a European Strategic Exchange, Brussels, 23rd May 2002;
- EIA Energy Information Administration**, 2007, "International Energy Outlook 2007", Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585;
- EON**, 2008, "Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks Stade - vom Kernkraftwerk zur grünen Wiese", Publikation der EON;
- Fairlie Ian, David Sumner**, 2006, "The other report on Chernobyl (TORCH)", an independent scientific evaluation of health and environmental effects 20 years after the nuclear disaster; Afterword Prof. Angelina Nyagu, Ukraine; Berlin, Brussels, Kiev, April 2006;
- Fritsche Uwe R.**, 2007, "Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung", Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt, Arbeitspapier März 2007;
- Gielecki Mark, James Hewlett**, 1994, "Commercial Nuclear Power in the United States: Problems and Prospects", US Energy Information Administration, August 1994.
- GWEC**, 2006, "Global Wind 2006 Report", Jahresbericht des Global Wind Energy Council 2006;
- Haas Reinhard**, 2007, "The Economics of Nuclear Power in a Historical Context", Vortrag in Salzburg, 28th September 2007;
- Harding Jim**, 2007, "Seven Myths of the Nuclear Renaissance", Euratom 50th Anniversary Conference European Parliament – Brussels, Belgium, 7 March 2007;
- Hultman Nathan et al.**, 2007, "What History Can Teach Us about the Future Costs of U.S. Nuclear Power", Environmental Science and Technology, April 1, 2007;
- IEA**, 2007, "World Energy Outlook 2007", International Energy Agency, OECD/IEA, 2007;

Kernenergie.de, 2007, Internetpräsentation INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH, Informationskreis Kernenergie, Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin, www.kernenergie.de;

Matthes Felix Chr., 2006, “Mythos Atomkraft – über die Laufzeitverlängerung von Atomkraftwerken“ Copyright Heinrich Böll Stiftung, 1. Auflage, Berlin, März 2006;

Meissner Markus, Antonia Wenisch, 2004, “Bau und Planung neuer Atomkraftwerke - Internationale Recherche des aktuellen Planungsstandes“, im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Jänner 2004

Rogner Holger, 2007, “Nuclear Energy“, Vortrag im Zuge des Expertenworkshops “Atomkraft und Grünbuch 2“ am 23.01.2007 an der Technischen Universität in Wien;

Rosenkranz Gerd et al., 2006, “Mythos Atomkraft – ein Wegweiser“, Heinrich Böll Stiftung, 1. Auflage, Berlin 2006, ISBN 3-927760-51-X;

Schneider Mycle, 2006, “Renaissance der Atomenergie - Mythos oder Wirklichkeit ?“, Vortrag an der Technischen Universität Wien, 10.-11. Oktober 2006;

Schneider Mycle, 2006b, Rede am 29.04.2006 in München zum 20. Jahrestag von Tschernobyl;

Thomas Steve, 2005, “The Economics of Nuclear Power“, Nuclear Issues Paper No. 5, Heinrich Böll Stiftung, Dec. 2005;

Wenisch Antonia, 2006, “50 Jahre Atomenergie sind genug - Zum Status der Atomkraft im 21. Jahrhundert“, Studie des Ökologieinstituts, Wien 2006;

World Energy Council, 2007, “The Role of Nuclear Power in Europe“, London, January 2007, ISBN: 0 946121 23 0;

Weblinks

| Organisation / Inhalt | link |
|---|---|
| International Atomic Energy Agency (IAEA) Offizielle Homepage der IAEA | http://www.iaea.org/ |
| Nuclear Events Web-based System | http://www-news.iaea.org/news/default.asp |
| Veröffentlichungen über aktuelle Atomunfälle | http://www.x1000malquer.de/unfaelle.html |
| Nuclear Files.org – Project of the Nuclear Age Peace Foundation | http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-weapons/issues/accidents/index.htm |
| Wikipedia, die elektronische Enzyklopädie | http://de.wikipedia.org/wiki/ |
| Offizielle Homepage von AREVA Nukleare Energiebereitstellung und elektrotechnische Infrastruktur | http://www.areva.com/ |
| Informationsseite zum Thema Atomwaffen | http://www.atomwaffena-z.info/impressum.html |
| Offizielle Homepage des Demokratiezentrum; u.a. das Atomkraftwerk Zwentendorf: Bau, Proteste, Volksabstimmung | http://www.demokratiezentrum.org/ |
| Energy Information Administration; Official Energy Statistics from the U.S. Government; | http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/ |
| Plattform gegen Atomgefahren Salzburg | http://www.plage.cc/cms/themen/Temelin.php |
| Homepage von CEZ (Czech Power Company) | http://www.cez.cz/en/home.html |
| Homepage des deutschen Atomforums, | www.atomforum.de |
| Homepage der World Nuclear Association | www.world-nuclear.org |
| Internationale Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges | www.ippnw.de/Atomenergie/Atom-Politik |
| Global Wind Energy Council | http://www.gwec.net/ |
| Integrated Nuclear Fuel Cycle Information Systems | http://www-nfcis.iaea.org/ |
| U.S. Department of Energy | http://www.energy.gov/ |
| Uranium Stox.com | www.uranium-stocks.net/ |

Anhang A: Unfälle in kerntechnischen Anlagen

Der Störfall im Kernkraftwerk Tschernobyl ist der wohl bekannteste Unfall in einer kerntechnischen Anlage. Es gibt aber noch zahlreiche weitere Unfälle, bei denen es zu erheblicher Kontamination und/oder Gesundheitsschäden gekommen ist. Diese Liste gibt einen Überblick über die Geschehnisse mit Radioaktivität in kerntechnischen Anlagen (z.B. AKW, Forschungslabore), die anhand der International Nuclear Event Scale (INES) als ≥ 3 eingestuft worden sind. Diese Skala wurde von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) eingeführt, um eine weltweite Standardisierung in der Meldung von Störfällen und Unfällen zu erlangen. Da die INES erst Anfang der 90er Jahre eingeführt wurde, sind nicht alle früheren Ereignisse nach dieser Skala eingestuft. Die Störfälle in Three Mile Island und in Tschernobyl werden im Folgenden exemplarisch detailliert dargestellt, um dem Leser einen Zugang zum Hergang der Geschehnisse, deren Verkettung und deren Konsequenzen zu eröffnen.

1950er

Chalk River, Kanada

12. Dezember 1952 – Der erste ernste Reaktorunfall ereignete sich in einem NRX-Reaktor in Chalk River in der Nähe von Ottawa, Kanada. Während eines Tests wurde durch Fehlbedienungen, Missverständnissen zwischen Operator und Bedienpersonal, falsche Statusanzeigen im Kontrollraum, Fehleinschätzungen des Operators und zögerliches Handeln der Reaktorkern bei einer partiellen Kernschmelze zerstört. Dabei warf eine Knallgas-Explosion im Reaktorkern die Kuppel eines vier Tonnen schweren Helium-Gasbehälters 1,2 m hoch, wo sie im Aufbau stecken blieb. Durch die Explosion wurden mindestens 100 TBq an Spaltprodukten in die Atmosphäre freigesetzt. Bis zu vier Millionen Liter mit etwa 400 TBq langlebigen Spaltprodukten radioaktiv kontaminiertes Wasser wurden aus dem Keller des Reaktorcontainments in eine sandige Sickergrube gepumpt, um eine Kontaminierung des nicht weit entfernten Flusses Ottawa zu verhindern. Der beschädigte Reaktorkern wurde vergraben. Der spätere US-Präsident Jimmy Carter, damals Nukleartechniker in der Navy, half bei den mehrere Monate dauernden Aufräumarbeiten. Der Reaktor ging erst zwei Jahre später wieder in Betrieb. [1]

Kyschtym, Russland

29. September 1957 – Auch bekannt als Unfall von Majak. Die dortige Wiederaufarbeitungsanlage lagerte ihre Abfallprodukte in großen Tanks. Durch den radioaktiven Zerfall der Stoffe entsteht Wärme, weswegen diese Tanks ständig gekühlt werden müssen. Nachdem im Laufe des Jahres 1956 die Kühlleitungen eines dieser 250 m³ fassenden Tanks undicht geworden waren, und deshalb die Kühlung abgestellt wurde, begannen die Inhalte dieses Tanks zu trocknen. Ausgelöst durch einen Funken eines internen Messgerätes explodierten die enthaltenen Nitratsalze und setzten große Mengen an radioaktiven Stoffen frei (INES 6). Die Belastung der Gegend um Kyschtym, Russland entsprach nahezu der doppelten Menge des Tschernobyl-Unfalls. Da die Kontamination sich lediglich auf den Ural beschränkt, schlugen Messgeräte in Europa nicht Alarm (vergleiche Tschernobyl-Unfall), wodurch der Unfall 30 Jahre vor der Weltöffentlichkeit geheim gehalten werden konnte.

Windscale bzw. Sellafield, Vereinigtes Königreich

7. bis 12. Oktober 1957 – Im Kernreaktor Pile No. 1 in Windscale bzw. Sellafield nahe Liverpool heizten Techniker den Reaktor an, um die so genannte Wigner-Energie¹⁶ aus dem als Moderator dienenden Graphit zu glühen. Bei dem Reaktor handelte es sich um einen von zwei luftgekühlten und graphitmoderierten Reaktoren. Sie werden mit Uran betrieben und dienen zur Herstellung von Plutonium für Atomwaffen. Die Reaktoren dieses Typs waren sehr einfach konstruiert und wurden durch einen von riesigen Lüftern erzeugten Luftstrom gekühlt. Am Morgen des 7. Oktober 1957 wurde der Reaktor kontrolliert heruntergefahren und die Luftkühlung abgestellt. Der Reaktor wurde danach im unteren Leistungsbereich wieder angefahren. Die Techniker stellten einen Temperaturabfall anstelle eines Temperaturanstiegs fest. Um die Wigner-Energie schneller beseitigen zu können, wurde der Reaktor am nächsten Tag in einen nicht erlaubten Leistungsbereich gefahren. Die Techniker saßen allerdings einem Trugschluss auf: Im Normalbetrieb traten die Temperaturspitzen in ganz anderen Bereichen als während des Ausglühens auf. In messtechnisch nicht kontrollierten Bereichen fing das Graphit an zu brennen. Das Feuer und der Rauch wurden nur am Anfang gefiltert. Danach konnte die Radioaktivität nach außen gelangen. Blaue Flammen schlugen aus dem hinteren Bereich des Reaktors. 750 TBq gelangten in die Atmosphäre. Das Feuer brannte vier Tage und verbrannte einen Großteil des Graphitmoderators. Den Technikern gelang es nicht, die 150 Kernbrennstäbe aus dem Reaktor zu ziehen. Als letzte Konsequenz wurde der Reaktor mit Wasser geflutet. Diese Flutung war aufgrund möglicher Knallgasexplosionen sehr gefährlich. Der Brand konnte mit der Flutung gelöscht werden. Radioaktive Gase, vor allem unter Beteiligung der Elemente Jod, Krypton und Xenon wurden in die Atmosphäre emittiert. Die Milcherzeugung in einem Gebiet von 520 km² wurde verboten. In den folgenden Jahren wurden Reaktor Nr. 1 und 2 abgeschaltet. Mit der völligen Stilllegung der abgeschalteten Reaktoren wurde 1990 begonnen, und erst 1999 beendet. Der Unfall, der im Ausmaß dem von Three Mile Island ähnlich ist und von der IAEA als INES 5 eingestuft wurde, wird später für Dutzende von Krebstoten verantwortlich gemacht. Hauptartikel Windscale-Brand.



Abbildung: Panorama-Aufnahme der kerntechnischen Anlage bei Sellafield

¹⁶ Die Wigner-Energie ist die im Graphit-Moderator eines Kernreaktors gespeicherte Energie. Sie wurde von Eugene Paul Wigner entdeckt. Während des Betriebs des Reaktors wird der Graphit von schnellen Neutronen bestrahlt. Dadurch können Kohlenstoffatome aus der kristallinen Gitterstruktur auf Zwischengitterplätze verschoben werden, was eine Speicherung von Energie darstellt. Diese potentielle Energie wird als Wigner-Energie bezeichnet. Die gespeicherte Wigner-Energie kann sich spontan und schlagartig als Wärme freisetzen. Da ein unkontrollierter Temperaturanstieg durch spontane Rekombination ein Sicherheitsrisiko für einen Reaktor darstellt, darf die im Moderator gespeicherte Wigner-Energie nicht zu groß werden. Da die Fehlstellen ab etwa 250 °C zu rekombinieren beginnen und dadurch die Wigner-Energie kontrolliert freisetzen, lässt sich der Moderator „ausheizen“. Dazu muss der Reaktor für einige Zeit auf entsprechend hoher Temperatur gehalten werden. Bei graphitmoderierten Hochtemperaturreaktoren (z. B. Kugelhaufenreaktor) erfolgt das „Ausheizen“ automatisch im laufenden Betrieb, da die Kerntemperatur ausreichend hoch ist.

Simi Valley, Kalifornien, Vereinigte Staaten

26. Juli 1959 – Im Santa Susana Field Laboratory in Kalifornien gab es in einem mit Natrium gekühlten Reaktor eine partielle Kernschmelze. [2]

Knoxville, Tennessee, Vereinigte Staaten

20. November 1959 – In der radiologisch-chemischen Fabrik Oak Ridge National Laboratory in Tennessee gab es während der Dekontamination der Arbeitsanlagen eine chemische Explosion. Es wurden insgesamt 15 Gramm ²³⁹Plutonium freigesetzt. Das Plutonium verursachte bei der Explosion eine erhebliche Kontaminierung des Gebäudes, der angrenzenden Straßen und den Fassaden von angrenzenden Gebäuden. Man glaubt, dass die Explosion durch den Kontakt von Salpetersäure mit phenolhaltigen Dekontaminierungsflüssigkeiten ausgelöst wurde. Ein Techniker hatte vergessen, einen Verdampfer mit Wasser zu reinigen und so frei von Dekontaminierungsflüssigkeiten zu machen. Flächen, die nicht dekontaminiert werden konnten, wurden mit einer auffälligen Warnfarbe gekennzeichnet oder einbetoniert. Die Behörden von Oak Ridge begannen, im Umgang mit radioaktiv-chemischen Materialien ein Containment zu benutzen.

1960er

Idaho Falls, Idaho, Vereinigte Staaten

3. Januar 1961 – In der National Reactor Testing Station Idaho kam es zu einem Unfall mit einem experimentellen SL-1 Reaktor mit einer Dampfexplosion und schwerer Freisetzung radioaktiven Materials, bei dem drei Arbeiter unmittelbar getötet wurden. Mit Ausnahme des emittierten Jod-131 blieb die Verbreitung der Strahlung auf eine Fläche von 12.000 m² begrenzt. Im Umkreis von 30 km um den Reaktor ist die Kontamination der Vegetation durch Jod-131 etwa 100 Mal so hoch wie die natürliche Strahlungsintensität. Selbst 80 km entfernt ist die Belastung der Vegetation noch doppelt so hoch, unter anderem auch in einem Landschaftsstreifen entlang des Snake River nahe Burley und American Falls.

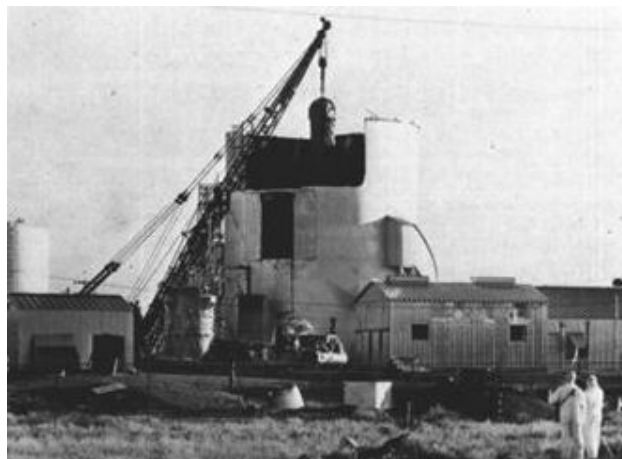


Abbildung: Der SL-1 Reaktor bei seiner Entfernung von der National Reactor Testing Station.

Der transportable Reaktor hatte manuell stellbare Steuerstäbe. Das Bewegen eines einzigen Stabes könnte den Vorfall ausgelöst haben. Die tatsächliche Ursache der Explosion konnte nicht geklärt werden. Die Rettungskräfte fanden Dosisleistungswerte vor, die noch hundert Meter vom Reaktorgebäude entfernt 2 mSv/h überschritten. Im Reaktorgebäude wurden

Strahlungswerte von etwa 10 mSv/h gemessen. Von den Rettungskräften erhielten laut einem Bericht der Atomenergiekommission der USA 22 Personen eine Äquivalentdosis in der Größenordnung von 30 bis 270 mSv. Der Reaktor wurde demontiert und der 12 t schwere Reaktorkern und das Druckgefäß wurden einige Monate später entfernt.

Monroe, Michigan, Vereinigte Staaten

5. Oktober 1966 – Aufgrund einer Fehlfunktion des Natrium-Kühlsystems im Enrico Fermi demonstration nuclear breeder reactor am Ufer des Eriesees kam es zu einer partiellen Kernschmelze, bei der keine Strahlung aus dem Containment austrat. Der Reaktorkern bestand aus 105, mit Zirkonium verkleideten Stiften bestehenden, Uranoxid-Brennelementen. Der Unfall wird einem Stück Zirkonium zugeschrieben, das einen Flussregler im Natrium-Kühlsystem blockierte. Das Reaktorgebäude wurde durch Sensoren automatisch isoliert, kein Personal war zu diesem Zeitpunkt im Gebäude. Mitarbeitern gelang es, den Reaktor manuell abzuschalten. Zwei der 105 Brennelemente schmolzen, aber außerhalb des Auffangbehälters wurde keine Strahlung gemessen. Der 200-MW-Reaktor lief im Oktober 1970 wieder mit voller Leistung. Dieser Vorfall lieferte die Grundlage für die umstrittene Polemik „We Almost Lost Detroit“ von John G. Fuller.

Lucens, Schweiz

21. Januar 1969 – Beim Versagen des Kühlmittels eines experimentellen nuklearen Reaktors im Kanton Waadt gab es im Reaktor (der ähnlich wie der NRX-Reaktor aufgebaut ist) eine partielle Kernschmelze. Anfang des Jahres 1968 wurde der Reaktor überprüft. Im April/Mai wurde der Betrieb aufgenommen, allerdings im Januar des nächsten Jahres wieder abgeschaltet. Während dieses Stillstandes lief das Kühlmittel (Sperrwasser = Dichtungsbestandteil) in den Kühlkreis des Reaktors. Die aus Magnesium bestehenden Umhüllungsrohre korrodierten. Als der Reaktor im Januar 1969 wieder in Betrieb genommen wurde, behinderten die Korrosionsprodukte die Kühlung. Der Brennstoff überhitzte und mehrere Brennstäbe schmolzen. Ein ganzes Bündel Brennstäbe geriet in Brand und brachte den Reaktortank zum Bersten. Kohlendioxid und Schweres Wasser (Moderator) traten in die Reaktorkaverne aus. Da die erhöhte Radioaktivität frühzeitig gemessen wurde, konnten die Arbeiter evakuiert und die Kaverne isoliert werden. Es wurde eine größere Menge Strahlung in der Reaktorkaverne freigesetzt. Die radioaktiven Teile konnten erst Jahre später aus dem Stollensystem geräumt werden. Die Kaverne enthielt nach wie vor eine große Menge radioaktiven Materials, wurde aber so verschlossen, dass vorerst keine Strahlung in die Umwelt gelangen konnte. Die Aufräumarbeiten dauerten bis Mai 1973. Die Reaktorteile wurden in versiegelten Behältern auf dem Gelände gelagert, bis sie 2003 ins zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZWILAG) abtransportiert wurden.

Rocky Flats, Idaho, Vereinigte Staaten

11. Mai 1969 – In einem Container mit 600 t feuergefährlichem Material kam es zu einer spontanen Entzündung von Plutonium. Das Feuer verbrannte 2 t des Materials und setzte Plutoniumoxid frei. Durch die Entnahme von Bodenproben im Umfeld der Anlage stellte man fest, dass die Gegend mit Plutonium kontaminiert wurde. Da sich die Betreiber der Anlage weigerten, Untersuchungen einzuleiten, wurden die Proben im Rahmen einer nicht offiziellen Untersuchung entnommen. [3]

1970er

Windscale bzw. Sellafield, Vereinigtes Königreich

1973 – In der Wiederaufarbeitungsanlage kam es in einem Behälter zu einer exothermen Reaktion. Hierdurch wurde ein Teil der Anlage radioaktiv verstrahlt. Auf Grund der Verstrahlung wurde dieser Unfall mit INES 4 eingestuft[4].

Greifswald, Deutschland (DDR)

7. Dezember 1975 – Ein Elektriker wollte seinem Lehrling zeigen, wie man elektrische Schaltkreise überbrückt. Dabei kam es zu einem Kurzschluss auf der Primärseite des Block-Trafos des Blocks 1, durch den entstehenden Lichtbogen brach ein Kabelbrand aus. Das Feuer im Hauptkabelkanal zerstörte die Stromversorgung und die Steuerleitungen von 5 Hauptkühlmittelpumpen (6 sind für einen Block in Betrieb). Eine Kernschmelze hätte drohen können, da Reaktor 1 nicht mehr richtig gekühlt werden konnte. Das Feuer konnte jedoch durch die Betriebsfeuerwehr schnell unter Kontrolle gebracht und die Stromversorgung der Pumpen provisorisch wieder hergestellt werden, da sofort nach Auftreten des Brandes Gegenmaßnahmen ergriffen wurden und die Betriebsmannschaft zu jeder Zeit des Unfalls die richtigen Entscheidungen traf. Nach dieser Beinahe-Katastrophe wurde der Brandschutz innerhalb des Kraftwerks erheblich verstärkt und die "Räumliche Trennung" bei sicherheitsrelevanten Einrichtungen eingeführt; so erhielt jede Hauptkühlmittelpumpe ihre separate Stromversorgung. Der Fall wurde erst nach der Wende 1989 publik gemacht. Durch sowjetische Stellen wurde bereits wenige Stunden nach dem Zwischenfall die IAEA informiert, die diesen Unfall in INES 4 einstufte. Der 10%-Grenzwert der zulässigen Aktivitätsabgabe wurde nicht überschritten. Spätere Auswertungen der Vorgänge durch eine Regierungskommission und die Bestätigung der von der Kommission gezogenen Schlüsse durch die IAEA zeigen, dass eine erfahrene Betriebsmannschaft anlagenbedingte Schwachstellen (hier das fehlende Containment) ausgleichen kann. Dieser Unfall ist daher auch als Standard-Unfall-Szenario für WWER-440-Reaktoren in die Simulatorschulung in Greifswald nach 1990 eingeflossen.

Three Mile Island, Pennsylvania, Vereinigte Staaten

28. März 1979 – In einem Kernkraftwerk bei Harrisburg führt eine Kombination von versagenden Maschinenteilen und Bedienungsfehler der Mannschaft zum Ausfall der Reaktorkühlung, wodurch es zur partiellen Kernschmelze und Freisetzung von 90 TBq an radioaktiven Gasen kam. Dieser Unfall ist bis heute der schwerste in einem kommerziellen Reaktor in den USA und wurde von der IAEA mit INES 5 eingestuft.

Am Morgen des 28. März 1979 um 4 Uhr fielen bei Arbeiten an der Kondensatreinigungsanlage die zwei Hauptspeisepumpen im sekundären Kühlkreislauf mit nichtradioaktivem Wasser aus. Dieser Ausfall geschah aufgrund von mechanischen, pneumatischen oder elektrischen Problemen bei der Pumpensteuerung und verhinderte die Kühlung der zwei Dampferzeuger. Auf einer Website über das Unglück [1] stellt der Publizist Scott Johnson dar, dass es zu dem Ausfall gekommen sei, weil ein Beschäftigter das Pressluftsystem, das zur Steuerung pneumatischer Einrichtungen des Kraftwerks verwendet wurde, mittels eines Gummischlauchs mit einer Wasserleitung verbunden hat, und so Wasser in die Pneumatik

eindringen konnte. Auch der Report der Kommission des Präsidenten [2] spricht von Wasser in dem besagten Druckluftsystem.

Als Folge des Ausfalls der Speisewasserpumpen schalteten sich der Turbosatz und der Kernreaktor durch einen sog. SCRAM, die Notabschaltung, ab – d.h. die Regelstäbe fielen in den Kern und beendeten die nukleare Kettenreaktion. Nach einer Abschaltung des Reaktors entsteht aber immer noch eine beträchtliche Menge Wärme, die sog. Nachzerfallswärme. Die Wärmeleistung des abgeschalteten Reaktors in TMI betrug noch ca. 6 % der thermischen Reaktornennleistung. Aufgrund dessen stieg der Druck im Primärkreislauf des Reaktors, der radioaktives Wasser enthält, an und erreichte im Druckhalter einen Wert von 158 bar. Im Regelbetrieb liegt der Wasserdruck im Primärkreislauf bei 151 bar. Um einen Leitungsbruch infolge Überdrucks zu vermeiden, öffnete sich ein Sicherheitsventil am Druckhalter. Dieses Ventil, das als PORV (Pilot operated relief valve) bezeichnet wird, hätte sich wieder schließen sollen, sobald der Druck auf 155 bar oder darunter gefallen war. Dies hätte 13 Sekunden nach Beginn des Unfalls geschehen müssen, geschah jedoch nicht und blieb über einen Zeitraum von mehr als zwei Stunden unbemerkt. Pro Minute entwich eine Tonne Kühlmittel zunächst in den Abblasetank des Druckhalters. Nachdem der Abblasetank kein weiteres Kühlmittel fassen konnte, brach schließlich dessen Berstscheibe und Reaktorkühlmittel konnte offen ins Containment, den Sicherheitsbehälter des Reaktors, austreten. Ein Leck im Primärkreislauf war entstanden – ein Kühlmittelverluststörfall war im Entstehen. Die Anzeigen im Kontrollraum zeigten jedoch nicht an, dass das Ventil noch offen war. Dies führte dazu, dass der Druck im primären Kühlkreislauf weiter absank.



Abbildung: Das Kernkraftwerk Three Mile Island; Quelle:
http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Three_Mile_Island

Etwa gleichzeitig war an anderer Stelle des Kraftwerks ein weiteres Problem aufgetreten. Das Notfall-Speisewassersystem, das als Reserve für die Hauptspeisewasser-Pumpen dienen sollte, war 42 Stunden vor dem Unfall getestet worden. Als Teil des Tests wurden zwei

Blockventile geschlossen und sollten am Ende des Tests wieder geöffnet werden. Doch dieses Mal, entweder durch einen Verfahrensfehler oder durch menschliches Versagen, wurden die Ventile nicht wieder geöffnet. Dies führte dazu, dass das Notspeisesystem nicht funktionierte. Die Notspeisewasser-Pumpen liefen zwar, konnten aber aufgrund der geschlossenen Blockventile kein Wasser in die Dampferzeuger fördern und damit die vom Primärkreis gelieferte Nachzerfalls-Wärme nicht abführen. Nach acht Minuten wurden die geschlossenen Ventile bemerkt und geöffnet. Nachdem sie geöffnet waren, begann das Notspeisesystem ordnungsgemäß zu funktionieren und versorgte die Dampferzeuger mit Wasser.

Während der Druck im Primärsystem aufgrund des offenen PORV-Ventils weiter sank, bildeten sich Dampfblasen außerhalb des Druckhalters. Aufgrund dieser Dampfblasen verteilte sich das Wasser im System anders und der Druckhalter füllte sich mit Wasser. Der Füllstandsanzeiger, von dem der Bediener ablesen kann, wie viel Wasser zum Kühlen vorhanden ist, zeigte an, dass das System voll Wasser sei. Da der Füllstandsanzeiger seine Werte jedoch einzig aus dem Druckhalter bezog, der im Normalbetrieb mit 22 m³ Wasser und darüber 19 m³ Dampf gefüllt ist, jetzt aber fast vollständig mit Wasser gefüllt war, vermuteten die Reaktorfahrer fälschlicherweise, dass das System überfüllt wurde. Eine Füllstandsanzeige im Reaktordruckbehälter war nicht vorhanden. So stoppte einer der Bediener die zuvor automatisch angelaufene Notkühlung. Während der Ausbildung wurde den Reaktorfahrern beigebracht, unter allen Umständen zu verhindern, dass sich der Druckhalter vollständig mit Wasser füllt. Durch die im Normalbetrieb vorhandene Dampfblase im Druckhalter – die einzige im Primärkreislauf zugelassene – ist es möglich, den Druck im Primärkreislauf konstant zu halten um so zu verhindern, dass Druckstöße zu einem Bersten der Rohrleitungen führen könnten. Jetzt aber befand sich eine große Dampfblase im oberen Bereich des Reaktordruckbehälters.

Nach fast 80 Minuten langsamen Temperaturanstiegs begannen die Pumpen des Primärkreislaufs zu kavitieren, da nicht mehr Wasser, sondern Dampf angesaugt wurde. Die Pumpen wurden abgeschaltet und man glaubte, dass die natürliche Zirkulation den Wasserfluss aufrechterhalten würde. Doch der Dampf im System der Rohrleitungen blockierte den primären Kühlkreislauf. Das nicht zirkulierende Wasser verwandelte sich in zunehmendem Maße in Dampf. Nach rund 130 Minuten seit der ersten Fehlfunktion war der obere Teil des Reaktors nicht mehr von Kühlflüssigkeit umgeben. Dampf kann aufgrund seiner geringeren Wärmekapazität nur eine geringere Wärmemenge von den Brennstäben abtransportieren. Dies führt zu einer Temperaturerhöhung. Deshalb ist es wichtig, den Druck im Primärkreislauf soweit aufrecht zu erhalten, dass das Wasser bei den jeweils herrschenden Temperaturen nicht verdampfen kann, sondern flüssig bleibt.

Bei hohen Temperaturen setzt eine Zirconium-Wasser-Reaktion ein. Die Hülle der Brennstäbe wird dabei oxidiert und Wasserstoff freigesetzt. Die Zirconium-Wasser-Reaktion zerstörte die Hüllrohre der Brennstäbe von außen nach innen. Der freigesetzte Wasserstoff sammelte sich zunächst im Reaktordeckel und gelangte später über die offene Verbindung Druckhalter-Abblasetank über die gebrochene Berstscheibe zusammen mit dem Kühlmittel ins Containment. Durch den dort vorhandenen Luftsauerstoff konnte sich im Containment Knallgas bilden.

Das ausgeströmte, stark radioaktive Kühlmittel sammelte sich an der tiefsten Stelle des Sicherheitsbehälters, dem so genannten Sumpf. Von dort wurde es durch einen Schaltfehler in einen Sammel tank im Hilfsanlagengebäude außerhalb des Containments gepumpt. Der Tank lief schließlich über, das Wasser gaste aus und ein kleinerer Teil dieser Gase gelangte durch ungenügende Filter in die Umgebung. Ein weiterer, angeblich weniger wichtiger,

Freisetzungspfad war ein kleines Leck in einem Dampferzeuger-Heizrohr, das nach einer gewissen Zeit angeblich isoliert werden konnte.

Um 6 Uhr war Schichtwechsel im Kontrollraum. Die neu Angekommenen bemerkten, dass die Temperatur im Reaktorsystem zu hoch war und nutzten ein Reserveventil, um den Verlust von Kühlwasser zu beenden. Bis zu diesem Zeitpunkt waren schon 150 m³ Kühlwasser aus dem primären Kühlkreislauf entwichen. Es waren bereits 165 Minuten seit dem Beginn des Störfalls vergangen, als radioaktiv kontaminiertes Wasser die Sensoren erreichte. Zu diesem Zeitpunkt war die Radioaktivität im primären Kühlkreislauf 300 Mal höher als erwartet: Die Kernschmelze war in vollem Gang.

Es war den Bedienern im Kontrollraum lange nicht bewusst, dass der primäre Kühlkreislauf sehr wenig Wasser enthielt und mehr als die Hälfte des Kerns nicht mehr mit Kühlwasser bedeckt war. Ungefähr 3 1/2 Stunden nach Beginn des Störfalls begannen die herbeigeeilten Fachleute die Tragweite zu erkennen: es wurde neues Wasser in den Primärkreis gepumpt. Später wurde ein Reservesicherheitsventil geöffnet, um den Druck zu reduzieren. Nach 9 Stunden entzündete sich das Knallgasgemisch im Containment, dessen Innendruck erhöhte sich kurzzeitig in die Nähe des Auslegungs-Drucks. Es waren fast 16 Stunden vergangen, als die Pumpen im Primärkreislauf wieder eingeschaltet wurden und die Kerntemperatur zu fallen begann. Ein großer Teil des Kerns war geschmolzen. Während der nächsten Woche wurden sowohl Wasserstoff als auch Wasserdampf aus dem Reaktor entfernt. Dies geschah zum einen durch Kondensatoren, aber auch, was sehr umstritten war, durch einfaches Ablassen in die Atmosphäre. Es wird geschätzt, dass während des Zwischenfalls radioaktives Gas (in Form von Krypton 85) mit einer Aktivität von etwa $1,665 \cdot 10^{15}$ Bq entwich. Die Beseitigung der Schäden dauerte über 12 Jahre und kostete etwa eine Milliarde Euro.

Church Rock, New Mexico, Vereinigte Staaten

16. Juli 1979 - Beim Bruch eines Dammes, der ein Absetz- und Verdunsterbecken einer Uranmühle bildete, wurden ca. 460.000 t Wasser und etwa 1000 t Schlamm über das Land und in den Rio Puerco gespült. Der Schlamm enthielt radioaktive Stoffe wie Uran und Radium und war mit giftigen Metallen wie Cadmium, Mangan und Blei verseucht. Das Ausmaß der Katastrophe kann, auch noch Jahre nach dem Unglück, im Umkreis von bis zu 120 km nachgewiesen werden[5][6].

1980er

Saint-Laurent, Frankreich

1980 - Durch einen partiellen Riss im Reaktorkern kam es zur Verstrahlung des Gebäudes (INES 4)[7].

Tennessee, Vereinigte Staaten

11. Februar 1981 – Ein neuer Arbeiter öffnete versehentlich ein Ventil und mehr als 410.000 Liter radioaktive Kühlflüssigkeit flossen in das Reaktorgebäude des Tennessee Valley Authority Sequoyah 1 Atomkraftwerk. Acht Arbeiter wurden kontaminiert.

Tsuruga, Japan

25. April 1981 – Mehr als 100 Arbeiter wurden während Reparaturarbeiten in einem Atomkraftwerk in Tsuruga, Japan Radioaktivität ausgesetzt.

Buenos Aires, Argentinien

1983 - Durch das Vernachlässigen von Sicherheitsregelungen starb ein Operator während einer Modifikation des Reaktorkerns. Er befand sich nur wenige Meter entfernt und wurde mit ca. 20 Gy verstrahlt (INES 4)[8].

Gore, Oklahoma, Vereinigte Staaten

6. Januar 1986 – In der Wiederaufarbeitungsanlage Kerr-McGee in Gore, Oklahoma zerbrach ein Zylinder mit nuklearem Material nach unzulässiger Erhitzung. Ein Arbeiter starb, 100 mussten ins Krankenhaus eingeliefert werden.

Tschernobyl, Ukraine

26. April 1986 – Bei einem so genannten Super-GAU (INES 7) im Kernkraftwerk Tschernobyl in der Ukraine kam es zu einer Kernschmelze und in deren Folge zu einer Explosion. Große Mengen Radioaktivität wurden durch Freilegung und Brand des Reaktorkerns freigesetzt, die unmittelbare Umgebung wurde verstrahlt und darüber hinaus gab es zahlreiche direkte Strahlenopfer unter den Hilfskräften. Der Super-GAU konnte durch Radioaktivitätsmessungen und Fallout in Finnland und anderen europäischen Ländern nachgewiesen werden. Es wurde ein großräumiges Sperrgebiet eingerichtet und das Gebiet evakuiert. Die Anzahl der Geschädigten Personen schwankt je nach Studie erheblich.

Die Katastrophe ereignete sich bei der Durchführung eines Versuchs unter Leitung des stellvertretenden Chefingenieurs. Der Versuch hätte den Nachweis einer ausreichenden Stromversorgung nach einer Reaktorabschaltung bei gleichzeitig unterstelltem Totalausfall der Versorgung durch das äußere Stromnetz erbringen sollen. Als Hauptursachen für die Katastrophe gelten die bauartbedingten Eigenschaften des mit Graphit moderierten Kernreaktors (RBMK-1000) und dessen Betrieb in einem unzulässig niedrigen Leistungsbereich. Kennzeichnend für diesen Reaktortyp unter dieser Voraussetzung ist ein stark positiver Void-Koeffizient – die Verringerung der Neutronenabsorption des Kühlwassers infolge von Dampfblasenbildung bei Leistungssteigerung. Ein hoher Void-Koeffizient wurde gleichzeitig durch den fortgeschrittenen Abbrand des Kernbrennstoffes begünstigt. Weiters war die betriebliche Reaktivitätsreserve (minimal erforderliche Reaktivitätsbindung durch hinreichend in den Reaktor eingefahrene Steuerstäbe) nicht in das automatische Reaktorsicherheitssystem eingebunden, sondern lediglich ein Minimalwert in den Betriebsvorschriften vorgegeben. Dieser Minimalwert war bereits Stunden vor Beginn des Versuchs unterschritten, der Reaktor hätte abgeschaltet werden müssen. Außerdem hatte die Betriebsmannschaft Sicherheitssysteme abgeschaltet, um im Bedarfsfall den Versuch wiederholen zu können. Die automatisch arbeitenden Sicherheitssysteme hätten das ansonsten planmäßig verhindert; wie weit sie – im eingeschalteten Zustand – bei den gegebenen

ungeplanten Randbedingungen des Versuchs auch dessen Erstdurchführung oder zumindest den Eintritt einer Katastrophe bei Durchführung verhindert hätten, ist umstritten.

Die endgültige Auslösung der explosionsartigen Leistungssteigerung war wahrscheinlich auf eine weitere konstruktive Besonderheit des Regelstabsystems zurückzuführen: Ein Großteil der Steuerstäbe haben an ihrem unteren Ende einen Graphitfolgestab, der beim Einfahren aus der oberen Endlage zunächst eine positive Reaktivitätszufuhr (Leistungssteigerung) bewirkt, eine Leistungsminderung ergibt sich erst bei größerer Einfahrtiefe. Als der Schichtleiter schließlich die Reaktorschnellabschaltung auslöste, ist genau dieser Effekt eingetreten: Viele Stäbe fuhren gleichzeitig ein und führten dadurch dem Reaktor mehr Reaktivität zu. Dieser wurde prompt überkritisch, d.h. die Kettenreaktion der Kernspaltungen lief auch ohne verzögerte Neutronen von allein weiter und war daher nicht mehr regelbar. Die Leistung stieg so innerhalb von Sekundenbruchteilen auf ein Vielfaches (vermutlich etwa auf das Hundertfache) der Nennleistung an.

Eine weitere Schwäche des RBMK war ein fehlender Sicherheitsbehälter (Containment), auch wenn unklar ist, ob dieser den Explosionen standgehalten hätte. Umstritten ist auch der tatsächliche Anteil von Fehlentscheidungen des Kraftwerkpersonals am Zustandekommen des Unglücks. Dass Betriebsvorschriften verletzt wurden, ist Tatsache, in welchem Umfang sie dem Personal bekannt waren, ist fraglich. Unerfahrenheit und unzureichende Kenntnisse, insbesondere im Zusammenhang mit der Leistungsanhebung des (mit Xenon vergifteten) Reaktors werden angeführt. Da beim Versuch ein neuartiger Spannungsregler getestet werden sollte, bestand der Großteil des anwesenden Personals aus Elektrotechnikern.

Nicht zuletzt wurden getreu der Geheimhaltungspolitik zu früheren Störfällen in den Kernkraftwerken Ignalina und Leningrad weder sorgfältige Untersuchungen angestellt noch das Personal in den übrigen Kraftwerken mit wichtigen Informationen versorgt.

Wesentlich zum Zustandekommen des Unfalls beigetragen hat die Verschiebung des Versuchs um rund einen halben Tag. Die lange Haltezeit auf Teillast führte zu einer Anreicherung des Reaktors mit neutronenabsorbierendem Xenon-135. Dadurch wurde das neutronenphysikalische Verhalten des Reaktors wesentlich komplexer und unübersichtlicher. Weiters war zum Zeitpunkt des Versuchs ein anderes Schichtpersonal anwesend, als ursprünglich geplant war.

Geplanter Versuchsablauf:

Auch ein abgeschaltetes Kernkraftwerk ist auf die Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen, beispielsweise zur Aufrechterhaltung der Kühlung und für die Instrumentierung und Überwachung. Im Normalfall wird der Bedarf aus dem öffentlichen Energieversorgungsnetz gedeckt. Ist das nicht möglich, laufen Notstromaggregate an.

Im Rahmen einer zwecks Wartungsarbeiten anstehenden Abschaltung des Reaktors sollte nun gezeigt werden, dass die Rotationsenergie der auslaufenden Turbinen bei gleichzeitig unterstelltem Netzausfall ausreicht, die Zeit von etwa 40 bis 60 Sekunden bis zum vollen Anlaufen der Notstromaggregate zu überbrücken. Nach Sicherheitsvorschriften hätte dieser Versuch bereits vor der kommerziellen Inbetriebnahme im Dezember 1983 durchgeführt werden sollen. Ein (durch Xenon-135) unvergifteter Reaktor ohne Abbrand hätte sicherere Voraussetzungen geboten. Warum das unterblieben ist, ist nicht bekannt. Ein im Block III des Kraftwerkes zwischenzeitlich schon einmal durchgeführter Versuch ist fehlgeschlagen, weil die Spannung zu schnell abfiel. Nun sollte der Versuch im Block IV mit einem verbesserten

Spannungsregler wiederholt werden. Vorgesehen war die Einleitung des Versuchs bei reduzierter Reaktorleistung (700 bis 1.000 MW_{th}) durch Schließung der Dampfzufuhr zu den Turbinen.

Chronologie der Ereignisse:

25. April 1986, 1:06: Als erster Schritt sollte die Leistung des Reaktors von ihrem Nennwert bei 3.200 MW_{th} auf 1.000 MW_{th} reduziert werden, wie bei einer Regelabschaltung üblich. Um 13:05 wurde aufgrund erhöhter Stromnachfrage auf Anweisung des Lastverteilers in Kiew die Leistungsabsenkung bei einer erreichten Leistung von 1600 MW_{th} unterbrochen und der Reaktor mit dieser Leistung konstant weiter betrieben. Erst um 23:10 erfolgte die Freigabe zur weiteren Leistungsabsenkung. Um 24:00 übernahm eine neue Schichtmannschaft den Reaktor.

26. April 1986, 00:28: Bei 500 MW_{th} erfolgte eine Umschaltung innerhalb der Reaktorleistungsregelung. Durch einen Bedienfehler, durch den der Sollwert für die Gesamtleistungsregelung möglicherweise nicht richtig eingestellt wurde, oder auf Grund eines technischen Defekts sank die Leistung weiter bis auf nur noch etwa 30 MW_{th}.

Wie nach jeder Leistungsabsenkung erhöhte sich vorübergehend die Konzentration des Isotops Xenon-135 im Reaktorkern („Xe-Vergiftung“). Da Xenon-135 die für die nukleare Kettenreaktion benötigten Neutronen sehr stark absorbiert, nahm aufgrund der Konzentrationszunahme die Reaktivität des Reaktors immer weiter ab. Als die Betriebsmannschaft am 26. April 1986 um 00:32 Uhr die Leistung des Reaktors durch weiteres Ausfahren von Steuerstäben wieder anheben wollte, gelang ihr das infolge der mittlerweile aufgebauten Xe-Vergiftung nur bis zu etwa 200 MW_{th} oder 7 % der Nennleistung. Obwohl der Betrieb auf diesem Leistungsniveau unzulässig war (laut Vorschrift durfte der Reaktor nicht unterhalb von 20 % der Nennleistung betrieben werden) und sich zu diesem Zeitpunkt außerdem viel weniger Steuerstäbe im Kern befanden, als für einen sicheren Betrieb vorgeschrieben waren, wurde der Reaktor nicht abgeschaltet, sondern der Betrieb fortgesetzt.

26. April 1986, 01:03 bzw. 01:07: Bei Schließen der Turbineneinlassventile läuft normalerweise das Kernnotkühlssystem an. Dieses war jetzt jedoch ausgeschaltet. Um dessen Stromverbrauch für den Versuch zu simulieren, wurden nacheinander zwei zusätzliche Hauptkühlmittelpumpen in Betrieb genommen. Der dadurch erhöhte Kühlmitteldurchsatz verbesserte die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern und reduzierte demgemäß den Dampfblasengehalt in ihm. Der positive Void-Koeffizient bewirkte eine Reaktivitätsabnahme, auf die die (automatische) Reaktorregelung mit dem Herausfahren weiterer Steuerstäbe reagierte. Der Reaktorzustand verschob sich weiter in den unzulässigen Bereich.

26. April 1986, 01:23:04: Der eigentliche Test begann durch Schließen der Turbinenschnellschlussventile. Dadurch wurde die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor unterbrochen, sodass die Temperatur des Kühlmittels nun anstieg. Infolge des positiven Void-Koeffizienten kam es jetzt zu einem Leistungsanstieg, auf den die automatische Reaktorregelung folgerichtig mit dem Einfahren von Steuerstäben reagierte. Infolge der relativ langsamen Einfahrtgeschwindigkeit der Steuerstäbe konnte die Leistung allerdings nicht stabilisiert werden, sodass der Neutronenfluss weiter anstieg. Dies bewirkte einen verstärkten Abbau der im Kern angesammelten Neutronengifte (insbesondere Xenon-135). Dadurch stiegen Reaktivität und Reaktorleistung weiter an, wodurch immer größere Mengen an Dampfblasen entstanden, die ihrerseits wieder die Leistung erhöhten. Die Effekte

schaukelten sich auf. Um 01:23:40 löste der Schichtleiter manuell die Notabschaltung des Reaktors aus. Dazu wurden alle zuvor aus dem Kern entfernten Steuerstäbe wieder in den Reaktor eingefahren, doch hier zeigte sich ein weiterer Konzeptionsfehler des Reaktortyps: Durch die an den Spitzen der Stäbe angebrachten Graphitblöcke (Graphit war der Hauptmoderator des Reaktors) wurde beim Einfahren eines vollständig herausgezogenen Stabs die Reaktivität kurzzeitig erhöht, bis der Stab tiefer in den Kern eingedrungen war. Die durch das gleichzeitige Einfahren aller Stäbe massiv gesteigerte Neutronenausbeute ließ die Reaktivität so weit ansteigen, bis schließlich (um 01:23:44) die prompten Neutronen alleine (also ohne die verzögerten Neutronen) für die Kettenreaktion ausreichten („prompte Kritikalität“) und die Leistung innerhalb von Sekundenbruchteilen das Hundertfache des Nennwertes überschritt.

Die Hitze verformte die Kanäle der Steuerstäbe, so dass diese nicht weit genug in den Reaktorkern eindringen konnten, um ihre volle Wirkung zu erzielen, und sie ließ die Druckröhren reißen und das Zirkonium der Brennstäbe wie auch das Graphit mit dem umgebenden Wasser reagieren. Wasserstoff und Kohlenmonoxid entstand in größeren Mengen und konnte aufgrund der Beschädigungen des Reaktorkernes entweichen. Unterhalb des Reaktorgebäudedeckels bildeten diese mit dem Sauerstoff der Luft ein entzündbares Gas, das sich vermutlich entzündete und zu einer zweiten Explosion führte.

Welche Explosion zum Abheben des über 1.000 Tonnen schweren Deckels des Reaktorkerns führte, ist nicht ganz klar. Außerdem zerstörten die Explosionen das (nur als Wetterschutz ausgebildete) Dach des Reaktorgebäudes, sodass der Reaktorkern nun nicht mehr eingeschlossen war und direkte Verbindung zur Atmosphäre hatte. Der glühende Graphit im Reaktorkern fing sofort Feuer. Insgesamt verbrannten während der folgenden zehn Tage 250 Tonnen Graphit, das sind etwa 15 % des Gesamtinventars.

Große Mengen an radioaktiver Materie wurden durch die Explosionen und den anschließenden Brand des Graphits in die Umwelt freigesetzt, wobei die hohen Temperaturen des Graphitbrandes für eine Freisetzung in große Höhen sorgten. Insbesondere die leicht flüchtigen Isotope Jod-131 und Cäsium-137 bildeten gefährliche Aerosole, die in einer radioaktiven Wolke teilweise hunderte oder gar tausende Kilometer weit getragen wurden, bevor sie der Regen aus der Atmosphäre auswusch. Radioaktive Stoffe mit höherem Siedepunkt wurden hingegen vor allem in Form von Staubpartikeln freigesetzt, die sich in der Nähe des Reaktors niederschlugen.

26. April 1986, gegen 05:00: Die Brände außerhalb des Reaktors waren gelöscht. Block III wurde abgeschaltet.

27. April 1986: Die Blöcke I und II wurden um 01:13 bzw. 02:13 abgeschaltet. Es wurde begonnen, den Reaktor von Block IV mit Blei, Bor, Dolomit, Sand und Lehm zuzuschütten. Dies verringerte die Spaltproduktfreisetzung und deckte das brennende Graphit im Kern ab.

28. April 1986, 9.00 Uhr: Im Kernkraftwerk Forsmark in Schweden wurde aufgrund erhöhter Radioaktivität auf dem Gelände automatisch Alarm ausgelöst.[1] Messungen an der Arbeitsbekleidung der Angestellten ergaben erhöhte radioaktive Werte.[2] Nachdem die eigenen Anlagen als Verursacher ausgeschlossen werden konnten, richtete sich der Verdacht aufgrund der aktuellen Windrichtung gegen eine kerntechnische Anlage auf dem Gebiet der Sowjetunion. Am gleichen Tag meldete die amtliche sowjetische Nachrichtenagentur TASS erstmals einen „Unfall“ im Atomkraftwerk Tschernobyl.

29. April 1986: Sowjetische Quellen sprachen erstmals von einer „Katastrophe“ und von zwei Todesopfern.[3]

6. Mai 1986: Eine weitere Freisetzung von Spaltprodukten war weitgehend unterbunden.



Abbildung: Kernkraftwerk Tschernobyl, Reaktorblock 4 nach dem Super-Gau am 26.4.1986;
Quelle: <http://de.wikipedia.org>;

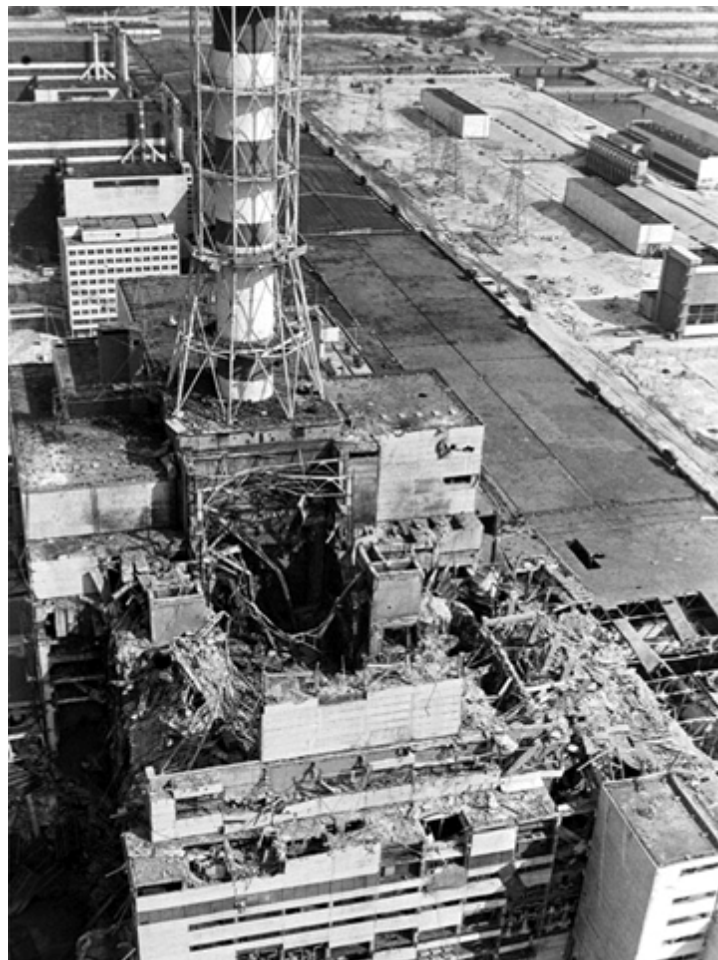


Abbildung: Kernkraftwerk Tschernobyl, Reaktorblock 4 nach dem Super-Gau am 26.4.1986;
Quelle: <http://de.wikipedia.org>;

Folgen der Reaktorkatastrophe:

Die Folgen der Reaktorkatastrophe werden nach wie vor sehr kontrovers erörtert. Ein umfassender Report wurde vom "Tschernobyl-Forum" ausgearbeitet. Das Tschernobyl-Forum besteht aus vier Nebenorganen der UNO (dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP), dem Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen (UNDP), dem Büro der Vereinten Nationen zur Koordinierung der humanitären Hilfe (OCHA) und dem Wissenschaftlichen Komitee der Vereinten Nationen über die Wirkungen atomarer Strahlungen (UNSCEAR)), vier autonomen Organisationen, die mit der UNO durch Verträge verbunden sind (der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO), der Weltbank, der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO)), sowie aus den Regierungen von Weißrussland, Russland und der Ukraine.[4]

Die Ausarbeitung des Tschernobyl-Forums wird von einigen Wissenschaftlern und Nichtregierungsorganisationen kritisiert. Dem Report wird einerseits vorgeworfen, parteiisch zu sein und die Folgen des Reaktorunglücks vorsätzlich zu verharmlosen. Andererseits wird auf methodische Mängel hingewiesen. So umfasse die Studie lediglich die Folgen in Weißrussland, Russland und der Ukraine, obwohl ein erheblicher Teil der Strahlenbelastungen in Mittel- und Westeuropa anfiel. Außerdem habe die Studie des Tschernobyl-Forums Publikationen, die höhere Opferzahlen nahe legen, unberücksichtigt gelassen. Schließlich wird kritisiert, dass die Untersuchungen erst fünf Jahre nach dem Unglück begonnen wurden.[5] Mit „The other report on Chernobyl (TORCH)“ wurde ein 'Gegenreport' zur Ausarbeitung des Tschernobyl-Forums veröffentlicht. Dieser Report wurde von den britischen Wissenschaftlern PhD Ian Fairlie und DPhil David Sumner erarbeitet. Er sagt weitaus schwerwiegendere gesundheitsschädigende Folgen des Reaktorunglücks voraus. In Auftrag gegeben und privat finanziert wurde die Studie von der Grünen Europaabgeordneten und Atomkraftgegnerin Rebecca Harms.

Die nachfolgenden Angaben stammen im Wesentlichen aus obigen beiden Studien:

Kontaminierte Gebiete:

Die Karte zeigt die Caesium-137-Kontamination in Weißrussland, Russland und der Ukraine in Curie pro Quadratmeter. Die größten Freisetzungen radioaktiver Stoffe fanden während des Zeitraums von zehn Tagen nach der Explosion statt. Die Wolken mit dem radioaktiven Fallout verteilten sich zunächst über viele Teile Europas und schließlich über die gesamte nördliche Halbkugel. Wechselnde Luftströmungen trieben sie zunächst nach Skandinavien, dann über Polen, Tschechien, Österreich, Süddeutschland und Norditalien. Eine dritte Wolke erreichte den Balkan, Griechenland und die Türkei. Innerhalb dieser Länder wurde der Boden je nach regionalen Regenfällen unterschiedlich hoch belastet. Insgesamt wurden etwa 218.000 Quadratkilometer mit mehr als 37.000 Becquerel (37 kBq) Cs-137 pro m² radioaktiv belastet. Mehr als 70 Prozent dieser Gebiete liegen in Russland, der Ukraine und Weißrussland. Während hier die stärksten Konzentrationen an flüchtigen Nukliden und Brennstoffpartikeln entstanden, wurde mehr als die Hälfte der Gesamtmenge der flüchtigen Bestandteile und heißen Partikel außerhalb dieser Länder abgelagert. Jugoslawien, Finnland, Schweden, Bulgarien, Norwegen, Rumänien, Deutschland, Österreich und Polen erhielten jeweils mehr als ein Petabecquerel (10¹⁵ Bq) an Cäsium-137. Insgesamt wurden in Europa etwa 3.900.000 km² (40 % der Gesamtfläche) durch Cäsium-137 kontaminiert (mindestens 4 kBq pro m²).



Abbildung: Verstrahlung durch Caesium-137 1996 — 10 Jahre nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl; Quelle: <http://de.wikipedia.org>;

In den am stärksten belasteten Gebieten Deutschlands, im Südosten von Bayern, lagen die Bodenkontaminationen bei bis zu 2 Ci /km² (74 kBq/m²) Cs-137. Diese Landkreise hätten auch in Weißrussland, Russland und der Ukraine den Status der kontaminierten Zone erhalten. So sind beispielsweise auch heute noch in einigen Regionen Deutschlands, insbesondere im Süden, Pilze, Waldbeeren und Wildtiere hoch belastet. Laut Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ist die Kontamination dort rund zehnmal höher als im Norden Deutschlands. Im Muskelfleisch von Wildschweinen wurden in Deutschland Cäsium-137-Werte von bis zu 40.000 Bq/kg gemessen. Der Durchschnittswert betrug 6.800 Bq/kg und damit mehr als das Zehnfache des EU-Grenzwertes von 600 Bq/kg. Auch einige Regionen in Großbritannien und Skandinavien sind teilweise hohen Cäsium-Kontaminationen ausgesetzt, wobei die Belastung im Laufe der Jahre nur langsam abnimmt. In einigen Ländern gelten weiterhin Einschränkungen bei Produktion, Transport und Verzehr von Lebensmitteln, die immer noch durch den radioaktiven Niederschlag von Tschernobyl belastet sind.

Strahlenexponierte Personengruppen:

Unmittelbar nach dem Unglück und bis Ende 1987 wurden etwa 200.000 Aufräumarbeiter („Liquidatoren“) eingesetzt. Davon erhielten ca. 1.000 innerhalb des ersten Tages nach dem Unglück sehr hohe Strahlendosen im Bereich von 2 bis 20 Gray (externe Gamma-Bestrahlung). Die restlichen Liquidatoren erhielten demgegenüber wesentlich geringere Strahlendosen bis zu maximal etwa 500 milli-Sievert (mSv), bei einem Mittelwert von etwa 100 mSv. Die Zahl der Liquidatoren erhöhte sich nach Angaben der WHO in den folgenden Jahren auf 600.000 bis 800.000. Die Zahl ist nicht exakt bezifferbar, da nur 400.000 Liquidatoren registriert wurden und auch deren Daten unvollständig sind. Die später eingesetzten Liquidatoren erhielten deutlich geringere Dosen.

Im Frühjahr und Sommer 1986 wurden etwa 116.000 Personen aus der 30-Kilometer-Zone rund um den Reaktor evakuiert. Später wurden zirka 240.000 weitere Personen umgesiedelt. Für die ukrainischen Evakuierten wurde ein mittlerer Dosiswert von 17 mSv (Schwankungsbereich 0,1 bis 380 mSv) errechnet, für die weißrussischen Evakuierten ein Mittelwert von 31 mSv (mit einem maximalen Durchschnittswert in zwei Ortschaften von 300 mSv).

In den ersten Tagen nach dem Unfall führte die Aufnahme von radioaktivem Jod mit der Nahrung zu stark schwankenden Schilddrüsendosen in der allgemeinen Bevölkerung von im Mittel etwa 0,03 bis 0,3 Gy mit Spitzenwerten bis zu etwa 50 Gy. Eine Ausnahme davon bildeten die wenigen Einwohner von Prypjat, die durch die rechtzeitige Ausgabe von Tabletten mit stabilem Jod wesentlich geringere Schilddrüsendosen erhielten.

Die nicht evakuierte Bevölkerung erhielt während der fast 20 Jahre seit dem Unfall sowohl durch externe Bestrahlung als auch durch Aufnahme mit der Nahrung als interne Strahlenexposition effektive Gesamtdosen von im Mittel etwa 10 bis 20 mSv bei Spitzenwerten von einigen 100 mSv. Heute erhalten die fünf Millionen Betroffenen in kontaminierten Gebieten generell Tschernobyl-bedingte Dosen von unter 1 mSv/Jahr, doch rund 100.000 erhalten immer noch mehr als 1 mSv pro Jahr.

Gesundheitliche Folgen

Akute Strahlenkrankheit wurde zunächst bei 237 Personen vermutet und bei 134 Personen (insbesondere Kraftwerksbeschäftigten und Feuerwehrleuten) bestätigt. Von diesen sind 28 im Jahr 1986 und weitere 19 in den Jahren 1987 bis 2004 verstorben, einige möglicherweise auch aus anderer Ursache. Laut der ukrainischen Gesundheitsbehörde sind inzwischen 15.000 Liquidatoren gestorben (mit auffällig hoher Selbstmordrate) und 92,7 % erkrankt.[6]

Die Langzeitfolgen des Unglücks sind schwer abzuschätzen. Wegen der Unsicherheit vieler Daten und epidemiologischer Modell-Parameter sind alle Voraussagen über zukünftige Morbiditäts- oder Mortalitätszahlen mit Vorsicht zu betrachten.

Zu den bisher am häufigsten beobachteten gesundheitlichen Folgen gehört ein dramatischer Anstieg der Fälle von Schilddrüsenkrebs bei Personen aus Weißrussland, Russland und der Ukraine, die zum Zeitpunkt des Unglücks Kinder oder Jugendliche waren. Der Anstieg wird auf die Belastung mit radioaktivem Jod zurückgeführt und wurde Anfang der 1990er Jahre zuerst in Weißrussland beobachtet. Insgesamt wurden in den genannten drei Ländern bis Anfang 2006 etwa 5.000 Fälle diagnostiziert. Mit weiteren Fällen wird noch über viele Jahre gerechnet. Umstritten ist, ob ein erhöhtes Schilddrüsenkrebs-Risiko auch für Menschen

besteht, die zum Zeitpunkt der höchsten Belastung durch radioaktives Jod bereits erwachsen waren.[7]

Ein durch freigesetzte radioaktive Strahlung bedingter Anstieg der Fälle von Leukämie ist bisher nicht eindeutig feststellbar, kann aber auch nicht widerlegt werden. Diesbezügliche Studien hatten zum Teil unsichere Datengrundlagen oder brachten widersprüchliche Ergebnisse. In einer großen Kohorte von Liquidatoren in Russland wurde (bei „registrierten“ Strahlendosen zwischen 150 und 300 mSv) eine annähernde Verdoppelung des Leukämierisikos gefunden.

In Folge der durch die Katastrophe bedingten Freisetzung von radioaktiver Strahlung sind auch andere Krebserkrankungen zu erwarten. Sie werden aber zum größten Teil erst nach einer Latenzzeit von mehreren Jahrzehnten auftreten. Bisher konnten nach Angaben der IARC mit Ausnahme von Schilddrüsenkrebs in den am stärksten kontaminierten Gebieten keine erhöhten Krebsraten festgestellt werden, die eindeutig auf die Strahlung zurückgeführt werden können. Hinweise auf erhöhte Raten z. B. von Brustkrebs müssten weiter verfolgt werden.

Schätzungen der IARC über die zu erwartende Häufigkeit an Krebserkrankungen beruhen auf Risikomodellen, die aus Studien bei anderen Populationen (hauptsächlich Opfern der Atombombenabwürfe in Japan) und auf der (umstrittenen) Basis der linearen Dosis/Wirkungs-Beziehung entwickelt wurden. Nach diesen Modellen wird bis 2065 in Europa mit ungefähr 16.000 Fällen von Schilddrüsenkrebs und 25.000 Fällen von anderen Krebsarten als Folge der Tschernobyl-bedingten Strahlenbelastung gerechnet. Zwei Drittel der Erkrankungen an Schilddrüsenkrebs und mindestens die Hälfte der anderen Krebserkrankungen seien in Weißrussland, der Ukraine und den am stärksten kontaminierten Gebieten der russischen Föderation zu erwarten. Ca. 16.000 Todesfälle könnten auf diese Krebserkrankungen zurückgeführt werden. Bei der hohen Zahl von Krebserkrankungen, die insgesamt in diesem Zeitraum in Europa auftreten, wird dieser Anstieg aber kaum in den nationalen Krebsstatistiken nachzuweisen sein. Zu höheren Fallzahl-Schätzungen kam der „TORCH-Bericht“ (The Other Report on Chernobyl). Er kommt zum Ergebnis, dass unter den damals lebenden 570 Millionen Menschen zwischen 30.000 und 60.000 zusätzliche Krebstodesfälle durch die Katastrophe von Tschernobyl möglich sein könnten.

Das Tschernobyl-Forum sieht nach Auswertung der vorliegenden epidemiologischen Studien weder einen Beweis noch einen Hinweis auf verringerte Fruchtbarkeit bei Männern und Frauen, auf die Zahl der Totgeburten, auf andere negative Geburtsfolgen, auf Komplikationen bei der Geburt und auf die allgemeine Intelligenz und Gesundheit der Kinder, die eine direkte Folge ionisierender Strahlung sein könnten. Die gesunkenen Geburtenraten in den kontaminierten Gebieten könnten auf die Ängste der Bevölkerung und auf den Wegzug vieler jüngerer Menschen zurückzuführen sein. Ein mäßiger, aber beständiger Anstieg von berichteten angeborenen Fehlbildungen in kontaminierten und nicht kontaminierten Gebieten Weißrusslands scheine auf eine vollständigere Erfassung und nicht auf Strahlung zurückzugehen [8]. Einige Studien von anderen Organisationen und Wissenschaftlern beschreiben im zeitlichen Zusammenhang mit der Katastrophe hingegen einen deutlichen Anstieg von genetischen bzw. teratogenen Schäden wie Totgeburten und Fehlbildungen in der Unglücksregion, aber auch in Deutschland und in anderen europäischen Ländern und legen einen ursächlichen Zusammenhang nahe [9].

Die Forscher bzw. Herausgeber der einen Position haben wiederholt den Vertretern der anderen Position Voreingenommenheit unterstellt oder deren Befunde wegen unvollständiger Absicherung der Daten und anderer methodischer Mängel zurückgewiesen. Meist handele es

sich um sogenannte ökologische Studien, die wegen des Fehlens einer individuellen Dosiszuordnung mit großer Vorsicht zu betrachten seien. Autoren, die ökologische Dosis-Wirkungsbeziehungen für Totgeburten, Fehlbildungen sowie für das Geschlechtsverhältnis bei der Geburt - unter anderem in unterschiedlich hoch belasteten bayerischen Landkreisen - gefunden haben,[10] [11] wird entgegen gehalten, dass vor dem Hintergrund der vergleichsweise geringen Strahlendosiserhöhungen in Deutschland, die sich innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition bewegten, nicht zu verstehen sei, dass solche massiven Effekte nachweisbar sein sollten. Diese Skepsis werde unterstützt durch zahlreiche negative epidemiologische Befunde in Deutschland und anderen europäischen Ländern mit zum Teil deutlich höheren Strahlendosen. Zudem sei bis heute kein biologischer Mechanismus bekannt, der solche Effekte in dem beobachteten Ausmaß erklären könnte.[12]

Gegen negative epidemiologische Befunde wird wiederum vorgebracht, dass die Nicht-Signifikanz fälschlich als Nachweis eines nicht vorhandenen Effekts ausgegeben werde. Korrekt wäre die in einigen Studien auch so offen formulierte Aussage, dass solche Effekte entweder tatsächlich nicht vorhanden sind oder aufgrund des Studiendesigns nicht nachgewiesen werden konnten. Zudem wurde bisher nicht gezeigt, dass es auch in relativ unbelasteten Gebieten stark erhöhte Raten von Totgeburten und Fehlbildungen gab. Dies wäre ein Hinweis auf andere Ursachen oder auf einen rein zufälligen Zusammenhang.

In den am stärksten von der Tschernobyl-Katastrophe betroffenen Ländern ist ein erheblicher Anstieg auch bei vielen nicht bösartigen Erkrankungen zu beobachten. Die durchschnittliche Lebenserwartung ist deutlich gesunken. Beides gilt jedoch auch für die nicht kontaminierten Gebiete. Es ist umstritten, wie weit diese Veränderungen auf höhere Strahlenbelastung oder auf andere Faktoren (z. B. Armut, schlechte Ernährung, ungesunde Lebensbedingungen, wirtschaftliche und soziale Verwerfungen nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion, psychische Belastungen im Zusammenhang mit der Katastrophe sowie den Evakuierungen und Umsiedlungen, selbstschädigendes Verhalten, bessere Diagnostik und Erfassung von Krankheiten) zurückzuführen ist. Die Zuverlässigkeit der Daten und die methodische Qualität vieler Studien sind sehr unterschiedlich.

Wirtschaftliche Folgen:

Die Katastrophe von Tschernobyl verursachte immense Kosten und schadete der Wirtschaft in der Region. Wegen des ökonomischen Umbruchs aufgrund des Zusammenbruchs der UdSSR sind die genauen wirtschaftlichen Auswirkungen Tschernobyls aber kaum zu erheben. Die Kosten haben die Budgets der drei beteiligten Länder jedoch in großem Ausmaß belastet.

Besonders betroffene Zweige der lokalen Wirtschaft waren Land- und Forstwirtschaft. So konnten aufgrund der Strahlenbelastung knapp 800.000 Hektar (ha) Land und 700.000 ha Wald nicht mehr wirtschaftlich genutzt werden. Die Landwirtschaft der Region litt und leidet aber auch unter dem „Stigma Tschernobyl“ (kaum Nachfrage nach Produkten aus der Region, kaum private Investitionen).

Mittel- und langfristig verursachte der Unfall von Tschernobyl weltweit erhebliche wirtschaftliche Verluste durch eine verstärkte Emotionalisierung der Diskussion um radiologische Themen. Atombefürworter argumentieren, dass ein Verlust von Rationalität und die Politisierung der Forschung in diesem Themengebiet diese Verluste verursachten, da vor dem Eindruck des Unfalls von Tschernobyl politische Entscheidungen zum Ausstieg aus der Atomtechnologie getroffen wurden, die zum Teil mit etwas zeitlichem Abstand wieder aufgehoben werden.

Reaktionen auf das Unglück außerhalb der ehemaligen Sowjetunion:

In den Ländern außerhalb der damaligen Sowjetunion waren die Reaktionen auf das Reaktorunglück sehr unterschiedlich:

Deutschland und Österreich:

In Süddeutschland und Österreich beherrschten monatelang hitzige Diskussionen über „verstrahlte Lebensmittel“ und andere mögliche Verstrahlungen die Öffentlichkeit. Dabei war die grundsätzliche Einstellung zur Kernenergie vielfach wichtiger als Sachargumente. Weiterhin wurden Empfehlungen zum Unterpflügen von Feldfrüchten oder zum Sperren von Kinderspielflächen gegeben, wobei es aus heutiger Sicht strittig ist, inwieweit diese angemessen und notwendig waren. In der Folge des Reaktorunglücks zerbröckelte der ohnehin schon durch die Anti-Atomkraft-Bewegung in Frage gestellte Konsens über die Verwendung der Atomenergie. Große Teile der Bevölkerung waren nun für einen Ausstieg aus der Atomenergie. In der Politik wurde diese Forderung nun auch von der SPD übernommen. Der Bau schon in Planung befindlicher Atomkraftwerke wurde auch aufgrund der Erfahrung mit Tschernobyl nicht mehr realisiert.

Ein Beispiel für die damalige Diskussion in Deutschland ist die so genannte „Strahlenmolke“: Einige Molkereien in besonders betroffenen Gebieten waren angewiesen worden, die Molke von der Milch abzutrennen und nicht zu verkaufen, sondern einzulagern, da sich in ihr das radioaktive Cäsium besonders angereichert hatte. Der Vorschlag, diese Molke als Dünger auf Felder aufzubringen (Molke ist ein gutes Düngemittel), hatte keinerlei Chancen auf Umsetzung, obwohl die Radioaktivität der Molke kleiner war als die von manchem marktgängigen Düngemittel, diese Verwendung der Molke also sogar zu einer Verringerung der Radioaktivität auf Feldern geführt hätte. Stattdessen wurde die Molke in teuren, extra errichteten Spezialanlagen über Ionenaustauscher „entsorgt“. Eine Gruppe Wagons mit „Strahlenmolke“ wurde nach einer längeren Irrfahrt durch Norddeutschland, die Boulevardmedien mit großem Interesse verfolgten, vor der „Entsorgung“ sogar auf einem gesicherten Bundeswehrgelände zwischengelagert. Umstände wie diese zeigen die Hilflosigkeit und Überforderung der Institutionen und der Gesellschaft schlechthin mit dem zugrundeliegenden Ereignis.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden nach Bekanntwerden des Reaktorunglücks die Landwirte aufgefordert, den eigentlich für Anfang Mai anstehenden Umstieg von der Winterfütterung der Milchkühe auf Sommerfütterung (und Weide) noch bis nach den ersten Regenfällen hinauszuzögern. Die Katastrophe fiel mit einer mehrwöchigen Schönwetterperiode zusammen, die einerseits das Wachstum der Wiesen sehr anregte, auf der anderen Seite aber auch mit einem stetig blasenden Ostwind die Verbreitung des radioaktiven Staubs nach Westen bewirkte. Später gab es dann eine Ausgleichszahlung für die landwirtschaftlichen Betriebe für die entstandenen Mehrkosten bei der Fütterung.

Wenige Wochen nach dem Unglück wurde in der Bundesrepublik Deutschland das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gegründet. Die Gründung dieses Ministeriums war vor allem eine Reaktion auf den als unzureichend koordiniert empfundenen Umgang der Politik mit der Katastrophe von Tschernobyl und ihren Folgen.

DDR:

Aus Rücksicht auf den sowjetischen Bruderstaat wurden Informationen über das Unglück nur zögerlich in Umlauf gebracht, oftmals wurden Fakten des Unglücks heruntergespielt oder ganz verschwiegen. In den Wochen nach dem Unglück gab es in der DDR ein reichhaltiges Angebot an Gemüse, während gleichzeitig von einer Stabilisierung der Radioaktivität auf niedrigem Niveau in den Zeitungen zu lesen war. Eine singuläre Strahlenbelastung auf dem Gebiet der DDR war im Gebiet Magdeburg zu verzeichnen, allerdings kamen die Ergebnisse der Messungen des Bezirkshygieneinstituts nicht an die Öffentlichkeit.

Heutige Diskussion:

Auch heute noch sind in der Diskussion um Tschernobyl die Grenzen zwischen sachlicher Information, gezielter Verharmlosung und absichtlich geschürter Verängstigung mitunter fließend. Die Katastrophe von Tschernobyl ist zum Symbol für die Gefahren der Nutzung der Kernenergie geworden und wird von Atomkraftgegnern häufig als Argument für einen schnellen Atomausstieg verwendet. Kernenergiebefürworter beklagen hingegen, dass Tschernobyl als Totschlagargument gegen die Nutzung der Kernenergie missbraucht werde. Weitgehend anerkannt ist heute allerdings, dass die damaligen Strahlenexpositionen in Deutschland und Österreich meist niedriger und nur in Ausnahmefällen etwa vergleichbar mit den Strahlenexpositionen durch Atombombentests vor dem Teststoppabkommen waren.

Tschernobyl und die gesperrte Zone nach dem Unfall:

Am 2. und 3. Mai 1986 wurden etwa 45.000 Einwohner aus den Gebieten in einem Umkreis von 10 km um den Reaktor evakuiert. Weitere 116.000 Einwohner wurden am 4. Mai 1986 aus dem Gebiet 30 km um den Reaktor evakuiert. In den folgenden Jahren wurden weitere 210.000 Einwohner umgesiedelt, so dass die Sperrzone mittlerweile 4.300 km² groß ist.

Etwa 1.000 Bewohner sind angesichts der wirtschaftlichen Lage trotz der stark erhöhten Strahlungswerte zum Teil schon Wochen nach dem Unglück in die gesperrte Zone zurückgekehrt. Der Grund war für die meisten, dass ihnen weder die damalige Sowjetunion noch der heutige ukrainische Staat in den Orten, in die sie evakuiert wurden, eine ausreichende Lebensgrundlage zur Verfügung stellen konnte. Dazu kommt, dass viele der Rückkehrer die Gesundheitsgefahr durch die Strahlung nicht sehr hoch einschätzten. Da es sich auch damals überwiegend um ältere Leute handelte, ist unklar, wie viele davon an den Folgen der Strahlung starben. Einige heute noch lebende Rückkehrer meinen, es seien „sehr viele gestorben“. Einige berichten aber auch, sie hätten auch nach 20 Jahren in der verstrahlten Region keine strahlenbedingten Beschwerden. Im Dorf Tschernobyl selbst, einige Kilometer südlich des Reaktors, leben heute etwa 100 Rückkehrer. Alle Rückkehrer wie auch alle Bewohner der „Zone 3“, der Region rund um die Sperrzone, erhalten ab dem Alter von 47 Jahren eine kleine Sonderrente vom ukrainischen Staat in Höhe von umgerechnet 60 US-Dollar im Monat. Unabhängig davon ernähren sich praktisch alle Bewohner der Sperrzone, wie der belasteten, aber nicht evakuierten „Zone 3“, auch aufgrund der Armut und Arbeitslosigkeit vor Ort, von den Waldpilzen und dem vor Ort gezogenen Gemüse und Obst. Die gesundheitlichen Folgen bei den Erwachsenen sind schwer abzuschätzen, vor allem auch deshalb, weil es andere ungünstige Faktoren wie die mangelhafte Ernährung, die schlechte Wirtschaftslage, Alkoholismus und eine steigende AIDS-Rate gibt. Laut Einschätzung des Radiologischen Instituts der Stadt Ivankiv, etwa 50 Kilometer südlich von Tschernobyl, sind nur etwa 3 Prozent der Proben von Gemüse, Obst und Wildfleisch, die die Bewohner dort kostenlos zur Untersuchung einreichen, über die (mit westeuropäischem Niveau im Einklang befindlichen) Grenzwerte hinaus belastet. Die Messwerte schwanken aber sehr stark nach Mikro-Regionen, es gibt einzelne Proben, die enorm hoch belastet sind.

Das Dorf Tschernobyl ist heute vor allem Wohnort aller Arbeiter und Wissenschaftler, die im Zusammenhang mit der Reaktorkatastrophe in der Sperrzone eingesetzt sind. Das Dorf wurde dafür ausgewählt, weil es innerhalb der Sperrzone als verhältnismäßig minder belastet eingestuft wurde. Das Betreten ist trotzdem nur mit besonderer Genehmigung möglich. Auf Warnschildern wird vor der Gefahr von offenbar gelegentlich auftretenden Staubstürmen im Sommer gewarnt, die stark erhöhte Radioaktivität verbreiten. Für die Bewohner sind dafür in Tschernobyl besondere Schutzräume angelegt, die laut Warnschildern sofort aufgesucht werden sollen und die man nicht verlassen sollte, bevor die Stürme sich gelegt hätten oder man gerettet werde. Es gibt dort heute ein kleines Hotel für ausländische Wissenschaftler, auch die Verwaltung der Sperrzone und verschiedene wissenschaftliche Institute der Ukraine haben dort ihren Sitz bzw. Außenstellen. Aus Strahlenschutzgründen wechseln die bei den dauernden Ausbesserungsarbeiten am „Sarkophag“ eingesetzten und in Tschernobyl untergebrachten Arbeiter alle 14 Tage. Die Mitarbeiter der Verwaltung haben eine auf Montag bis Donnerstag verkürzte Arbeitswoche, kehren am Wochenende in ihre Wohnorte außerhalb der Sperrzone, meist nach Kiew, zurück. Vor Verlassen der Sperrzone gibt es Kontrollen auf radioaktive Kontamination. Besuchern vor Ort ist es selbst überlassen, wie sie mit der radioaktiven Belastung der Umgebung umgehen. Während insbesondere einheimische Wissenschaftler ungeschützt in der Sperrzone unterwegs sind, trifft man in der am höchsten belasteten Zone im Umkreis von einigen Kilometern rund um den Reaktor auch Experten aus westlichen Ländern mit Atemschutz und Schutzanzügen.

Auch die meisten der tausenden 1986 eingesetzten Fahrzeuge und Hubschrauber, die wegen ihrer geringen bis hohen Verstrahlung damals auf einem zentralen „Friedhof“ im Sperrgebiet abgestellt wurden, sind trotz formaler Bewachung und Einzäunung ausgeschlachtet und geplündert. Motoren und Windschutzscheiben fehlen, ganze Hubschrauber sind zerlegt und verschwunden.

Bis zum Ende der Sowjetunion waren die meisten Folgen vor Ort Staatsgeheimnis. Die Behörden und Experten der heutigen Ukraine, zum Teil sogar mit denselben beteiligten Personen wie Ärzten oder Radiologen, gehen heute offen und sehr auskunftsfreudig damit um. Die Hilfgelder für die Folgen der Tschernobyl-Katastrophe sind heute ein wichtiger Wirtschaftsfaktor für die Ukraine.

Der Kernreaktor Tschernobyl heute:

Alle drei noch funktionsfähigen Blöcke wurden nach dem Ende der Aufräumarbeiten wieder hochgefahren. Der zweite Reaktorblock wurde im Oktober 1991 nach einem Feuer in der Turbinenhalle abgeschaltet. Block I folgte im November 1996, Block III am 15. Dezember 2000. Die Abschaltung erfolgte insbesondere auf Druck der Europäischen Union, die Ukraine erhielt dafür entsprechende Ausgleichszahlungen.

Der havarierte Reaktorblock ist heute durch einen provisorischen, durchlässigen „Sarkophag“ gedeckelt. Im Inneren ist weitgehend die Situation vom Zeitpunkt der Katastrophe in heißer Form konserviert. Von rund 190 Tonnen Reaktorkernmasse befinden sich Schätzungen zufolge noch rund 150–180 Tonnen im Gebäude, teils in Form geschmolzener und erstarrter Brennelemente aus Uran, Plutonium, Graphit und Sand, teils in Form von Staub und Asche, in Form ausgewaschener Flüssigkeiten im Reaktorsumpf und Fundament.

Der internationale „Shelter Implementation Plan“ hat als Ziel, einen neuen haltbaren Sarkophag zu errichten. Als erste Maßnahme wurden das Dach des ursprünglichen

Sarkophags verstärkt und die Belüftungsanlage verbessert. Der neue Sarkophag soll über dem alten errichtet werden. Dadurch soll es möglich sein, den alten Sarkophag zu entfernen, ohne dass weitere radioaktive Stoffe freigesetzt werden. Der neue Sarkophag soll 257 Meter lang, 150 Meter breit und 108 Meter hoch werden. Der Auftrag wurde am 17. September 2007[13] dem Konsortium Novarka erteilt. Es gibt jedoch auch die Meinung, dass eine zusätzliche Kapselung nicht erforderlich wäre [14].



Abbildung: Sarkophag Tschernobyl; Quelle: <http://de.wikipedia.org>



Abbildung: Sarkophag Tschernobyl; Quelle: www.nachlese.at/tschernobyl-sarkophag.htm;

Fortsetzung der chronologischen Störfalldokumentation:

Decatur, Georgia, Vereinigte Staaten

6. Juni 1988 – Die Firma Radiation Sterilizers in Decatur, Georgia berichtete vom Verlust von Caesium-137. 70.000 Behälter mit medizinischen Artikeln und Milchpackungen wurden zurückgerufen. Zehn Arbeiter werden kontaminiert, drei davon so schwer, dass sie durch die Kontaminationsverschleppung wiederum ihre Pkw und Häuser kontaminieren.

Vandellòs, Spanien

1989 - Durch ein Feuer im Kernkraftwerk Vandellòs wurden die Sicherheitssysteme stark in Mitleidenschaft gezogen. Es kam aber zu keinem schwereren Unglück, der Vorfall wurde mit INES 3 (Ernster Störfall) eingestuft[10].

1990er

Sewersk, Russland

6. April 1993 – In einem sibirischen Kernkraftwerk (u. a. genutzt für die Produktion von waffenfähigem Plutonium) wurden durch einen Unfall große Mengen radioaktiver Stoffe freigesetzt. In Folge wurden mehrere hundert Quadratkilometer verseucht, und die Einwohner der Stadt Sewersk (früher Tomsk-7) verstrahlt. Eine erhöhte Anzahl an Todesfällen durch Krebs wurde beobachtet, ebenso wurden mutierte Tiere und Pflanzen gemeldet.

Tōkai-mura, Japan

30. September 1999 – In einer Brennelemente-Fabrik in Tōkai-mura, Japan befüllten Arbeiter einen Vorbereitungstank mit 16,6 kg Urangemisch (anstatt den vorgeschriebenen 2,3 kg). Daraufhin setzte eine unkontrollierte Kettenreaktion ein und Strahlung trat aus. Zwei der drei Arbeiter starben an der Strahlenkrankheit. Mindestens 150 Menschen wurden starker Radioaktivität ausgesetzt, darunter 81 Arbeiter, welche die Kettenreaktion stoppen wollten. Mehrere Hundert Anwohner wurden kontaminiert. Dieser Unfall wurde mit INES 4 eingestuft.

2000er

Paks, Ungarn

10. April 2003 - Beim Reinigen von Brennstäben im Block 2 des Kernkraftwerkes wurde deren Umhüllung beschädigt. Dabei trat radioaktives Gas aus, das einen „Ernsten Störfall“ (INES-Kategorie 3) verursachte. Es wurde bei diesem Unglück niemand verletzt.

Windscale bzw. Sellafield, Vereinigtes Königreich

19. April 2005 - Nach dem schweren Unglück von 1957 gab es 2005 in Sellafield einen weiteren Zwischenfall (INES 3). Nach über 7 Monaten wurde ein Leck in der Wiederaufbereitungsanlage entdeckt, durch das ca. 83.000 Liter einer radioaktiven Flüssigkeit, bestehend aus Schwefelsäure, Uran und Plutonium, austraten. Die betroffene Halle wurde massiv verstrahlt, so dass ferngesteuerte Maschinen die Entsorgung der Flüssigkeit vornehmen mussten[11].

Fleurus, Belgien

11. März 2006 - Ein Mitarbeiter wurde in einer Anlage der Firma Sterigenics, die Kobalt-60-Quellen nutzt, um medizinische Geräte zu sterilisieren, mit etwa 4,6 Gy verstrahlt und musste medizinisch behandelt werden. Der Mitarbeiter betrat ohne Messgerät die Bestrahlungszelle für eine kurze Überprüfung, als die Anlage nicht aktiv war. In diesem Zustand sollten sich die Quellen eigentlich in einem Wassertank befinden. Anscheinend waren sie aber wegen eines hydraulischen Fehlers teilweise freigelegt. (INES: 4) [12]

Quellenverzeichnis zu Anhang A:

- [1] Peter Jedicke: The NRX Incident, 1. Mai 2006
- [2] California Energy Commission: Nuclear Plants in California, 1. Mai 2006
- [3] nuclearfiles.org: Accidents 1960's, 18. Mai 2006
- [4] The International Nuclear Event Scale, 21. Mai 2006
- [5] ask1.org: Harrisburg / Churchrock - Das China-Syndrom, 18. Mai 2006
- [6] nuclearfiles.org: Accidents 1970's, 19. Mai 2006
- [7] IAEA: The International Nuclear Event Scale, 21. Mai 2006
- [8] IAEA: The International Nuclear Event Scale, 21. Mai 2006
- [9] nuclearfiles.org: Accidents 1980's, 18. Mai 2006
- [10] IAEA: The International Nuclear Event Scale, 21. Mai 2006
- [11] ask1.org: Windscale / Sellafield – Strahlendes Beispiel Großbritannien, 18. Mai 2006
- [12] IAEA: Overexposure of employee in irradiation facility, 18. Mai 2006

Weblinks zu Anhang A:

Anhang B: Der weltweit erstmalige Einsatz von Atomwaffen in Hiroshima und Nagasaki

Seit dem weltweit erstmaligen Einsatz von Atomwaffen in Hiroshima und Nagasaki am 6. und 9. August 1945, kurz vor dem Ende des Zweiten Weltkrieges, sind 63 Jahre vergangen. Die Anzahl jener Menschen, welche sich noch selbst an diese Geschehnisse erinnern können sinkt beständig und die entsprechenden Ereignisse geraten in Vergessenheit oder degenerieren zu sterilem „Wissen“. In diesem Zusammenhang stellt Anhang B eine Dokumentation dieser historischen Ereignisse dar, wobei der inhaltliche Bogen von der Motivation des Einsatzes der Atomwaffen bis hin zu den Folgen der Atombombenabwürfe gespannt wird.

Obwohl diese 63 Jahre, welche seit den Ereignissen in Japan vergangen sind, eine geraume Zeitspanne darstellen, und das Thema Atomwaffen mit dem Abklingen des „Kalten Krieges“ vorübergehend an Brisanz verloren hat, gewinnt es heute wieder an Bedeutung. Die Diskussion um Atomwaffen hat eine neue Qualität bekommen. Es sind nicht mehr die großen Mächte, welche sich drohend gegenüberstehen, sondern die neue Gefahr wird vor allem in einem terroristischen Einsatz von Atomwaffen oder der Entstehung neuer Atomwaffenstaaten gesehen. Das aktuellste Beispiel ist hier sicherlich die internationale Diskussion um das Atomprogramm des Iran. Bereits die (vermutete) Entwicklung von Atomwaffen könnte in einer spannungsgeladenen Region wie dem Nahen Osten dramatische globale Entwicklungen auslösen, man denke nur an einen nicht unwahrscheinlichen Präventivschlag Israels oder der Anwendung einer Atomwaffe nach dem Muster des 11.09.2001.

Chronologie von Hiroshima und Nagasaki

Vorgeschichte

Im April 1945 kündigte der sowjetische Diktator Joseph Stalin den 1941 geschlossenen Neutralitätspakt mit Japan auf. Er hatte Harry S. Trumans Vorgänger Franklin D. Roosevelt zugesagt, spätestens drei Monate nach dem Kriegsende in Europa in den Pazifikkrieg gegen Japan einzugreifen. Er wollte sich seinerseits einen Teil der fernöstlichen Kriegsbeute sichern und die Nachkriegsordnung auch dort mitbestimmen.

Das seit 1942 begonnene Manhattan Project sollte drei einsatzfähige Atombomben herstellen. Das im Mai 1945 eingerichtete amerikanische Interim Committee sollte Vorschläge über ihre Verwendung erarbeiten. Es empfahl am 2. Juni 1945, die Waffen sofort nach ihrer Fertigstellung und ohne Vorwarnung gegen Ziele der japanischen Kriegsindustrie einzusetzen, ohne Beachtung möglicher ziviler Opfer. Nur der Untersekretär im Kriegsministerium Ralph Bard äußerte Bedenken dagegen.

Bei der Eroberung der japanischen Insel Okinawa im Juli 1945 starben etwa 12.500 US-Soldaten; insgesamt waren bis dahin etwa 70.000 US-Soldaten im Pazifikkrieg gefallen. Die amerikanische Öffentlichkeit war beunruhigt: Man rechnete im Fall einer groß angelegten Landung amerikanischer Truppen auf der Hauptinsel bei fortgesetztem Widerstand der Japaner mit bis zu 300.000 weiteren Todesopfern.

Seit sechs Monaten besaß die strategische US-Bomberflotte die völlige Lufthoheit über Japan. Ihre seit Februar 1945 intensivierten Luftangriffe mit Brandbomben nach britischem Vorbild

hatten bereits zwei Drittel der japanischen Großstädte zu etwa 60 Prozent zerstört. Zudem hatte Japan bis dahin fast seine gesamte Flotte, den Hauptteil der Luftstreitkräfte und die meisten der eroberten Gebiete eingebüßt. Während somit die wirtschaftliche Basis der Kriegführung durch den Verlust der Rohstoffzufuhr empfindlich geschwächt war, hatten die verlustreichen Kämpfe von Okinawa und Iwojima den unverändert ungebrochenen Kampfwillen der Japaner deutlich vor Augen geführt. Nur ein kleiner Bruchteil der kämpfenden Truppe war bereit, zu kapitulieren, die übrigen kämpften bis zum Tod. Inwieweit eine vergleichbare Opferbereitschaft auch bei der Zivilbevölkerung zu erwarten war, war ungewiss. Entsprechend unterschiedlich fiel die Bewertung auf amerikanischer Seite aus. Vor allem die Luftstreitkräfte (United States Air Force) waren von der zermürbenden Wirkung ihrer Angriffe überzeugt und glaubten, dass das Regime nur noch auf günstige Friedensbedingungen unter Beibehaltung der staatlichen Souveränität hoffen konnte. Daher wies der Lagebericht der strategischen Bomberflotte darauf hin, dass bei unvermindert fortgesetzten konventionellen Luftangriffen mit einer Kapitulation Japans bis Dezember 1945 zu rechnen sei.[2] Das Heer (United States Army) dagegen, das bei den vorherigen Landungen bittere Verluste einstecken musste, rechnete bei einer Invasion mit dem Schlimmsten. Dies galt besonders für den Fall, dass sich die Invasionsvorbereitungen verzögern sollten, was den Japanern weitere Zeit zur Auffrischung ihrer Verbände gegeben hätte.[3]

Die bisherigen Kriegspläne der Vereinigten Staaten sahen weitere Invasionen der japanischen Hauptinseln erst ab November 1945 vor. Am 4. Juli 1945 berieten die Militärführungen Großbritanniens und der Vereinigten Staaten gemeinsam über das weitere Vorgehen im Pazifik. Die britische Regierung war in die Fortschritte des Atombombenbaus eingeweiht und gab ihre Zustimmung zu deren Einsatz. Vorübergehende Überlegungen, die fertigen Bomben nur als „Warnschuss“ über unbesiedeltem japanischem Gebiet zu zünden, wurden nicht weiter verfolgt.

Am 9. Juli hatte der japanische Botschafter Sato Naotake in Moskau bereits um Friedensverhandlungen gebeten. Der russische Außenminister Molotow sollte diese Bitte den Teilnehmern der bevorstehenden Potsdamer Konferenz der Alliierten (17. Juli bis 2. August 1945) überbringen. Die Vereinigten Staaten wussten darüber ab dem 13. Juli 1945 Bescheid.[4]

Am 16. Juli 1945 erfuhr Truman in Berlin zum Auftakt der Potsdamer Konferenz von der ersten erfolgreichen Zündung einer Atombombe nahe Alamogordo in der Wüste im US-amerikanischen Bundesstaat New Mexico (Trinity-Test). Die zweite Bombe Little Boy wurde zeitgleich zur Insel Tinian im Pazifik verschifft, wo sie einsatzfertig gemacht werden sollte. Winston Churchill erfuhr am selben Tag von dem Testerfolg und notierte in seinen Erinnerungen, wie befreiend er die Nachricht angesichts der Aussicht auf verlustreiche Landschlachten erlebte: „Jetzt war mit einem Mal dieser Alb vorüber, und an seine Stelle trat die helle und tröstliche Aussicht, ein oder zwei zerschmetternde Schläge könnten den Krieg beenden...“.

Auch General Dwight D. Eisenhower berichtete später, die Entscheidung zum Einsatz der beiden Atombomben habe am 16. Juli bereits festgestanden. Er hatte Truman davon abgeraten, weil die Japaner schon Kapitulationsbereitschaft signalisiert hätten und die Vereinigten Staaten solche Waffen nicht als erste einsetzen sollten. Doch Truman schrieb in sein Tagebuch: „Ich glaube, dass die Japsen klein begeben werden, ehe Russland eingreift“.

Erst am Abend des 24. Juli eröffnete Truman Stalin beiläufig, man habe einen neuen Bombentyp entwickelt, der geeignet sei, den japanischen Kriegswillen zu brechen. Stalin habe, so notierte Truman in sein Tagebuch, die Nachricht äußerlich unbewegt aufgenommen und den Vereinigten Staaten zugeraten, die Waffe zu gutem Zweck einzusetzen. Man nimmt jedoch an, dass Stalin durch den Mitarbeiter des Manhattan Projekts Klaus Fuchs über die Fertigstellung der US-Atombomben informiert war, denn noch am selben Abend veranlasste er seinen Geheimdienstchef Lawrenti Beria, den Bau einer sowjetischen Atombombe, der 1943 begonnen hatte, zu beschleunigen.[5]

Am 26. Juli 1945 gab Truman im Namen der Vereinigten Staaten, der Republik China unter Chiang Kai-shek und des Vereinigten Königreichs die Potsdamer Erklärung ab, in der er die japanische Führung zur sofortigen und bedingungslosen Kapitulation aufforderte. Dies war nicht mit der Sowjetunion abgesprochen. Molotow hatte die Vereinigten Staaten vergeblich darum gebeten, das Ultimatum noch einige Tage zurückzuhalten, bis seine Regierung ihren Nichtangriffspakt mit Japan gekündigt habe. Doch der Kriegseintritt der Sowjetunion war für die US-Regierung nun unerwünscht. Die Erklärung ging heraus: „Die volle Anwendung unserer militärischen Macht, gepaart mit unserer Entschlossenheit, bedeutet die unausweichliche und vollständige Vernichtung der japanischen Streitkräfte und ebenso unausweichlich die Verwüstung des japanischen Heimatlandes“. Man werde Japan vollständig besetzen, seine Führung absetzen und ausmerzen, Demokratie einführen, Kriegsverbrecher bestrafen, Japans Gebiet auf die vier Hauptinseln begrenzen, Reparationen fordern. Dazu werde man die japanische Industrie erhalten und ihr später wieder Teilnahme am Welthandel erlauben. Die Alternative für Japan ist die sofortige und völlige Zerstörung.

Jeder konkrete Hinweis auf den geplanten Einsatz einer neuartigen Waffe und deren Ziel fehlte. Da die US-Invasion der japanischen Hauptinseln erst drei Monate später beginnen sollte, musste die japanische Führung annehmen, es handele sich um das übliche Drohritual zur Demoralisierung der Japaner, nicht um eine konkrete Warnung. Zugleich hoffte sie immer noch, Stalin werde die Westalliierten zur Annahme der eingeleiteten Friedensinitiative bewegen. Besonders die Gebietsverluste schienen unannehmbar. So lautete die Antwort von General Kantaro Suzuki: „Die Regierung findet nichts von bedeutsamem Wert an der gemeinsamen Erklärung, und sieht daher keine andere Möglichkeit, als sie vollständig zu ignorieren und sich entschlossen für die erfolgreiche Beendigung des Krieges einzusetzen“. Mit einer positiven Antwort hatten die Vereinigten Staaten ohnehin nicht gerechnet. Schon am 24. Juli hatte Truman angeordnet, der zuständige Befehlshaber General Carl Spaatz solle den Einsatz der „Spezialbomben" bis zum 3. August vorbereiten. Truman überließ diesem die Zielauswahl.

Abwurf der ersten Atombombe auf Hiroshima

Wahl des Ziels

Hiroshima war als eine der wenigen japanischen Großstädte von Bombardierungen verschont geblieben. Das Target Committee in Los Alamos hatte daneben noch Kyōto, Yokohama, Kokura, Niigata und Tokio als mögliche Ziele erwogen. Doch Hiroshima war Sitz des Hauptquartiers der 2. Armee unter Feldmarschall Hata Shunroku, das für die Verteidigung Südjapans zuständig war. Es war daher Truppensammelpunkt und diente zur Lagerung kriegswichtiger Güter. Doch die meisten der ca. 255.000 Einwohner waren Zivilisten, davon zehn Prozent koreanische sowie chinesische Zwangsarbeiter.

Spaatz hielt Hiroshima für das am besten geeignete Ziel, da es als einzige der Städte, die zur Auswahl standen, keine Kriegsgefangenenlager hatte. Nur einige amerikanische Kriegsgefangene und rund ein Dutzend Deutsche befanden sich dort. Die Annahme, die Japaner würden Kriegsgefangene als menschliche Schutzschilde in die Stadt verlegen, war auch der Grund dafür, dass man jede konkrete Vorwarnung unterließ.[6] Hiroshima bestand bis auf einige Betonbauten im Zentrum aus Holzbauten. Die US-Militärs rechneten daher mit einem Feuersturm. Industrieanlagen in den Außenbezirken der Stadt sollten dadurch ebenfalls zerstört werden.

Startvorbereitungen

Am 31. Juli war die drei Meter lange und vier Tonnen schwere Uranbombe "Little Boy" (Sprengkraft 12.500 Tonnen TNT) einsatzbereit. Die Teile für die zweite Bombe "Fat Man" trafen auf Tinian ein. Der für den 1. August geplante Start musste wegen eines Taifuns über der Insel aufgeschoben werden. Am 4. August erfuhr Pilot Paul Tibbets unter strengsten Geheimhaltungsaufgaben, was sein Auftrag war. Er taufte die B-29-Superfortress Nr. 82 auf den Namen seiner Mutter "Enola Gay". Alle Bordwaffen bis auf das Heckgeschütz waren entfernt worden. Man hatte den steilen Sinkflug nach Auslösung immer wieder geübt, um der Detonationswelle der gezündeten Bombe zu entgehen.



Abbildung links: Modell der Atombombe, die auf Hiroshima abgeworfen wurde; Quelle: US government DOD and/or DOE photograph. Public domain as work of U.S. federal government;

Abbildung unten: Flugzeug, von dem aus der Abwurf erfolgte; Quelle: public domain – U.S. federal government;



Für den 6. August wurde klarer wolkenloser Himmel für die japanischen Inseln vorhergesagt. Um 2:45 Uhr morgens startete das Bomberflugzeug mit 13 Mann Besatzung an Bord. Die Bockscar und die The Great Artiste begleiteten die Enola Gay. Die Befürchtungen der Militärs, dass die Bombe vorzeitig explodieren könnte, waren groß. W. L. Lawrence (Geschichte der Atombombe 1951, S. 182f) beschrieb die Vorgänge vor dem Start:[7] „Als dem General gemeldet wird, es bestehe Gefahr, dass bei einem Fehlstart die ganze Insel in die Luft fliegt, antwortet er „wir müssen beten, dass das nicht geschieht“. Derselbe General

erzählt dann von dem riskanten Start der Maschine: „Wir versuchten beinahe, sie mit unseren Gebeten und Hoffnungen in die Luft zu heben.“ Vor dem Abflug sprach ein lutherischer Feldgeistlicher ein „ergreifendes Gebet“. Daher nannten die Japaner „Little Boy“ später auch die „christliche Bombe“. Erst auf dem Hinflug nach Hiroshima klärte Tibbets seine Bomberbesatzung darüber auf, dass sie eine Atombombe abwerfen sollten wie die, die kürzlich getestet worden sei. Von Radioaktivität erfuhren die Männer nichts.

Der Abwurf

Gegen 7 Uhr Ortszeit, eine Stunde vor der Ankunft über Japan, entdeckte das japanische Frühwarnsystem die drei Flugzeuge. Es wurde Alarm ausgerufen, Radiosendungen wurden unterbrochen. Gegen 8 Uhr gab die Radarüberwachung in Hiroshima Entwarnung: Sie hielt die erst sehr hoch fliegende Enola Gay für ein Aufklärungsflugzeug. Der Gang in den Luftschutzbunker wurde daraufhin nur für den Fall empfohlen, dass tatsächlich Bomberverbände gesichtet würden. Auf dieses Täuschungsmanöver hatten die Amerikaner gesetzt und deshalb schon drei Tage vorher täglich mehrmals einzelne Flugzeuge ins Zielgebiet fliegen lassen.

Um 8:15 Uhr und 17 Sekunden Ortszeit klinkte der US-Bomber Enola Gay die Bombe in 9.450 Metern Höhe aus. Um 8:16 Uhr und zwei Sekunden detonierte sie in 580 Metern Höhe über der Innenstadt bei $34^{\circ} 23' N$, $132^{\circ} 27' E$. 43 Sekunden später hatte die Druckwelle 80 Prozent der Innenstadtfläche dem Erdboden gleich gemacht. Es entstand ein Feuerball mit einer Innentemperatur von über einer Million Grad Celsius. Die Hitzewirkung von mindestens 6.000 Grad Celsius ließ noch in über zehn Kilometer Entfernung Bäume in Flammen aufgehen. Von den 76.000 Häusern der Großstadt wurden 70.000 zerstört oder beschädigt.



Abbildungen: Szenen aus Hiroshima nach dem Atombombenabwurf am 6. August 1945;

Unterdessen stieg der für Atombombenexplosionen charakteristische, aus aufgewirbelten und verseuchten Trümmern bestehende Atompilz bis in 13 Kilometer Höhe auf. Der Heckschütze der Enola Gay konnte diesen noch aus 560 Kilometern Entfernung sehen. Dieser verbreitete hochkontaminiertes Material, das etwa 20 Minuten später als radioaktiver Niederschlag (Fallout) über dem Großraum Hiroshima niederging.

Die Opfer

Zwischen 90.000 und 200.000 (stark abweichende Angaben) Menschen waren sofort tot. Bei Menschen, die sich im innersten Stadtkern aufhielten, verdampften buchstäblich die obersten

Hautschichten. Der gleißende Blitz der Explosion brannte Schattenrisse von Personen in stehengebliebene Hauswände ein, ehe die Personen von der Druckwelle fortgerissen wurden. Die (überwiegend unmittelbar bei der Explosion freigesetzte) nukleare Strahlung tötete in den Folgewochen etwa 60.000 weitere Einwohner, die der unmittelbaren Druck- und Hitzewelle entkommen waren, jedoch tödliche Strahlendosen erhalten hatten. Viele, die vor der unerträglichen Hitze an den Fluss geflohen waren und von kontaminiertem Wasser tranken, hatten daraufhin Haarausfall, bekamen purpurrote Flecken am ganzen Körper und verbluteten dann qualvoll an inneren Verletzungen. Zum Ende des Jahres 1945 waren 140.000 (± 10.000) Stadteinwohner auf diese Weise gestorben.

Die Bombe tötete 90 Prozent der Menschen in einem Radius von 0,5 Kilometern um das Explosionszentrum und immer noch 59 Prozent im weiteren Umkreis von 0,5 bis 1 Kilometern. Bis heute sterben damalige Einwohner Hiroshimas an Krebserkrankungen als Langzeitfolge der Strahlung. Nimmt man diese Spätfolgen hinzu, starben über 240.000 der damaligen Einwohner (bis zu 98 Prozent).



Abbildungen: Opfer des Atombombenabwurfes von Hiroshima; todbringende Auswirkungen der nuklearen Strahlung und der thermischen und mechanischen Wirkung der Atombombe; Quelle: <http://de.wikipedia.org/>;

Zwischen den Abwürfen

Aus Hiroshima selbst konnte kein Überlebender das Ereignis nach Tokio melden. Alle Verbindungen waren unterbrochen. Erst Stunden später meldeten Militärstützpunkte in Hiroshimas Umgebung eine gewaltige Explosion mit unbekannter Ursache. Man glaubte anfangs, ein großes Munitionslager der Garnison sei explodiert. Offiziere, die die Lage vor Ort überprüfen sollten, waren durch Luftangriffe auf Tokio daran gehindert. Am Dienstag, dem 7. August, um 0:15 Uhr berichtete Truman auf dem Heimweg in die Vereinigten Staaten vom Atlantikschiff USS Augusta der Welt erstmals vom Einsatz der Atombombe: „Die Kraft, aus der die Sonne ihre Macht bezieht, ist auf diejenigen losgelassen worden, die dem Fernen Osten Krieg brachten“. Er forderte die Japaner nochmals zur Kapitulation auf und drohte: „Wenn sie unsere Bedingungen nicht akzeptieren, dann mögen sie einen Regen der Zerstörung aus der Luft erwarten, wie er noch nie auf der Erde gesehen worden ist.“

Doch in Tokio brauchte das Kriegskabinett Tage, um sich über das Ausmaß der Zerstörungen in Hiroshima klar zu werden. Auch dann konnte es sich nicht auf eine sofortige bedingungslose Kapitulation einigen, da noch immer eine Friedensinitiative Stalins zu besseren Bedingungen für Japan erwartet wurde. Doch am 8. August erklärte die Sowjetunion Japan den Krieg. Die Rote Armee besetzte die Mandschurei und begann zudem einen Angriff

auf die Kurilen. Die Kriegserklärung, die der japanische Botschafter in Moskau nach Tokio übermitteln sollte, kam dort nie an.

Die US-Regierung, die mit einer schnellen Kapitulation der Japaner gerechnet hatte, ließ ebenfalls am 8. August ein frisch gedrucktes Flugblatt in Millionen Exemplaren über 47 japanischen Städten abwerfen. Es verglich die Wirkung der Atombombe mit der von 2000 herkömmlichen Bombenladungen einer B-29: Wer dies bezweifle, solle sich bei Japans Regierung nach dem Schicksal Hiroshimas erkundigen. Das japanische Volk wurde aufgerufen, die Beendigung des Krieges zu fordern. Andernfalls werde man entschlossen weitere Atombomben und auch andere überlegene Waffen verwenden. Eine konkrete Vorwarnung für den zweiten Abwurf blieb aus.

Am 9. August um 11:00, zwei Minuten vor der Zündung der Nagasakibombe, traf sich das japanische Kriegskabinett in Tokio. Außenminister Shigenori Togo drängte auf sofortigen Friedensschluss; die Militärs stellten jedoch vier für die Vereinigten Staaten unannehmbare Bedingungen:

- Erhaltung des Tennō-Regimes
- keine ausländische Besetzung
- freiwillige Abrüstung der japanischen Truppen
- Prozesse gegen Kriegsverbrecher nur vor japanischen Gerichten.

Die heftige interne Debatte darüber endete ohne Ergebnis.

Abwurf der zweiten Atombombe auf Nagasaki

Wahl des Ziels

Nagasaki war damals ein wichtiger Kriegshafen und Standort des Mitsubishi-Rüstungskonzerns. Dort produzierten und reparierten etwa 20.000 koreanische Zwangsarbeiter u. a. Kreuzer und Torpedoboote für die kaiserliche Kriegsmarine.[8] Sie hatten auch die Torpedos gebaut, mit denen Japan die US-Flotte auf Pearl Harbour angegriffen hatte. Die Stadt gehörte damit zu den möglichen Angriffszielen der US-Luftwaffe. Sie hatte damals insgesamt etwa 240.000 bis 260.000 Einwohner.

Startvorbereitungen

Auf Tinian war die Plutoniumbombe „Fat Man“ mit einer Sprengkraft von 22.000 Tonnen TNT in großer Eile und unter Auslassung wichtiger Kontrolltests zusammengebaut worden. Die Beteiligten standen unter dem Eindruck der Versenkung der USS Indianapolis am 30. Juli 1945. Dieser schwere Kreuzer war nach der Ablieferung von Teilen der Hiroshimabombe in Tinian auf der Weiterfahrt nach Guam durch zwei Torpedotreffer eines japanischen U-Bootes getroffen worden und in wenigen Minuten gesunken. Von knapp 1.200 Mann Besatzung konnten nur 318 gerettet werden. Es war der letzte Verlust eines US-Kriegsschiffes im Pazifikkrieg. Wäre dies auf dem Hinweg geschehen, so wäre Japan zumindest einer von zwei Atombombenangriffen erspart geblieben; schon die Gewinnung von waffenfähigem Material für drei Bomben hatte über ein Jahr gedauert.

Die Generäle auf Tinian beschlossen den Abwurf der zweiten Bombe am 8. August selbst. Als Befehlsgrundlage galt ihnen die Order des US-Präsidenten vom 24. Juli, wonach die

„Spezialbomben“ nach dem 3. August einsatzbereit sein und nacheinander abgeworfen werden sollten. Eine weitere Anordnung holten sie nicht ein. Sie zogen das für den 11. August angesetzte Abwurfdatum zwei Tage vor, da schlechtes Wetter vorhergesagt war. Nachts gegen 2:00 Uhr am 9. August 1945 startete der 25-jährige Pilot Charles W. Sweeney den Bomber Bockscar mit teilweise neuer Besatzung und zwei Begleitflugzeugen. Sein Ziel war Kokura, eine Stadt mit deutlich stärkerer Rüstungsindustrie als Nagasaki. Bei der Ankunft lag Kokura unter einer dichten Wolkendecke. Bei drei Anflügen war die Sicht stark behindert, so dass Sweeney den Angriff abbrach. Er durfte die Bombe nur nach Sicht abwerfen, da er die Rüstungsbetriebe treffen sollte. Da dies nicht möglich war und das Flugbenzin zur Neige ging, flog er das Ausweichziel Nagasaki an.

Der Abwurf

Ursprünglich war ein Direktangriff auf die Schiffswerften geplant. Da in Nagasaki aber ebenfalls schlechte Sichtverhältnisse herrschten, konnte kein exakter Zielabwurf durchgeführt werden. Der Pilot hätte den Angriff unter solchen Umständen abbrechen müssen, entschied sich jedoch für einen Radaranflug. Nur ohne die Bombe an Bord konnte man gerade noch Okinawa für eine Notlandung erreichen.[9]

Die Bombe wurde um 11:02 Uhr Ortszeit etwa 3 Kilometer nordwestlich des geplanten Zielpunkts bei 32° 46' N, 129° 51' E über dicht bewohntem Gebiet abgeworfen. Sie sollte eigentlich den Mitsubishikonzern treffen, verfehlte ihr Ziel aber um mehr als 2 Kilometer. Dennoch ebnete sie fast das halbe Stadtgebiet ein. Die Explosion in etwa 470 Metern Höhe über dem Boden vernichtete im Umkreis von einem Kilometer 80 Prozent aller Gebäude – zumeist Holzhäuser – und ließ nur wenige Überlebende zurück. Sie detonierte in einem Tal, so dass die umliegenden Berge die Auswirkungen auf die Umgebung der Stadt dämpften. Die Bombe setzte über eine Entfernung von vier Kilometern Objekte in Brand. Ein Feuersturm blieb aus. Der Atompilz erhob sich 18 Kilometer in die Atmosphäre.

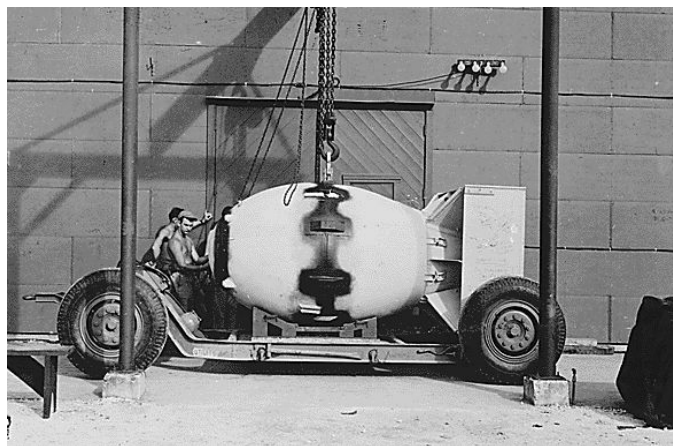


Abbildung oben: Die Atombombe, welche über Nagasaki abgeworfen wurde;
Quelle: U.S. federal government, public domain.

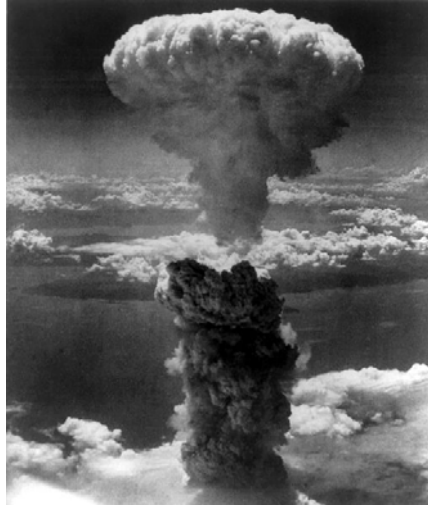


Abbildung: Die Detonation der Atombombe von Nagasaki;
Quelle: U.S. federal government, public domain.

Die Opfer

Etwa 30 Prozent der Bevölkerung wohnten 2.000 Meter oder weniger vom Bodennullpunkt entfernt. Auch im Fall von Nagasaki variieren die Angaben über die Opferzahlen beträchtlich. Im Innenstadtbereich starben etwa 22.000 Menschen sofort. Weitere 39.000 starben innerhalb der nächsten vier Monate.[10] In anderen Quellen finden sich Schätzungen von 70.000[11] bis 80.000 Tote.[12] Die Zahl der Verletzten in Nagasaki betrug ca. 75.000 Personen.[13] Bis heute sind nach Angaben der Universität von Nagasaki ca. 74.000 Menschen ums Leben gekommen. In Hiroshima waren es laut der Universität ca. 119.000 Menschen. In Nagasaki lag die Leukämierate siebenfach höher als für die Menschen einer vergleichbaren japanischen Population.

Das Kriegsende

Die Nachricht von der Zerstörung Nagasakis löste bei Japans Regierung Bestürzung aus. Man fürchtete, die Vereinigten Staaten würden eine dritte Bombe auf Tokio werfen. Ein abgeschossener B-29-Pilot gab diesen Gerüchten Nahrung. Am 12. August trafen tatsächlich weitere Atombombenteile auf Tinian ein, die bis zum 17. August einsetzbar gemacht werden sollten.

Nach zwölfstündiger, ergebnisloser Beratung des Kriegskabinetts, bei der sich die Positionen des Außenministers und der Militärs unversöhnlich gegenüberstanden, bat Admiral Suzuki Kantarō, der bis dahin nicht in die Debatte eingegriffen hatte, den Tennō am 10. August 1945 um seine Entscheidung. Hirohito sprach erstmals ein Machtwort und entschied um 2:00 Uhr morgens, die Potsdamer Erklärung sei anzunehmen. Mit dem Zusatz, man verstehe diese so, dass der Tennō seine souveränen Rechte behalten könne, wurde dieser Beschluss den Alliierten übermittelt.

Die Vereinigten Staaten erklärten daraufhin, man werde die Autorität des Tennōs dem alliierten Besatzungskommando unterstellen, sobald die Kapitulation erklärt sei. Die japanische Erklärung wurde also nicht als solche gewertet. Dies wurde in Japan am 12. August bekannt. Die japanischen Generäle riefen daraufhin ihre Soldaten auf, zu millionenfachem Selbstmord bereit zu sein, um die Invasoren „ins Meer zu treiben“.

Am 14. August entschied Hirohito erneut, zu kapitulieren, um die Nation zu retten und den Japanern weiteres Leid zu ersparen. Er selbst werde seine Untertanen um Verständnis dafür bitten. Bevor seine Rede im Rundfunk ausgestrahlt werden konnte, versuchten jüngere Offiziere einen Staatsstreich. Nachdem der Kommandeur Tokios, General Tanaka, sie mit einer langen Rede besänftigt hatte, begingen er und die Anführer der Revolte Selbstmord. Am 15. August 1945 fand der letzte Luftangriff der Vereinigten Staaten statt; er galt den Städten Kumagaya (Präfektur Saitama) und Isesaki (Präfektur Gunma). Um 16:00 Uhr wurde Hirohitos Rede gesendet. Die auf Plätzen versammelten Japaner, die seine Stimme nie zuvor vernommen hatten, erfuhren, wie es um Japan stehe: „Der Feind hat jüngst eine unmenschliche Waffe eingesetzt und unserem unschuldigen Volk schlimme Wunden zugefügt. Die Verwüstung hat unberechenbare Dimensionen erreicht. Den Krieg unter diesen Umständen fortzusetzen, würde nicht nur zur völligen Vernichtung unserer Nation führen, sondern zur Zerstörung der menschlichen Zivilisation ... Deshalb haben wir angeordnet, die gemeinsame Erklärung der Mächte anzunehmen“.

Die Rede wurde von zahlreichen Selbstmorden begleitet und gefolgt. Erst am Folgetag erging der kaiserliche Befehl an die Truppen, alle Kampfhandlungen einzustellen. Bis zum 18. August erreichte dieser alle Einheiten der japanischen Heimatarmee; bis zum 22. August erreichte er die japanischen Truppen in Überseegebieten. Am 30. August traf die alliierte Pazifikflotte in der Bucht von Tokio ein.

Am 2. September unterzeichneten der neue Außenminister Mamoru Shigemitsu und Generalstabschef Umezu Yoshijirō für Japan, General Douglas MacArthur für die Alliierten auf dem Schlachtschiff USS Missouri die Kapitulationsurkunde. MacArthur hielt eine unerwartete Rede, die Sieger und Besiegte aufforderte, gemeinsam eine der Menschenwürde verpflichtete Welt aufzubauen. Damit war der Zweite Weltkrieg beendet.

Nothilfe für die Opfer und Schadensanalyse

Für Hiroshima und Nagasaki bedeutete das Kriegsende, dass nun ausländische Hilfe, etwa durch das Rote Kreuz, erfolgen konnte. Die US-Armee führte in den folgenden Monaten unter Leitung des militärischen Beauftragten für das Manhattan-Projekt, General Leslie Groves, eine ausführliche Dokumentation der Bombenschäden durch, an der auch Wissenschaftler und Mediziner teilnahmen. Die veröffentlichten Ergebnisse waren allerdings propagandistisch geprägt. Insbesondere wurde die radiologische Wirkung der Waffen verneint, die noch Monate nach den Explosionen Zehntausende Opfer forderte. Es wird geschätzt, dass in Hiroshima bis Ende 1945 weitere 60.000 zunächst Überlebende den Folgen der Verstrahlung sowie Verbrennungen und anderen schweren Verletzungen erlagen. Bis 1950 war die Zahl der Spätopfer in beiden Städten auf insgesamt 230.000 gestiegen, die meisten waren den Auswirkungen der Primärverstrahlung zum Opfer gefallen.

Die Debatte um die Atombombenabwürfe

Befürworter

Die Befürworter der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki argumentieren im wesentlichen, dass die Atombombeneinsätze:

- notwendig waren für eine Kapitulation Japans,

- die Kriegsdauer verkürzten,
- eine Invasion Japans durch amerikanische Streitkräfte unnötig machten und dadurch Millionen von US-Soldaten, die bei einer Invasion Japans zum Einsatz kommen sollten, das Leben rettete.

Der Ursprung dieser Argumentationslinie geht auf ein Interview von Harper's mit dem ehemaligen Kriegsminister Stimson im Jahre 1947 zurück. Darin argumentierte Stimson, dass „die Kapitulation Japans nicht möglich war, ohne dass die USA ihre Fähigkeit, das japanische Imperium zu vernichten, bewiesen hätten“. Er fügte hinzu, dass „die einzige Alternative eine Invasion Japans gewesen ist“, welche möglicherweise „über eine Million Opfer unter den amerikanischen Streitkräften gefordert hätte“.[14] Die These, dass „die Atombombe eingesetzt wurde um Millionen Amerikanern das Leben zu retten“, wird heute von nur noch wenigen Historikern vertreten.[15]

Gegner

Die Gegner der Rechtfertigungen der Atombombeneinsätze, auch als "Revisionisten" bezeichnet, argumentieren u.a., dass

- die Atombombeneinsätze insbesondere im Falle von Nagasaki militärisch nicht nötig waren, da Japan schon nahe der Kapitulation war,
- der Krieg innerhalb kurzer Zeit auch ohne die Atombombenabwürfe geendet hätte,
- alternative Möglichkeiten zur Beendigung des Krieges außer Atombombeneinsatz und Invasion vorhanden waren, aber nicht ausgenutzt wurden,
- die zum damaligen Zeitpunkt geschätzten Opferzahlen im Falle einer US-Invasion im Bereich von zehntausenden, nicht aber hunderttausenden lagen,
- Atombombeneinsätze insbesondere gegen zivile Ziele ethisch/moralisch nicht zu verantworten sind.

Der erste bekannte Wissenschaftler, der die Argumentation von Truman/Stimson in Frage stellte, war Gar Alperovitz. Er ging davon aus, dass das Argument der Rettung von US-Amerikanern nur ein Vorwand war, um die wahren Zwecke der US-Regierung zu verdecken. Die Abwürfe hätten nicht das Ziel gehabt, eine Invasion in Japan zu vermeiden, sondern hätten vielmehr im Rahmen einer 'Atomic Diplomacy' die Sowjetunion von weiterem Vorrücken in Fernost abschrecken und ihr die Macht der USA vorführen sollen.[16]

Die Abwürfe wurden gegenüber der US-amerikanischen Öffentlichkeit seinerzeit vor allem mit den erwarteten Verlusten bei einer Invasion der japanischen Hauptinseln begründet. Die Schätzungen dieser Verluste werden jedoch durch verschiedene Quellen in Frage gestellt. So wiesen zum Beispiel Bruce Cumings und Samuel Walker auf einen Konsens in der heutigen Geschichtsforschung hin, dass man die US-Verluste später viel höher dargestellt habe als sie ursprünglich angenommen worden waren: Das Militär sei vor den Abwürfen von 25.000 bis schlimmstenfalls 46.000 toten US-Soldaten im Falle einer Invasion Japans ausgegangen. Da Japans Kapitulation auch ohne diese absehbar gewesen sei und es zudem noch weitere Alternativen zur Beendigung des Krieges neben Atombombeneinsatz oder Invasion gegeben habe, sei die offizielle These, der Atombombeneinsatz habe vielen Amerikanern das Leben gerettet, falsch.[15][17]

Dass die Atombombeneinsätze militärisch nicht sinnvoll waren, spiegelt sich in den Meinungen einiger damals führender Militärs wieder. Zu den Persönlichkeiten, die die Notwendigkeit des Atombombeneinsatzes in Frage gestellt haben, werden hohe US Militärs

wie z. B. Dwight D. Eisenhower, General Douglas MacArthur, Flottenadmiral William D. Leahy, General Carl Spaatz und Flottenadmiral Chester W. Nimitz gezählt. [18] Weitere mögliche Motivationen der US-Regierung zum Einsatz der Atombomben waren anderen Gelehrten zufolge z. B. die Rechtfertigung der hohen Entwicklungskosten der Atombomben (zwei Milliarden Dollar), oder auch ein Test der Wirkungsweise von Atombomben an realen Zielen. Auch rassistische Beweggründe werden mitunter genannt, bis hin zur Darstellung der Einsätze als Völkermord. [19] So war besonders der Einsatz der Atombombe in Nagasaki laut Martin Sherwin (zusammengefasst von Cumings) "bestenfalls sinnlos, schlimmstenfalls Völkermord".[20]

Bewertung in den USA

Die Abwürfe werden in den USA von Regierungsseite und in der Öffentlichkeit noch immer weitgehend genauso gerechtfertigt wie zur Zeit ihrer Durchführung. So würden auch heute noch viele Amerikaner der Aussage George Bushs senior im Jahr 1991 zustimmen, dass "die Abwürfe Millionen von Leben gerettet haben". Samuel J. Walker führt diese öffentliche Meinung in den USA auf den Einfluss von Schulbüchern zurück, welche ein Basiswissen für das ganze Leben lieferten. Oftmals seien in diesen die Alternativen zur Beendigung des Krieges auf den Atombombeneinsatz oder die Invasion Japans reduziert und zudem die Wahrscheinlichkeit und die möglichen US-Opferzahlen einer Invasion übertrieben dargestellt.[25]

Bewertung in Japan

Unmittelbar nach Ende des Krieges unterlagen jegliche Berichterstattung, Fotografien und Filmaufnahmen über die Folgen der Atombombeneinsätze strenger Zensur durch die amerikanischen Besatzer. Erst 1948 begannen Details der Katastrophe an die Öffentlichkeit zu gelangen. In der unmittelbaren Nachkriegszeit entstand mit Gedanken an die Erfahrungen des Krieges und im Angesicht der neuen Bedrohungen des beginnenden kalten Krieges eine Friedensbewegung. Diese beinhaltete auch eine von Hausfrauen initiierte Kampagne zur Ächtung von Atomwaffen, bei der 30 Millionen Unterschriften gesammelt werden konnten.

Bis heute tragen auch zahlreiche japanische Künstler, allen voran Kenzaburo Oe dazu bei, die Schrecken des Krieges zu verarbeiten. [27] Auch wurde etwa ein Peace Memorial Park in Hiroshima im Jahre 1955 eingerichtet, um dem Atombombeneinsatz zu gedenken. Wie heikel das Thema Atombombenabwurf auch heute in Japan ist, zeigt der Rücktritt des Japanischen Verteidigungsministers im Jahr 2007. Fumio Kyuma trat aufgrund einer Rede vor Studenten zurück, bei der er gesagt hatte, die Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki "hätten nicht vermieden werden können", weil sie Japan "ein Schicksal wie Deutschland erspart" (gemeint ist die Teilung) und die Kapitulation beschleunigt hätten. Weite Teile der japanischen Gesellschaft, Medien und die Opposition hatten ihre Empörung geäußert und massiven Druck auf den Politiker ausgeübt.

Weitere Folgen

Die historische Erfahrung, dass auch demokratisch gewählte Regierungen in einem Krieg, der als Verteidigung begann und als Totaler Krieg endete, sämtliche moralischen und zivilisatorischen Hemmschwellen verlieren und beispiellose Massentötungen auch von Zivilisten begehen können, bestimmt seither das politische und historische Bewusstsein weltweit.

Das Datum der Abwürfe bildet einen festen Ausgangspunkt vieler Initiativen der internationalen Friedensbewegung, darunter auch späterer Gruppen wie den Internationalen Ärzten gegen den Atomkrieg. In Deutschland kam es 12 Jahre später erstmals zu einer breiten außerparlamentarischen Opposition gegen die geplante Atombewaffnung der Bundeswehr. Bundeskanzler Konrad Adenauer hatte sogenannte „taktische“ Atombomben von einer mit der Hiroshimabombe vergleichbaren Wirkung als bloße „Weiterentwicklung der Artillerie“ verharmlost. 18 Wissenschaftler unter Federführung von Carl Friedrich von Weizsäcker widersprachen ihm mit dem Göttinger Appell vom 12. April 1957.

Quellen des Anhang B

- [1] David Horowitz, Kalter Krieg S. 46
- [2] David Horowitz, a.a.O. S. 46
- [3] Richard B. Frank, Downfall, S. 211: Willoughbys Anhang 1 zu "G-2 Estimate of the Enemy Situation with Respect to Kyushu".
- [4] David Horowitz, a.a.O. S. 45
- [5] Theo Sommer, 1945. Die Biographie eines Jahres. S. 179-186
- [6] Theo Sommer, a.a.O. S. 189
- [7] Zitat von W.L. Lawrence
- [8] Rainer Werning: Hiroshima, Nagasaki und die vergessenen Koreaner
- [9] Spiegel-Online: Nagasaki ging wegen Treibstoffmangels unter (2) (22. April 2005)
- [10] Takeshi Ohkita: Akute medizinische Auswirkungen in Hiroshima und Nagasaki S. 85
- [11] Atomwaffen A-Z
- [12] Stern (Zeitschrift): Nagasaki gedenkt seiner Opfer
- [13] Übersicht der Nagasaki University School of Medicine
- [14] Laura Hein, Mark Selden: Commemoration and Silence: Fifty years of Remembering the Bomb in America and Japan. Living with the Bomb. M.E. Sharpe, New York 1997
- [15] Bruce Cumings: Parallax Visions. Duke 1999, S. 54
- [16] Gar Alperovitz: Atomic Diplomacy. 1965
- [17] Samuel Walker: Prompt and Utter Destruction: President Truman and the Use of Atomic Bombs Against Japan. University of North Carolina Press, 2005 (revised edition)
- [18] <http://www.doug-long.com/quotes.htm>
- [19] Joshua /Hill: "Remembering the Atomic Bomb"
<http://www.nd.edu/~frswrite/mcpartlin/1998/Hill.shtml>
- [20] Bruce Cumings: Parallax Visions, Duke 1999, p. 54
- [21] Bernstein, Barton, J. "Understanding the Atomic Bomb and Japanese Surrender: Missed Opportunities, Little- Known Near Disasters, and Modern Memory," Hiroshima in History and Memory. New York: University of Cambridge Press, 1996.
- [22] Tsuyoshi Hasegawa, Racing the Enemy: Stalin, Truman, and the Surrender of Japan (Cambridge, Harvard University Press, 2005)
- [23] Barton J. Bernstein: "Understanding the Atomic bomb and the Japanese Surrender: Missed Opportunities, Little-Known Near Disasters, and Modern Memory", 'Diplomatic History' 1995
- [24] Joshua /Hill: "Remembering the Atomic Bomb"
<http://www.nd.edu/~frswrite/mcpartlin/1998/Hill.shtml>
- [25] Walker, Samuel J.: History, Collective Memory, and the decision to use the Bomb, Diplomatic History 1995.
- [26] http://kriegsende.ard.de/pages_std_lib/0,3275,OID1642550,00.html

- [27] John W. Dower: *The Bombed - Hiroshima and Nagasaki in Japanese Memory*, Diplomatic History 1995.
- [28] Kölner Stadt-Anzeiger: *Hiroshima: Zehntausende gedenken der Opfer*, 6. August 2006

weitere Literatur:

Opfer- und Zeitzeugenberichte

- Günther Anders: *Der Mann auf der Brücke: Tagebuch aus Hiroshima und Nagasaki*. München 1959, Verlag C. J. L. Beck, ISBN 3-4060-2403-3;
- Helmut Erlinghagen: *Hiroshima und wir. Augenzeugenberichte und Perspektiven*. Fischer TB., Frankfurt am Main 1984, ISBN 3596242363;
- Gerd Greune (Hrsg.): *Hiroshima und Nagasaki: Bilder, Texte, Dokumente*. Köln, 1982
- Michihiko Hachiya: *Hiroshima Diary*. University of North Carolina, 1955, ISBN 0807845477 (Tagebuch eines Arztes, der während der Bombardierungen in der Stadt war, über die Monate danach);
- John Hersey: *Hiroshima: 6. August 1945, 8 Uhr 15*. Mit einem Vorwort von Robert Jungk. Hamburg, 2005 (Bericht eines amerikanischen Journalisten kurz nach Beginn der Besetzung mit Interviews von Überlebenden);
- Ibuse Masuji: *Schwarzer Regen*. Frankfurt am Main, 1985;
- Keiji Nakazawa: *Barfuß durch Hiroshima*. Hamburg, 2004 (International ausgezeichnete Manga-Serie eines Augenzeugen);
- Toyofumi Ogura: *Letters from the End of the World: A Firsthand Account of the Bombing of Hiroshima*. Kodansha, Japan, 1948, ISBN 4770027761;
- Kyoko Selden u. a.: *The Atomic Bomb: Voices from Hiroshima and Nagasaki. Japan in the Modern World*. ISBN 087332773X;
- Charles Sweeney u. a.: *War's End: An Eyewitness Account of America's Last Atomic Mission*. ISBN 0380973499
- Vorgeschichte
- Nagai Takashi: *Die Glocken von Nagasaki: Geschichte der Atombombe*. München, 1955
- Robert Jungk: *Heller als tausend Sonnen: das Schicksal der Atomforscher*. München, 1994
- Richard Rhodes: *The Making of the Atomic Bomb*. New York, 1986
- William Craig: *The Fall of Japan*. New York, 1967
- Stephen Walker: *Shockwave: Countdown to Hiroshima*. New York, 2005, ISBN 0060742844
- Gordon Thomas, Max Morgan Witts: *Enola Gay*. New York, 1977
- William L. Laurence, Werner von Grünau: *Die Geschichte der Atombombe*. List Verlag, 1952
- Historischer Kontext
- Florian Coulmas: *Hiroshima. Geschichte und Nachgeschichte*. Beck, 2005, ISBN 3406527973
- Michael J. Hogan: *Hiroshima in History and Memory*
- Fletcher Knebel, Charles W. Bailey: *No High Ground*. Harper and Row, New York 1960
- Pacific War Research Society: *„Japan's Longest Day“*, the internal Japanese account of the surrender and how it was almost thwarted by fanatic soldiers who attempted a coup against the Emperor.
- J. Samuel Walker: *Prompt and Utter Destruction: President Truman and the Use of Atomic Bombs Against Japan*.

- Stanley Weintraub: *The Last, Great Victory: The End of World War II*, July/August 1945. Truman Talley Books/Dutton, New York 1995
- Richard B. Frank: *Downfall: The End of the Imperial Japanese Empire*. Penguin, 2001, ISBN 0141001461

Hintergründe

- Gar Alperovitz: *The Decision to Use the Atomic Bomb*. Vintage Books, New York 1995, deutsch: *Hiroshima: die Entscheidung für den Abwurf der Bombe*. Hamburger Edition, Hamburg 1995, ISBN 3930908212
- Thomas B. Allen, Norman Polmar: *Code-Name Downfall: The Secret Plan to invade Japan - and why Truman dropped the Bomb*. Simon & Schuster, July 1, New York 1995, ISBN 0684804069
- Barton J. Bernstein (Hrsg.): *The Atomic Bomb: The Critical Issues*. Little, Brown, Boston 1976
- Richard B. Frank: *Why Truman Dropped the Bomb: Sixty years later, we have the secret intercepts that shaped his decision*. *The Weekly Standard*, 8. August 2005, p20
- Paul Fussell: *Thank God for the Atom Bomb* Ballantine, Reprint 1990), ISBN 0345361350
- Robert Jay Lifton, Greg Mitchell: *Hiroshima in America: A Half Century of Denial*. Quill, 1996, ISBN 0380727641
- Robert James Maddox: *Weapons for Victory: The Hiroshima Decision*. University of Missouri Press, 2004
- Philip Nobile (Hrsg.): *Judgement at the Smithsonian* Marlowe and Company, New York 1995, ISBN 1569248419 (Kontroverse um die 1995 in der Smithsonian Institution geplante Ausstellung, die schließlich abgesagt wurde)
- Ronald Takaki: *Hiroshima: Why America Dropped the Atomic Bomb*. Little Brown, ISBN 0-316-83124-7, LoC D769.2.T35 1995
- Shigetoshi Wakaki: *Hiroshima: die infame Maximierung eines Massenmordes; der erste Bericht eines Experten und Augenzeugen*. Grabert, 1992

Folgen

- Gaynor Sekimori: *Hibakusha: Survivors of Hiroshima and Nagasaki*. Kosei Publishing Company, Japan 1986, ISBN 433301204X
- Angelika Jaeger (Übers.): *Leben nach der Atombombe: Hiroshima und Nagasaki 1945-1985*. Komitee zur Dokumentation der Schäden der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki, Frankfurt am Main, 1988
- Paul Takashi Nagai: *Wir waren dabei in Nagasaki*. Frankfurt am Main, 1951
- Takeshi Ohkita: *Akute medizinische Auswirkungen in Hiroshima und Nagasaki*. In: Eric und Susanna Chivian u.a. (Hrsg.): *Last aid. Die medizinischen Auswirkungen eines Atomkrieges*. Heidelberg 1985
- Peter Bürger: *Hiroshima, der Krieg und die Christen*. Asphalt Verlag, 2005, ISBN 3980740072
- Robert P. Newman: *Truman and the Hiroshima Cult*. Michigan State University Press, 1995 (kritische Analyse der Nachkriegsopposition gegen die Bombe)

Anhang C: Das Atomkraftwerk Zwentendorf: Bau, Proteste, Volksabstimmung:

Die Errichtung des Atomkraftwerks Zwentendorf stellt wohl einen der größten volkswirtschaftlichen Verluste in der modernen Geschichte der Republik Österreich dar. Die Hintergründe dieses Fallbeispiels sind auch repräsentativ für die oftmals angewandte Vorgehensweise beim Zustandekommen von Atomkraftwerksprojekten. Die Agenten der Atomkraftindustrie wenden sich bei ihrer Arbeit stets an die höchste politische Ebene, da Meinungsumfragen in quasi allen Ländern die Ablehnung dieser Technologie durch die Bürger deutlich machen. Der Weg über die Öffentlichkeit ist für die Diffusionsagenten somit nicht möglich, vor allem da die Geschichte dieser Technologie mittlerweile das Gefahrenpotenzial in der Praxis deutlich demonstriert hat. Dass Entscheidungen von Politikern, welche gegen die Volksmeinung getroffen werden, ein dramatisches Nachspiel haben können, wird am Beispiel des österreichischen Kernkraftwerks Zwentendorf demonstriert.

Chronologie von Zwentendorf

- 1956 Gründung der Österreichischen Studiengesellschaft für Kernenergie. Sie befasst sich mit Fragen zu zukünftigen Kernkraftwerken in Österreich.
- 1958 Mai: Die Verbundgesellschaft beauftragt Fachleute mit der Standortsuche für ein Atomkraftwerk in Österreich.
- 1960 25. September: Der erste Forschungsreaktor Österreichs wird in Seibersdorf in Betrieb genommen.
- 1963 Gründung der "Arbeitsgemeinschaft Kernkraftwerke".
- 1967 Beschluss der österreichischen Energiewirtschaft, ein Kernkraftwerk in Österreich zu errichten.
- 1968 1. März: Verbund und Elektrizitätsgesellschaften der Bundesländer gründen die Kernkraftwerksplanungsges.m.b.H (KKWP).
November: Der Standort Zwentendorf wird für ein 600-Megawatt-Kernkraftwerk bestimmt.
- 1969 Mai: Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht den Bau eines Atomkraftwerks vor.
11. August: Der Nationalrat verabschiedet das Strahlenschutzgesetz.
28. November: Der Hauptausschuss des Nationalrates verabschiedet einstimmig die Zustimmung zur Beteiligung der Verbundgesellschaft an der Kernkraftwerksbaubetriebsgesellschaft.
- 1970 10. Februar: Gründung der Gemeinschaftskernkraftwerk-Tullnerfeld-Gesellschaft m.b.H. (GKT). Daran beteiligen sich der Verbund (50%) und die Landesgesellschaften von Tirol (13,34%), Niederösterreich (10,83%), Steiermark (10%), Oberösterreich (8,33%), Kärnten (3,33%), Salzburg (2,5%) und Vorarlberg (1,67%). Nicht beteiligt sind Wien und Burgenland.
- 1971 22. März: Die Entscheidung für den Baubeginn des AKW Zwentendorf wird durch die Bundesregierung getroffen. Der kommerzielle Betriebsbeginn ist für August 1976 vorgesehen.
30. April: Baubeginn des AKW Zwentendorf.
- 1972 12. Jänner: Das Parlament verabschiedet eine Strahlenschutzverordnung.
April 1972-Jänner 1978: Das Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz erlässt 53 Teilbewilligungen und über 1.000 Bedingungen und Auflagen zu

- Bauvorschriften und Schutzvorkehrungen für Bevölkerung und Umwelt im Zusammenhang mit dem Bau des AKW.
- 1975 Die "Initiative Österreichischer Atomkraftwerksgegner" (IÖAG) wird als Dachverband der Anti-Atomkraft-Gruppen gegründet.
- 1976 Der Energieplan der Regierung sieht den Bau von drei Atomkraftwerken bis 1990 vor.
14. Oktober: Beginn der Informationskampagne der Bundesregierung zur Beantwortung von fünf zentralen Fragestellungen zur Nutzung der Atomenergie.
- 1977 24. März: AtomenergiegegnerInnen demonstrieren in Wien, Graz, Salzburg, Innsbruck und Klagenfurt.
Mai/Juni: In vier österreichischen Städten finden Symposien zum Thema "Atomenergie" statt.
6. Juni: Regierungsklausur auf Schloss Hernstein: Nach Vorträgen von Fachleuten spricht sich die Regierung für die Nutzung der Atomenergie und die Inbetriebnahme von Zwentendorf aus, sollte die Frage der Entsorgung der abgebrannten Brennstäbe gelöst werden können.
Juli: ÖVP-Vorsitzender Taus kündigt das Ende der Bereitschaft zu einer Einigung mit der SPÖ in der Frage der Atomenergie bzw. Zwentendorfs an.
Dezember: Der Regierungsbericht über die Atomenergie wird dem Ministerrat und anschließend dem Nationalrat vorgelegt.
23. Dezember: Bewilligung des Gesundheitsministeriums zur Lagerung von Brennelementen in Zwentendorf.
- 1978 Jänner: Die Sozialistische Jugend schlägt eine Volksabstimmung zu Zwentendorf vor, Kreisky lehnt ab.
10. Jänner: Die für 10. Jänner vorgesehene und geheim gehaltene Anlieferung von Brennelementen für das AKW Zwentendorf aus Hanau (D) platzt, da die IÖAG (Initiative österreichischer Atomkraftwerksgegner) den Liefertermin erfahren hat und Protestaktionen befürchtet werden.
18. Jänner: Anlieferung der Brennelemente per Flugzeug und Hubschrauber.
Ende Jänner: Die FPÖ lehnt Atomenergie und den Atombericht der Bundesregierung grundsätzlich ab.
Anfang Februar: Die ÖVP begrüßt grundsätzlich die Nutzung der Atomenergie, lehnt jedoch Zwentendorf und den Atombericht auf Grund der mangelnden Sicherheitsbestimmungen und der Lückenhaftigkeit des Berichts ab.
Mitte Februar: Ein "Atom-Unterausschuss" soll die Mängel des Atomberichts beheben. ExpertInnenhearings und Stellungnahmen von BefürworterInnen und GegnerInnen sind geplant. Der Ausschuss kann keine Einigung über den Atombericht erzielen. FPÖ und dann auch ÖVP verweigern ihr "Ja" Ende Mai.
22. Juni: Der SPÖ-Parteivorstand beschließt, dass die Frage der Nutzung der Kernenergie einer Volksabstimmung unterworfen werden soll. Er befürchtet, im Parlament keine Zustimmung zu erhalten.
28. Juni: Atomenergiebericht der Regierung wird im Parlament mit den Stimmen der SPÖ angenommen, ebenso der Entwurf des Gesetzes über die friedliche Nutzung der Atomenergie. Der Gesamtentwurf zur Volksabstimmung wird einstimmig angenommen.
6. Juli: Ablehnung des Gesetzentwurfs durch den Ministerrat.
7. Juli: Beharrungsbeschluss des Parlaments, hebt Ministerratsbeschluss auf.
25. August: Gründung des "Komitees für Zwentendorf", Mitglieder sind u.a. der Generaldirektor der Österreichischen Nationalbank, der stellvertretende Generalsekretär der Industriellenvereinigung.
30. August: Gründung der Arbeitsgemeinschaft "Nein zu Zwentendorf"

13. September: Bundespräsident Kirchschräger ordnet eine Volksabstimmung über den Gesetzesbeschluss an.
Ab Oktober: Werbekampagnen der BefürworterInnen und der GegnerInnen des AKW Zwentendorf, Wahlempfehlungen der Parteien, Interessenverbände und von Personen des öffentlichen Lebens.
5. November: Volksabstimmung über die Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Zwentendorf. 1,576.839 (= 49,33%) stimmen mit Ja, 1,606.308 (= 50,47%) stimmen mit Nein.
9. November: Generalversammlung der GKT-Gesellschafter (Gemeinschaftskernkraftwerksgesellschafter) beschließt Einstellung der Arbeiten zur Fertigstellung des Kernkraftwerks.
13. Dezember: Gesetz über Verbot des Baus und der Inbetriebnahme von bereits bestehenden Atomkraftwerken in Österreich wird im Parlament verabschiedet.
- 1985 8. Februar: Bundeskanzler Fred Sinowatz kündigt einen SPÖ-Antrag auf Durchführung einer Volksabstimmung über die friedliche Nutzung der Kernenergie an. Voraussetzung dafür ist die Aufhebung des Atomsperrgesetzes
20. Februar: Bundeskanzler Sinowatz übermittelt den Klubobmännern der drei Parlamentsparteien das Angebot der Sowjetunion, ausgebrannte Kernstäbe zu übernehmen.
21. Februar: Bundeskanzler Sinowatz legt den Sicherheitsbericht der Reaktorsicherheitskommission vor, nach dem Zwentendorf den internationalen Sicherheitsstandards für moderne Kraftwerke entspricht.
6. März: Die SPÖ bringt einen Initiativantrag zu einem Bundesverfassungsgesetz ein, der die Durchführung einer Volksabstimmung über die friedliche Nutzung der Kernenergie in Österreich beinhaltet; spricht sich eine Mehrheit bei der Volksabstimmung für die Kernenergie aus, tritt automatisch das Atomsperrgesetz außer Kraft.
15. März: Der Initiativantrag der SPÖ für eine Volksabstimmung über die Inbetriebnahme Zwentendorfs und damit für die Aufhebung des Atomsperrgesetzes findet im zuständigen parlamentarischen Ausschuss nicht die erforderliche Mehrheit (10:10 Stimmen)
21. März: Der Initiativantrag der SPÖ zu einer Volksabstimmung über die Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Zwentendorf findet im Nationalrat nicht die erforderliche Mehrheit (91 Ja-Stimmen : 90 Nein-Stimmen), bei der Abstimmung ist der Klubzwang aufgehoben.
18. März: Bundeskanzler Sinowatz kündigt an, keinen Antrag auf Aufhebung des Atomsperrgesetzes einzubringen
27. März: Die Gesellschafter des Gemeinschaftskraftwerkes Tullnerfeld (GKT) beschließen eine "stille Liquidation" des Kraftwerks.

Fazit:

Vom beschlossenen Baubeginn des Atomkraftwerks Zwentendorf im Jahr 1971 bis zum Beschluss der Liquidation des nicht fertig gestellten Kraftwerks im Jahr 1985 sind 14 Jahre vergangen. Das Projekt Zwentendorf hat in dieser Zeit (zum Großteil dem österreichischen Steuerzahler) insgesamt 14 Milliarden Schilling gekostet, wobei alleine 600 Millionen davon für die Konservierung eingesetzt wurden. Die geplante Inbetriebnahme des Kraftwerks im August 1976 (also nach einer geplanten Bauzeit von 5 Jahren) wäre auch ohne die massiven politischen Probleme aus heutiger Sicht unrealistisch gewesen.

Quellen des Anhang C:

- Forum Politische Bildung (Hg.): Wendepunkte und Kontinuitäten. Zäsuren der demokratischen Entwicklung in der österreichischen Geschichte (Sonderband der Informationen zur Politischen Bildung). Studien-Verlag, Innsbruck 1998, S. 158-159;
- Pelinka, Anton: Die Kleine Koalition SPÖ-FPÖ 1983-1986. Böhlau Verlag, Wien/Köln/Graz 1993;
- Der Österreich-Bericht 1985. Presseübersicht. Zusammengestellt vom Bundespressedienst des Bundeskanzleramtes; <http://www.aai.at>.)

Anhang D: Expertenworkshops

Agenda des Intensiv-Workshops „Atomkraft und Grünbuch 1“ am 11.10.2006 in Wien:

- **Ort:** Gusshausstr. 25-29, 1040 Wien, altes Elektrotechnisches Institutsgebäude, 3. Stock, Besprechungszimmer des Institutes für elektrische Maschinen;
- **Zeit:** 10:00 – 14:00
- **Motivation:** Die steigenden Preise fossiler Energieträger, Debatten um den Klimawandel und nicht zuletzt die Diskussion um die zukünftige Versorgungssicherheit haben die Kernkraftnutzung in Europa wieder zum Thema gemacht.
- **Wesentliche Fragen:** Wir sehen uns in diesem Zusammenhang mit folgenden wesentlichen Fragen konfrontiert:
 - Wie wirtschaftlich ist die Kernenergienutzung langfristig?
 - Wie kann die Endlagerung von radioaktiven Abfällen geregelt werden?
 - Wie ist die demokratiepolitische Relevanz einzuschätzen?
 - Welche Kostenrisiken werden von der EU abgedeckt?
 - Wie lange reichen die Uranreserven?
 - Kann die Kernenergienutzung so rasch ausgebaut werden, dass sie einen relevanten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leistet?
 - Sind die human capacities (Fachleute, Techniker) verfügbar?

Viele Teilaspekte dieser Fragen lassen sich unter der Frage:

- Ist die neue Generation von Kernkraftwerken anders?

subsumieren.

| Zeit | Inhalt | Vortragender |
|---------------|---|---|
| 10:00 – 10:30 | Einleitung | Reinhard Haas, Energy Economics Group (EEG), TU-Wien |
| 10:30 – 11:00 | Referat 1: Nuclear energy, an option for sustainable development? | Franco Romerio, Centre universitaire de l'énergie (CUEPE), Universität Genf |
| 11:00 – 11:30 | Referat 2: Renaissance der Atomenergie – Mythos und Wirklichkeit. | Mycle Schneider, unabhängiger Berater für Umwelt- u. Energiepolitik, Paris |
| 11:30 – 12:00 | Referat 3: Kernenergie und Risiko. | Wolfgang Kromp, Leiter des Institutes für Risikoforschung, Universität Wien |
| 12:00 – 13:00 | Diskussion | alle TeilnehmerInnen |
| 13:00 – 14:00 | Gemeinsames Mittagessen | |
| 14:00 | Ende | |

TeilnehmerInnenliste des Intensiv-Workshops „Atomkraft und Grünbuch“ am 11.10.2006 an der Technischen Universität in Wien

| TeilnehmerInnen | Organisation | Kontakt |
|------------------------------|--|--|
| Biermayr Peter | TU-Wien, Energy Economics Group, Gusshausstr. 25-29/373-2 A-1040 Wien | Tel.: 01-58801-37358 e-mail: biermayr@eeg.tuwien.ac.at |
| Fries Rene | BMVIT (ehemals) | e-mail: rene.fries@chello.at |
| Gratzer-Heilingsetzer Eva | Lebensministerium Abteilung V/6: Nuklearoordination Stubenring 1 A-1012 Wien | Tel.: 01-51522-4007 e-mail: eva.heilingsetzer@lebensministerium.at |
| Haas Reinhard | TU-Wien, Energy Economics Group, Gusshausstr. 25-29/373-2 A-1040 Wien | Tel.: 01-58801-37352 e-mail: haas@eeg.tuwien.ac.at |
| Holubetz Volker | Lebensministerium Abteilung V/6: Nuklearoordination Stubenring 1 A-1012 Wien | Tel.: 01-51522-4006 e-mail: volker.holubetz@lebensministerium.at |
| Hübner Michael | BMVIT, Abteilung III/I 3 - Energie- und Umwelttechnologien Renngasse 5 A-1010 Wien | Tel.: 01-53464-2922 e-mail: michael.huebner@bmvit.gv.at |
| Indinger Andreas | Österreichische Energieagentur Otto-Bauer-Gasse 6 A-1060 Wien | Tel.: 01-5861524-11 e-mail: andreas.indinger@energyagency.at |
| Kromp Wolfgang | Universität Wien Institut für Risikoforschung Türkenschanzstr. 17/8 A-1180 Wien | Tel.: 01-4277-53901 wolfgang.kromp@univie.ac.at |
| Meister Franz | Umweltbundesamt Stabsstelle Bereichsleitung Studien & Beratung I Spittelauer Lände 5 A-1090 Wien | Tel.: 01-31304-3740 e-mail: franz.meister@umweltbundesamt.at |
| Paula Michael | BMVIT, Abteilung III/I 3 - Energie- und Umwelttechnologien Renngasse 5 A-1010 Wien | Tel.: 01-53464-2914 e-mail: michael.paula@bmvit.gv.at |
| Romerio Franco | Université de Genève, CUEPE (Zentrum für universitäre Studien zu Energieproblemen) Battelle, bâtiment A 7, route de Drize CH-1227 Carouge - Genève | Tel.: 0041-(0)22-3790661 e-mail: Franco.Romerio@cuepe.unige.ch |
| Schneider Mycle | Mycle Schneider Consulting 45, Allee des deux Cedres F-91210 Draveil (Paris) | Tel.: 01 69 83 23 79 e-mail: mycle@wanadoo.fr |
| Schwarz Hans- Günther | BMVIT, Abteilung I/K 6 - EU- Angelegenheiten Abteilung II/ST 6 – Güterverkehr Radetzkystr. 2 A-1030 Wien | Tel.: 01-71100-5728 e-mail: hans-guenther.schwarz@bmvit.gv.at |
| Wenisch Antonia | Österreichisches Ökologieinstitut Seidengasse 13, A-1070 Wien | Tel.: 01-5236105-11 e-mail: wenisch@ecology.at |
| Zillner Theodor | BMVIT, Abteilung III/I 3 - Energie- und Umwelttechnologien Renngasse 5 A-1010 Wien | Tel.: 01-53464-2925 e-mail: theodor.zillner@bmvit.gv.at |

Agenda des Intensiv-Workshops „Atomkraft und Grünbuch 2“

am 23.01.2007 in Wien:

- **Ort:** Gusshausstr. 25-29, 1040 Wien, altes Elektrotechnisches Institutsgebäude, 4. Stock, Raum CF 0426;
- **Zeit:** 9:00 – 13:00
- **Motivation:** Die Energiestrategie der EU-Kommission zeigt, dass die Kommission einem weiteren Ausbau der Atomkraftnutzung in der EU aufgeschlossen gegenüber steht und einen solchen sogar fördern möchte. Die zentralen Argumente hierfür sind die Einsparung von Treibhausgasemissionen und die Verbesserung der Versorgungssicherheit. Eine besondere Chance dieses Workshops besteht in der Diskussion mit Hans-Holger Rogner vom Department of Nuclear Energy, International Atomic Energy Agency.
- **Wesentliche Fragen:** Wir wollen im Zuge des Workshops folgende Fragen ansprechen:
 1. Wie wirtschaftlich ist die Kernenergienutzung langfristig?
 2. Wie kann die Endlagerung von radioaktiven Abfällen geregelt werden?
 3. Wie ist die demokratiepolitische Relevanz einzuschätzen?
 4. Welche Kostenrisiken werden von der EU abgedeckt?
 5. Wie lange reichen die Uranreserven?
 6. Kann die Kernenergienutzung so rasch ausgebaut werden, dass sie einen relevanten Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen leistet?
 7. Sind die human capacities (Fachleute, Techniker) verfügbar?
 8. Ist die neue Generation von Kernkraftwerken anders?
 9. Kann heute von einer Renaissance der Kernkraft gesprochen werden?
- **Ziel der Veranstaltung:** Noch nicht berücksichtigte Aspekte sollen gefunden und vorhandene Argumente untermauert werden.

| Zeit | Inhalt | Personen |
|------------------|--|---|
| 09:00 – 09:30 | Begrüßung, Vorstellung, Einleitung; | Reinhard Haas, Biermayr Peter Energy Economics Group (EEG), TU-Wien |
| 09:30 – 11:00 | Statement von Hans-Holger Rogner zu unseren Themenkreisen und 1. Diskussionsblock | Hans-Holger Rogner, alle TeilnehmerInnen |
| 11:00 – 11:15 | Pause | |
| 11:15 – 12:45 | 2. Diskussionsblock | Alle TeilnehmerInnen |
| 13:00 | Einladung zu einem gemeinsamen Mittagessen | |