

Technische und wirtschaftliche Bedeutung von Kern- und Fusionskraftwerken

Seminararbeit

Vorgelegt am Industrieseminar der Universität Mannheim

- Professor Dr. Peter Milling -

Von

**Daniel Stutz
aus Durbach**

24.10.2005

Inhaltsverzeichnis

1	Energiefreisetzung durch Kernreaktionen.....	1
2	Stromerzeugung mittels Induzierter Kernspaltung	2
2.1	Funktionsweise von Leichtwasserreaktoren	2
2.2	Schematischer Aufbau von Hochtemperaturreaktoren	4
2.3	Technische Aspekte des Schnellen Brütters.....	4
3	Theorie und Praxis der Kernfusion	5
4	Wirtschaftliche Bedeutung von Kern- und Fusionskraftwerken.....	7
4.1	Stromentstehungskosten von Kernkraftwerken im Vergleich	7
4.2	Zu erwartende Kosten bei Fusionskraftwerken.....	9
4.3	Subventionen und externe Effekte der Stromerzeugung.....	9
4.4	Die Folgen des Kernenergie-Ausstieges in Deutschland	10
4.5	Alternative Energien im Vergleich	11
	Literaturverzeichnis.....	13

1 Energiefreisetzung durch Kernreaktionen

Mit dem Verständnis der Kernphysik zu Beginn des vorigen Jahrhunderts wurden die Grundlagen für die heutigen Nuklearanlagen gelegt. Eine maßgebliche Größe ist hierbei die starke Wechselwirkung, auch Kernkraft genannt, welche für den Zusammenhalt der Quarks und Nukleonen im Atomkern verantwortlich ist. Sie ist die stärkste der vier Grundkräfte im Universum, und kann zur Energiegewinnung genutzt werden, die dabei freiwerdende Energie wird als Kernenergie bezeichnet. Ursächlich für diese Energie ist der Massedefekt, welcher aussagt, dass die Masse eines Atoms stets kleiner ist als die Masse der in ihm enthaltenen Nukleonen. Dies lässt sich mit der Formel $E=mc^2$ erklären, wonach die fehlende Masse in die Kernbindungsenergie eingeht. Je höher der Massedefekt, desto höher auch die Bindungsenergie und damit die Stabilität eines Atoms. Wie die Abbildung 1 zeigt, liegt das Maximum der Bindungsenergie bei etwa 60 Kernbausteinen. Hierdurch ergeben sich zwei Möglichkeiten aus Kernkräften Energie zu gewinnen. Zum einen lassen sich leichtere Elemente wie Wasserstoff fusionieren um Energie zu gewinnen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, sehr schwere Atomkerne, z.B. Uran 235, in mehrere kleinere zu spalten, wobei jeder gespaltene Kern eine Energie von 210 Megaelektronenvolt (MeV) liefert.¹

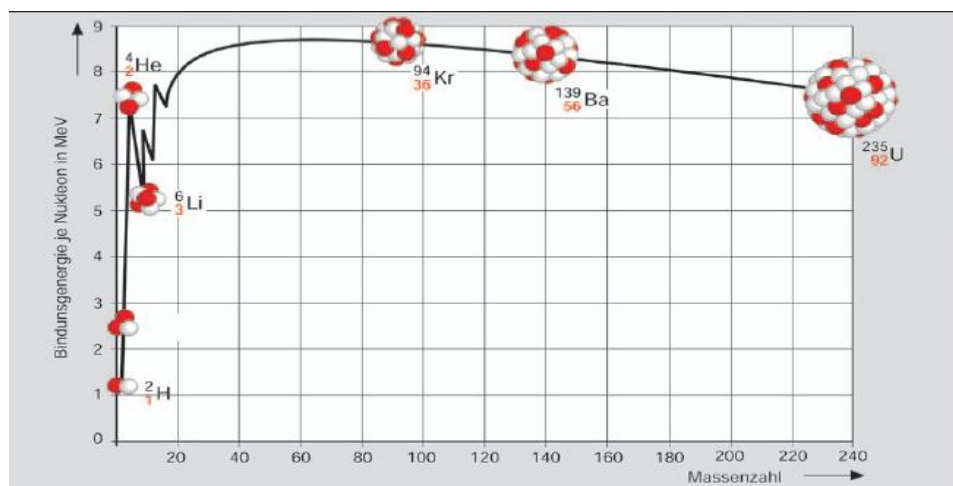


Abbildung 1: Bindungsenergie der Atome ²

¹ Vgl. Volkmer, Martin: Basiswissen zum Thema Kernenergie, Berlin 2004, S.9-12.

² Vgl. Volkmer, Martin: Basiswissen zum Thema Kernenergie, S. 12.

2 Stromerzeugung mittels Induzierter Kernspaltung

Die induzierte Kernspaltung wurde 1938 durch Otto Hahn und Fritz Straßmann erstmals experimentell durchgeführt, indem sie Uranatome mit Neutronen beschossen. Darüber hinaus gibt es noch die Möglichkeit einer spontanen Spaltung infolge des Tunneleffektes, der hier aber nicht betrachtet wird. Im Rahmen des Manhattan-Projektes wurde 1942 erstmals ein Nuklearreaktor kritisch, d.h. es fand eine selbsterhaltende Kettenreaktion von Kernspaltungen statt. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden mehrere Reaktortypen entwickelt, um den stetig steigenden Energiebedarf zu decken.³

Die vier in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Typen arbeiten nach dem gleichen, physikalischen Prinzip. In einem Druckbehälter läuft eine kontrollierte Kettenreaktion von Atomkernspaltungen ab, bei der pro Kernspaltung statistisch 2,3 neue Neutronen frei werden, von denen eines benötigt wird, um die Kettenreaktion fortzuführen. Die übrigen werden durch nicht spaltbares Uran 238 eingefangen. Allerdings haben diese Neutronen eine hohe Energie, während Kernspaltungen am besten durch langsame, thermische Neutronen durchgeführt werden. Daher müssen diese Neutronen zunächst von einem Moderator abgebremst werden, bevor sie weitere Kerne spalten können. Die durch die Kernspaltung freiwerdende Bindungsenergie in Form von Wärme wird von einem Kühlmittel abgeführt und später in Dampf verwandelt, welcher, wie in einem konventionellen Wärmekraftwerk, eine Turbine und darüber einen Generator antreibt. Im Unterschied zu einem konventionellen Wärmekraftwerk entsteht bei der Kernspaltung aber kein CO₂.⁴

2.1 Funktionsweise von Leichtwasserreaktoren

Von den weltweit 437 Kernreaktoren sind 365 Leichtwasserreaktoren, die als Kühlmittel und Moderator normales Wasser H₂O benutzen.⁵ Üblicherweise wird Uran 235 als Kernbrennstoff verwendet, welches vorher auf circa drei Prozent angereichert wurde, da 99,3 Prozent des in der Natur vorkommenden Urans auf das nicht spaltbare Isotop Uran 238 entfallen. Zwei Hauptbaureihen haben sich bei den Leichtwasserreaktoren durchgesetzt:

³ Vgl. Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, Düsseldorf/Wien/New York 1990, S. 44-46.

⁴ Vgl. Kuhn, Wilfried: Physik Band II, Braunschweig 1996, S. 494-496.

⁵ Vgl. o.V.: International nuclear power plants, <http://www.radwaste.org/power.htm>, 20.10.2005.

Ein Siedewasserreaktor, wie in Abbildung 2, arbeitet dabei nach dem Prinzip eines Tauchsieders. Das durch die Brennstäbe fließende Wasser (1) erhitzt sich und verdampft schließlich bei einem Druck von circa 70 bar und einer Temperatur von 290°C. Der Dampf wird anschließend auf eine Turbine (2) geleitet, die einen Generator betreibt (3) und über einen Kondensator (5) wieder zurück in den Reaktor geführt (6).

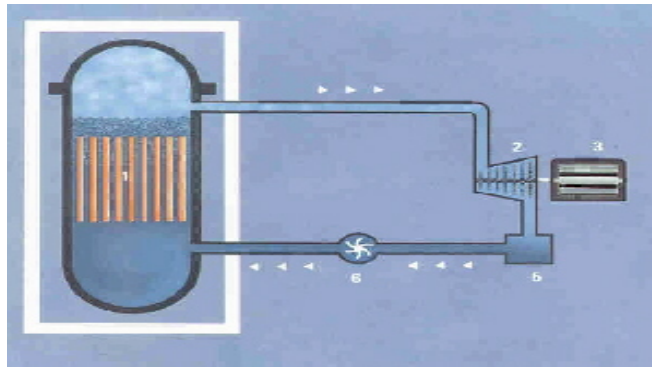


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Siedewasserreaktors

Demgegenüber ist das Kühlwasser in einem Druckwasserreaktor, wie in Abbildung 3 dargestellt, immer flüssig, entsprechend einem höheren Druck im Reaktor. Die Temperatur erreicht über 320°C, der Dampf wird über einen Wärmetauscher (4) erzeugt und treibt schließlich die Turbine an.

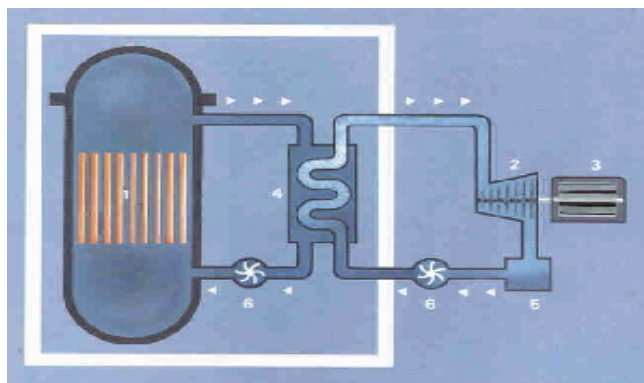


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Druckwasserreaktor

Obwohl beide Reaktortypen einen ähnlichen Wirkungsgrad von 33 bis 36 Prozent aufweisen, werden Druckwasserreaktoren in der Praxis bevorzugt. Denn trotz ihrer größeren Komplexität erreichen sie eine höhere Netzverfügbarkeit, da der Turbinenkreislauf nicht mit Kernwasser kontaminiert wird und dadurch Reparaturen

schneller durchgeführt werden können.⁶ Die größten deutschen Druckwasserreaktoren von Typ Konvoi, z.B. Isar II, erreichen eine Verfügbarkeit von über 95 Prozent.⁷

2.2 Schematischer Aufbau von Hochtemperaturreaktoren

Ein weiterer Reaktortyp ist der Hochtemperaturreaktor. Als Kühlmittel dient hierbei ein Edelgas, zumeist Helium, das auch bei hohen Temperaturen den Kernbrennstoff nicht angreift. Dadurch können Temperaturen von über 1000°C erreicht werden, entsprechend hoch ist der Wirkungsgrad und auch besondere Anwendungen wie die Kohlevergasung oder thermochemische Reaktionen zur Wasserstoffgewinnung wären denkbar. In dem deutschen Prototypreaktor THTR-300 wurde Thorium 232 als Brutstoff eingesetzt, der sich durch Neutroneneinfänge in Thorium 233 umwandelt und anschließend durch zwei β -Zerfälle in den Spaltstoff Uran 233 zerfällt. Da Thorium in der Natur fünfmal häufiger vorkommt wie Uran ist dieser Brennstoff auch wirtschaftlich interessant.⁸ Neue Hochtemperaturreaktoren, wie der Pebble Bed Modular Reactor, sind inhärent sicher, d.h. selbst bei einem vollständigen Ausfall der Kühlung kann es nicht zur Kernschmelze kommen, allerdings müssen sich diese Konzepte in der Praxis erst noch bewähren.⁹

2.3 Technische Aspekte des Schnellen Brütters

Eine weitere Möglichkeit, die begrenzten Uranvorräte der Erde zu strecken, ist der Einsatz von Schnellen Brütern. Pro Kernspaltung werden zwei bis drei Neutronen frei, von denen aber nur eines benötigt wird, um die Kettenreaktion fortzuführen.¹⁰ In einem Leichtwasserreaktor müssen daher die überschüssigen Neutronen durch Uran 238 eingefangen werden. Allerdings wird Uran 238 durch Neutroneneinfang in Uran 239 umgewandelt, das über den Zwischenschritt Neptunium 239 in Plutonium 239 zerfällt. Plutonium 239 ist ebenso wie Uran 235 durch Neutronen spaltbar. Dieser Prozess läuft in allen Leichtwasserreaktoren in begrenztem Umfang ab, im Brutreaktor wird dieser jedoch dazu benutzt, um gezielt aus Uran 238 neues Spaltmaterial zu „erbrüten“. Da die Umwandlung am besten mit schnellen Neutronen funktioniert, scheidet eine Kühlung mit Wasser, welches die Neutronen

⁶ Vgl. Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 36-38.

⁷ Vgl. Wasgindt, Volker und Christopher Weßelmann: Kernenergie in Deutschland: Jahresbericht 2002, Berlin, 2002, S. 50.

⁸ Vgl. Jürgen Seidel: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 39-41.

⁹ Vgl. Kugeler, K. und H. Bonnenberg: Der Hochtemperaturreaktor, in: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S. 157-168.

¹⁰ Vgl. Jürgen Seidel: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 29.

bremst, aus. Deswegen sollte der deutsche Prototyp SNR, der aus politischen Gründen niemals kritisch wurde, mit flüssigem Natrium gekühlt werden sollte, was durch seinen kleineren Wirkungsquerschnitt die Neutronen nicht bremst, siehe Abbildung 4. Damit auch mit schnellen Neutronen genügend Kerne gespalten werden, muss der Brennstoff auf etwa 20 Prozent angereichert sein, was zu einer erhöhten Kerntemperatur führt und besondere Sicherheitsmaßnahmen erfordert.

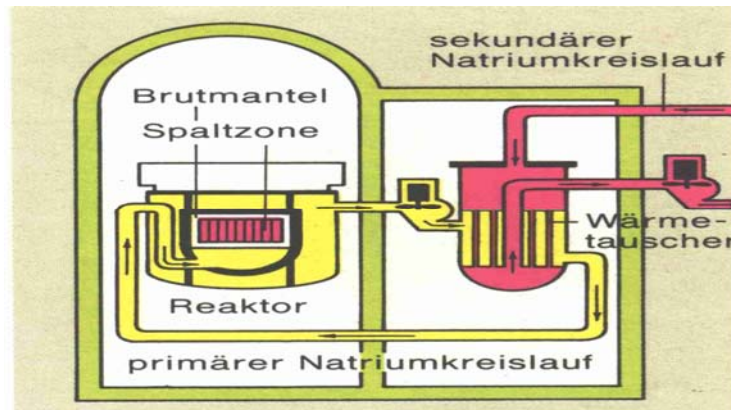


Abbildung 4: Funktionsweise eines schnellen Brütters¹¹

Da das Natrium radioaktiv wird, heftig mit Wasser reagiert und überdies noch metallische Verbindungen angreift, muss der Dampf über einen zweiten Natriumkreislauf, der radioaktiv unbelastet bleibt, erzeugt werden.¹²

In ausländischen Brutreaktoren konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass ein schneller Brüter im Idealfall mehr Brennstoff erzeugt als er selbst benötigt, das Uran wird 60 mal so effektiv genutzt wie in Leichtwasserreaktoren. Obwohl weltweit mehrere Schnelle Brüter, hauptsächlich zu Forschungszwecken, im Einsatz oder Bau sind, konnte sich dieser Reaktortyp aufgrund seiner hohen Komplexität und der hohen Aufbereitungskosten des erbrüteten Plutoniums wirtschaftlich noch nicht durchsetzen.¹³ Da das erbrütete Plutonium auch für Kernwaffen eingesetzt werden kann, bestehen Sicherheitsbedenken beim Betrieb von Schnellen Brütern in politisch instabilen Ländern.

3 Theorie und Praxis der Kernfusion

Die andere Möglichkeit, aus Kernreaktionen Energie zu gewinnen, ist die Fusion von leichten Atomkernen zu schwereren, wobei ebenfalls infolge des Massedefek-

¹¹ Vgl. Jürgen Seidel: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 43.

¹² Vgl. Jürgen Seidel: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 42-44.

¹³ Vgl. Huber, Veit: Der schnelle Brüter, <http://www.schneller-brueter.de/index2.htm>, 1.10.2005.

tes Energie frei wird. Während die Theorie der Kernfusion schon seit mehr als 60 Jahren bekannt ist und in der Praxis unkontrolliert, in Form von Wasserstoffbomben, seit mehr als 50 Jahren eingesetzt wird, ist die zivile Kernfusion noch Jahrzehnte von der Anwendbarkeit entfernt. Der Hauptgrund dafür ist, dass für eine stabile Fusion von Deuterium und Tritium, wie sie derzeit angestrebt wird, eine mittlere Temperatur von 100 Millionen Kelvin herrschen muss, damit die Teilchen eine genügend hohe kinetische Energie besitzen, um den Coulombwall zu überwinden und zu fusionieren.¹⁴ Da es kein Material gibt, das diese hohen Temperaturen aushält, ist es notwendig, das Brennstoffplasma mittels eines starken Magnetfeldes einzuschließen.¹⁵ Die hierfür notwendige Feldstärke liegt in der Größenordnung von vier bis 15 Tesla über einen Bereich von sechs Meter, was aufgrund der hierfür benötigten Stromstärke den Einsatz von supraleitenden Magneten erfordert.¹⁶ Derzeit wird in Frankreich ein neuer, internationaler Versuchsreaktor namens ITER gebaut, welcher ab 2016 in Betrieb gehen soll und eine Fusionsleistung von 500 Megawatt aufweist. ITER soll erstmals über einen längeren Zeitraum mehr Energie liefern, wie für die Aufheizung und Einschluss des Plasmas nötig ist. Die Forschung ist auf einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren ausgelegt, danach soll ein neuer Reaktor namens DEMO die wirtschaftliche Nutzung der Fusionsenergie zeigen.¹⁷

Der große Anreiz von Fusionsreaktoren ergibt sich daraus, dass die Ausgangselemente, Deuterium und Tritium, in großer Menge in der Natur vorkommen, bzw. relativ leicht aus anderen Elementen erbrütet werden können, sodass der Weltenergiebedarf auf Jahrtausende gedeckt werden kann. Darüber hinaus entstehen bei dem Betrieb eines Fusionsreaktors deutlich weniger und auch deutlich kurzlebige Spaltprodukte im Vergleich zu einem Kernkraftwerk. Da die Fusion nur bei extrem hohen Temperaturen oder Drücken abläuft, ist eine selbsterhaltende, unkontrollierte Kettenreaktion nicht möglich, wodurch Fusionsreaktoren inhärent sicher sind. Da sie darüber hinaus auch kein CO₂ emittieren sind sie auch unter ökologischen Gesichtspunkten interessant.¹⁸

¹⁴ Vgl. Vogel, Helmut: Gerthsen Physik, Berlin [u.a.] 1990, S. 681-683.

¹⁵ Vgl. Klingelhöfer, R. und W. Maurer: Plasmaphysikalische Grundlagen des Fusionsreaktors, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S. 7.

¹⁶ Vgl. Maurer, W.: Supraleitende Magnete für die Kernfusion, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S. 57-60.

¹⁷ Vgl. Spears, W.: Iter Overview, http://www.iter.org/pdfs/ITER_overview.pdf, 10.10.2005.

¹⁸ Vgl. Maurer, W.: Physikalische Grundlagen der Kernfusion, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S. 5-6.

4 Wirtschaftliche Bedeutung von Kern- und Fusionskraftwerken

Um die wirtschaftliche Bedeutung der Kern- und Fusionskraftwerke beurteilen zu können, müssen Aussagen über die Wirtschaftlichkeit nach dem Rationalitätsprinzip im Vergleich mit anderen Kraftwerksarten gemacht werden. Dabei müssen sowohl die betriebs- als auch die volkswirtschaftlichen Kosten jetzt und in der Zukunft betrachtet werden, jeweils im Vergleich mit den Alternativen.

4.1 Stromentstehungskosten von Kernkraftwerken im Vergleich

Ein Großteil der späteren Erzeugerkosten fällt bereits mit dem Kraftwerksbau an. Die Baukosten eines modernen Kernkraftwerkes von 1400 MW bis 1600 MW elektrischer Leistung betragen aktuell etwa 3 Milliarden Euro.¹⁹ Bei einem Kalkulationszinssatz von fünf Prozent ergeben sich somit Kapitalkosten von circa 150 Millionen Euro im ersten Betriebsjahr, den genauen zeitlichen Anfall der Kosten nicht berücksichtigt. Durch Abschreibungen über üblicherweise 20 Jahre wird die Zinslast schrittweise reduziert, sodass sich für die meisten deutschen Kernkraftwerke, die in der Mehrzahl länger als 20 Jahre am Netz sind, keine Kapitalkosten mehr ergeben. Pro Jahr werden etwa 30 Tonnen Uran verbraucht.²⁰ Der Weltmarktpreis für eine Kilogramm Natururan liegt derzeit bei etwa 30 Dollar je Kilo, für die nächsten Jahre wird ein stabiler Preis erwartet.²¹ Zusätzliche Kosten entstehen für die Anreicherung, Herstellung der Brennelemente und die Entsorgung der abgebrannten Brennstäbe, so dass der gesamte Brennstoffpreis für ein Kraftwerk der 1400 MW-Klasse etwa 40 Millionen Euro im Jahr beträgt.²² Ein weiterer Kostenblock stellen die Personalkosten dar. Pro Kraftwerksblock ist mit etwa 600 Mitarbeitern zu rechnen, während der jährlichen Revision steigt diese Zahl für den Zeitraum von zwei Wochen auf über 1000, was sich in geschätzten Personalkosten in Höhe von 60 Millionen Euro pro Jahr niederschlägt. Die Materialkosten für Wartung und Instandsetzung werden mit zwei Prozent der Investitionssumme pro Jahr angenommen, was ungefähr 60 Millionen Euro im Jahr entspricht.²³

¹⁹ Vgl. Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 17; vgl. auch: o.V.: Daten und Fakten, http://www.kernenergie.de/informationskreis/de/faq/daten_und_fakten.php?navid=74, 10.10.2005.

²⁰ Vgl. Kuhn, Wilfried: Physik Band II, S. 486.

²¹ Vgl. o.V.: Hoher Uran-Preis lockt spekulative Investoren an, <http://www.welt.de/data/2005/07/08/742830.html>, 15.10.2005.

²² Vgl. Hansen, U.: Kernenergie und Wirtschaftlichkeit, Köln, 1983, S. 51-60.

²³ Vgl. Hansen, U.: Kernenergie und Wirtschaftlichkeit, S. 45.

Durch ihren hohen Kapitaleinsatz und die vergleichsweise geringen Brennstoffkosten sind Kernkraftwerke als Grundlastkraftwerke im Einsatz und demzufolge Tag und Nacht in Betrieb. Idealerweise wird der Reaktor nur einmal im Jahr zur Revision für ein bis zwei Wochen heruntergefahren. Das Kraftwerk Isar II hat 2002 bei einer Betriebszeit von 8350 Stunden eine Strommenge von 12,2 Terawattstunden (TWh) erzeugt.²⁴ Hieraus errechnen sich dann Stromerzeugungskosten von maximal 2,5 Cent pro Kilowattstunde (kWh), was sich auch in der Praxis ungefähr bestätigt, siehe Abbildung 5. Sind die Kraftwerke nach 20 Jahren abgeschrieben, so liegen die Grenzkosten im Bereich von einem Cent pro kWh. Da die Kosten für Natururan nur ein Bruchteil des späteren Strompreises ausmachen, reagiert dieser auch auf extreme Preisanstiege des Urans kaum. Damit lassen sich zu wirtschaftlichen Preisen Uranmengen von drei Millionen Tonnen fördern, was den aktuellen Weltverbrauch, unter Einsatz von Leichtwasserreaktoren, für etwa 100 Jahre deckt.²⁵



Abbildung 5: Stromerzeugungskosten in Deutschland²⁶

Zum Vergleich wird das moderne Braunkohlekraftwerk Lippendorf bei Leipzig herangezogen, welches pro Jahr 13 TWh Energie erzeugt. Die Baukosten betragen im Jahr 2000 circa 2,3 Milliarden Euro, was Kapitalkosten i.H.v. 115 Millionen Euro im ersten Jahr verursacht. Die Personalkosten der insgesamt 415 Mitarbeitern und Auszubildenden werden auf 30 Millionen Euro pro Jahr geschätzt, die Instandhaltung und Wartungskosten werden ebenfalls mit zwei Prozent der Investitionssumme, also 46 Millionen Euro im Jahr geschätzt. Der Kohleverbrauch des Kraftwerkes lag 2003 bei 11,7 Millionen Tonnen, bei Förderkosten von 15 Euro pro Tonne ergeben sich somit Brennstoffkosten in Höhe von 175 Millionen Euro.²⁷ Hieraus

²⁴ Vgl. Wasgindt, Volker und Chrisopher Weßelmann: Jahresbericht 2002, S.50.

²⁵ Vgl. o.V., Daten und Fakten, 19.10.2005.

²⁶ Alt, P.: Versorgungssicherheit im Europäischen Verbundnetz, München 2004, S. 8.

²⁷ Vgl. o.V.: Braunkohlekraftwerk Lippendorf bei Leipzig, <http://www.heuersdorf.de/Lipp1.html>, 1.10.2005.

errechnen sich ebenso Kosten von maximal 2,5 ct/kWh im ersten Jahr, die ebenfalls mit der Realität übereinstimmen, siehe Abbildung 5, allerdings mit dem Unterschied, dass die variablen Kosten höher sind und nach dem Ende der Abschreibung der Erzeugerpreis im Vergleich mit einem Kernkraftwerk nicht so stark sinkt. Müssen für die CO₂ Emissionen zukünftig Zertifikate erworben werden, so würde sich Strom aus Braunkohle stark verteuern.

4.2 Zu erwartende Kosten bei Fusionskraftwerken

Für Fusionskraftwerke existieren derzeit noch keine verlässlichen Berechnungen des zu erwartenden Erzeugerpreises. Da viele Bauteile mit denen von Kernkraftwerken weitestgehend identisch sind, so z.B. der Gebäudekomplex und der Maschinenteil mit den Turbinen und Generatoren, ebenso die Sicherheitseinrichtungen, muss von ähnlich hohen Investitionskosten ausgegangen werden. Die Personalkosten wären in etwa gleich hoch anzusetzen, während die Brennstoffkosten noch etwas geringer sein dürften, da die Rohstoffe Deuterium und Tritium leichter beschafft werden können. Mit dem hohen Kapitaleinsatz und den vergleichsweise geringen variablen Kosten eignen sich Fusionsreaktoren ebenfalls besonders für die Grundlast, was einen möglichst gleichmäßigen Energieverbrauch voraussetzt. Da dies in Industrieländern aber nicht gegeben ist, stellen Fusionsreaktoren, werden sie in großer Zahl eingesetzt, besondere Ansprüche an das Netzmanagement und erfordern den Einsatz von Energiespeichern und Schnellstartreserven. Die hohen Anfangskosten erschweren zudem eine Liberalisierung des Erzeugermarktes, da derartig hohe Kosten nur von finanzstarken Unternehmen geleistet werden können.

4.3 Subventionen und externe Effekte der Stromerzeugung

In Deutschland wurde und wird jede Art der Energieerzeugung subventioniert. Allein die staatliche Förderung der Kernkraft in Deutschland hat in der Hochzeit von 1974 bis 1988 insgesamt circa 13 Milliarden Euro auf der Basis von 1990 gekostet.²⁸ Dazu kommen Vorteile durch steuerfreie Rückstellungen für den Rückbau der Kraftwerke in der Zukunft. Eine weitere indirekte Subvention ist die begrenzte Haftung der Betreiber bei einem nuklearen Unfall. Obwohl westliche Kernkraftwerke zusammen bereits über 10.000 Betriebsjahre ohne einen katastrophalen Unfall

²⁸ Vgl. Jürgen Seidel: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 130-132; vgl. auch: o.V.: Die Entwicklung der Subventionen in Deutschland seit Beginn der neunziger Jahre, http://www.bundesbank.de/download/volkswirtschaft/mba/2000/200012mba_subvent.pdf, 19.10.2005.

gearbeitet haben, besteht diese Möglichkeit nach wie vor. Würde eine Kernschmelze mit einem Bruch des Sicherheitsbehälters wie in Tschernobyl in einem deutschen Kernkraftwerk passieren, müsste mit volkswirtschaftlichen Folgekosten von bis zu 5,5 Billionen Euro gerechnet werden, Personenschäden noch nicht berücksichtigt.²⁹ Auch die noch nicht eindeutig geklärte Endlagerung der Atomabfälle, sowie Risiken beim Rückbau, stellen externe negative Effekte dar, deren Höhe aktuell noch nicht beziffert werden kann. Demgegenüber steht die massive Einsparung des Treibhausgases CO₂, welches entscheidend zur Erderwärmung beiträgt.

Die Förderung der Braunkohle selbst wird staatlich nicht subventioniert, da sie, anders als beispielsweise die Steinkohle, im Tagebau abgebaut wird. Die Kosten für die Umsiedlung von Einwohnern im Abbaubereich, sowie die Renaturierung von Tagebauten wird aber vom Staat unterstützt. Den größten, externen Effekt stellen jedoch die enormen CO₂- und Feinstaubemissionen dar. Die Kosten des Treibhauseffektes werden aktuell allein in Deutschland auf 3,5 bis 34,4 Milliarden Euro pro Jahr geschätzt³⁰

4.4 Die Folgen des Kernenergie-Ausstieges in Deutschland

Spätestens nach dem Reaktorunglück in Tschernobyl lehnt eine Mehrzahl der Deutschen die weitere friedliche Nutzung der Kernkraft ab.³¹ Seit dem novellierten Atomgesetz von 2001 ist der Ausstieg aus der Kernkraft im Gesetz verankert, bis 2021 soll das letzte deutsche Kernkraftwerk nach 32 Kalenderjahren Betriebszeit abgeschaltet werden.³² Die 17 deutschen Kernkraftwerke erzeugen, wie in Abbildung 6 zu sehen, etwa ein Drittel des gesamten Strombedarfs in Deutschland, das bedeutet, dass in den nächsten 16 Jahren etwa ein Drittel des gesamten Kraftwerkparkes ersetzt werden muss, zuzüglich Ersatzkraftwerken für veraltete Stein- und Braunkohlekraftwerke. Angesichts der langen Genehmigungs- und Bauzeiten muss daher eine Entscheidung zugunsten einer alternativen Energiequelle in den nächsten Jahren getroffen werden.

²⁹ Vgl. Ewers, Hans Jürgen und Klaus Rennings: Abschätzung der monetären Schäden durch einen sogenannten Super-Gau, in: Prognos AG (Hrsg.): Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung, Basel 1992, S. 11-15.

³⁰ Vgl. Lechtenböhmer, Thomas, Kora Kristof und Wolfgang Irrek: Braunkohle – Ein subventionierter Energieträger, Wuppertal 2004, S. 55-61.

³¹ Vgl. Sauzay, Brigitte: Vernunft oder Gefühl: Die Wahrnehmung der Kernenergie in Deutschland in: Grawe Joachim und Jean-Paul Picaper (Hrsg.): Streit ums Atom: Deutsche, Franzosen und die Zukunft der Kernenergie, München/Zürich 2000, S. 198.

³² Vgl. o.V.: Entstehung und Hintergrund des Atomgesetzes, <http://www.bundesregierung.de/artikel-,413.72061/Entstehung-und-Hintergrund-des.htm>, 10.09.2005.

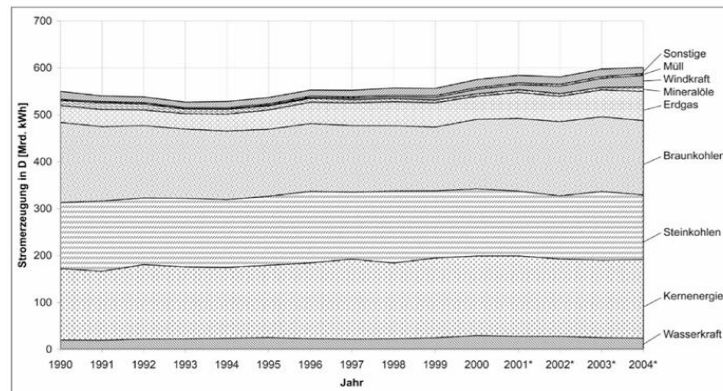


Abbildung 6: Stromerzeugung in Deutschland³³

Über die zu erwartenden Mehrkosten sind in der Vergangenheit mehrere Studien mit teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen veröffentlicht worden. Wird die Kernkraft beispielsweise durch Braunkohle ersetzt, so sind die Mehrkosten vergleichsweise gering, dafür steigt der CO₂-Ausstoß dramatisch an, was es erschwert, die Klimaschutzziele zu erreichen. Wird dagegen auf regenerative Energien gesetzt, ist mit einem deutlichen Preisanstieg für Industrie und Endverbraucher zu rechnen.³⁴

Unklar ist weiterhin, wie sich der Ausstieg aus der Kernenergietechnik in Deutschland auf die Entwicklung der Arbeitsplätze im Bereich Energieversorgung auswirken wird.³⁵ Ein positiver Aspekt des Ausstieges ist die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit einer nuklearen Katastrophe, da aber allein in Europa annähernd 200 andere Kernkraftwerke in Betrieb sind, und sich, wie der Fall Tschernobyl gezeigt hat, die Auswirkungen eines Unfalls keinesfalls nur auf ein Land beschränkt, ist dieser Punkt zu relativieren.³⁶

4.5 Alternative Energien im Vergleich

Von Seiten der Politik werden den regenerativen Energiequellen wie Sonnen- und Windenergie, sowie effektiven Gaskraftwerken mit Kraft-Wärmekopplung gute Chancen eingeräumt, zukünftig einen großen Teil des Stromverbrauchs zu erzeu-

³³ o.V.: Daten und Fakten, http://www.kernenergie.de/informationskreis/de/faq/daten_und_fakten.php?navid=74, 10.10.2005.

³⁴ Vgl. Pfaffenberger, W.: Wirtschaftliche Folgen eines Kernenergie-Ausstieges für Deutschland, in: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S. 17-31.

³⁵ Vgl. Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, S.122.

³⁶ Vgl. o.V.: Kernkraftwerke in Europa, <http://www.kernenergie.de/informationskreis/de/wissen/kernkraftwerksstandorte/kkweuropa.php?navid=17>, 12.10.2005.

gen. Mit modernen Gasturbinen lassen sich Wirkungsgrade von über 50% realisieren, die Abwärme kann darüber hinaus zur Fernheizung benutzt werden, dadurch sind die Erzeugerpreise, wie Abbildung 5 zeigt, heute durchaus konkurrenzfähig, zudem werden durch die Verbrennung weitaus weniger Treibhausgase wie bei der Kohleverstromung freigesetzt. Durch die Kopplung des Gaspreises an den Ölpreis und den ständig wachsenden Weltverbrauch an beiden Ressourcen ist jedoch in der Zukunft mit steigenden Bezugspreisen zu rechnen. Der Gastransport über weite Strecken erfordert dabei den Einsatz großer Energiemengen und verschlechtert somit die Umweltbilanz der Gasverbrennung. Hinzu kommt das Risiko der einseitigen Abhängigkeit von einigen wenigen Förderländern. Die Wasserkraftwerke in Deutschland liefern durchschnittlich vier bis fünf Prozent des Strombedarfs, zu wirtschaftlichen Preisen und nahezu CO₂ frei, jedoch ist das Potential in Deutschland schon seit Jahren nahezu ausgeschöpft.³⁷ Strom aus Photovoltaik oder Windkraftanlagen ist derzeit ohne staatliche Förderung nicht konkurrenzfähig, siehe Abbildung 5. Dies liegt u.a. daran, dass die mittlere Leistungsdichte der Sonneneinstrahlung und der Windströmung um mehrere Größenordnungen unter der von Uran liegt, was bedeutet, dass große Teile Deutschlands zur Energiegewinnung verbaut werden müssten um den Bedarf zu sichern³⁸. Um bei tagelanger Bewölkung oder Windstille die Versorgungssicherheit zu gewährleisten müssten zudem große Schattenkraftwerke vorgehalten werden, die die Kosten weiter steigern. Aus heutiger Sicht kann die Kernfusion mangels praktischer Erfahrung noch nicht als Alternative betrachtet werden, bei weiterem Fortschritt in der Technik und Wissenschaft wäre der großtechnische Einsatz von Fusionskraftwerken frühestens ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts möglich. Daher können den Kernkraftwerken, durch die hohen Erzeugerpreise regenerativer Kraftwerke einerseits und die nicht mehr zu vernachlässigende Umweltbelastung, verbunden mit Versorgungsengpässen und Preissteigerungen der Gas und Kohleverstromung andererseits, in den nächsten Jahrzehnten eine Schlüsselrolle bei der Energieerzeugung zufallen, vorausgesetzt die bekannten Probleme der Endlagerung und Unfallsicherheit werden gelöst und die Akzeptanz dieser Energiequelle nimmt in Gesellschaft und Politik weltweit zu.

³⁷ Vgl. von Weizsäcker, E. U.: Möglichkeiten und Grenzen des Energiesparens, in: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S 83-107.

³⁸ Vgl. Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, S. 129.

Literaturverzeichnis

- Alt, P.: Versorgungssicherheit im Europäischen Verbundnetz, München 2004.
- Ewers, Hans Jürgen und Klaus Rennings: Abschätzung der monetären Schäden durch einen sogenannten Super-Gau, in: Prognos AG (Hrsg.): Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung, Basel 1992, S. 8-31.
- Hansen, U.: Kernenergie und Wirtschaftlichkeit, Köln, 1983.
- Huber, Veit: Der schnelle Brüter, <http://www.schneller-brueter.de/index2.htm>, 1.10.2005.
- Klingelhöfer, R. und W. Maurer: Plasmaphysikalische Grundlagen des Fusionsreaktors, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S. 7-14.
- Kugeler, K. und H. Bonnenberg: Der Hochtemperaturreaktor, in: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S. 147-169.
- Lechtenböhmer, Thomas, Kora Kristof und Wolfgang Irrek: Braunkohle – Ein subventionierter Energieträger, Wuppertal 2004.
- Maurer, W: Physikalische Grundlagen der Kernfusion, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S.4-6.
- Maurer, W.: Supraleitende Magnete für die Kernfusion, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): Kernfusion Forschung und Entwicklung, Karlsruhe 1991, S. 57-65.
- o.V.: Entstehung und Hintergrund des Atomgesetzes, <http://www.bundesregierung.de/artikel-,413.72061/Entstehung-und-Hintergrund-des.htm>, 10.09.2005.
- o.V.: Braunkohlekraftwerk Lippendorf bei Leipzig, <http://www.heuersdorf.de/Lipp1.html>, 1.10.2005.
- o.V.: Daten und Fakten, http://www.kernenergie.de/informationskreis/de/faq/daten_und_fakten.php?navid=74, 10.10.2005.
- o.V.: Kernkraftwerke in Europa, <http://www.kernenergie.de/informationskreis/de/wissen/kernkraftwerksstandorte/kkweuropa.php?navid=17>, 12.10.2005.
- o.V.: Hoher Uran-Preis lockt spekulative Investoren an, <http://www.welt.de/data/2005/07/08/742830.html>, 15.10.2005.
- o.V.: Die Entwicklung der Subventionen in Deutschland seit Beginn der neunziger Jahre, http://www.bundesbank.de/download/volkswirtschaft/mba/000/200012mba_subvent.pdf, 19.10.2005.
- o.V.: International nuclear power plants, <http://www.radwaste.org/power.htm>, 20.10.2005.
- Pfaffenberger, W.: Wirtschaftliche Folgen eines Kernenergie-Ausstieges für Deutschland, in: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S. 17-31.
- Sauzay, Brigitte: Vernunft oder Gefühl: Die Wahrnehmung der Kernenergie in Deutschland, in: Grawe Joachim und Jean-Paul Picaper (Hrsg.): Streit ums Atom: Deutsche, Franzosen und die Zukunft der Kernenergie, München/Zürich 2000, S. 187-200.
- Seidel, Jürgen: Kernenergie: Fragen und Antworten, Düsseldorf/Wien/New York 1990.
- Spears, W.: Iter Overview, http://www.iter.org/pdfs/ITER_overview.pdf, 10.10.2005.
- Vogel, Helmut: Gerthsen Physik, Berlin [u.a.] 1990.
- Volkmer, Martin: Basiswissen zum Thema Kernenergie, Berlin 2004.
- Wasgindt, Volker und Christopher Weßelmann: Kernenergie in Deutschland: Jahresbericht 2002, Berlin, 2002.
- Weizsäcker, E. U. von: Möglichkeiten und Grenzen des Energiesparens, in: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Ist der Ausstieg aus der Kernenergie verantwortbar?, Düsseldorf 1999, S. 83-107.