

Wärme, Kernkraft, regenerative Energie

eine kurze Einführung in ein komplexes Thema

Jan-Peter Meyn

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Physikalisches Institut - Didaktik

Staudtstraße 7, 91058 Erlangen

jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

13. April 2011

Zusammenfassung

Die Katastrophe im japanischen Kraftwerkskomplex Fukushima beherrscht seit geraumer Zeit die Nachrichten. Dieser Text soll darlegen, warum es trotz Abschaltung eines Reaktors noch nach vielen Stunden und Tagen zu einer katastrophalen Kernschmelze mit Freisetzung radioaktiver Substanzen kommen kann. Der Text ist eingebettet in eine kurze Einführung in die Wärmelehre und einen Ausblick auf mögliche Alternativen zu Kernkraftwerken. Die mit * gekennzeichneten Abschnitte sind zur Vertiefung gedacht. Für Bilder wird zunächst auf das Internet verwiesen, eine ergänzte Fassung des Manuskripts ist in Vorbereitung.

1 Wärme

1.1 Von der Dampfmaschine zum Kernkraftwerk

1.1.1 Was bewirkte die Erfindung der Dampfmaschine?

Im 18. Jahrhundert wurden mehrere Erfindungen gemacht, wie man durch Sieden und Kondensieren von Wasser Pumpen antreiben konnte, um den Abbau von Kohle in unterirdischen Bergwerken zu ermöglichen. James Watt konstruierte 1769 eine Kolbendampfmaschine, mit der Maschinen aller Art kontinuierlich angetrieben werden konnten. Der Dampf wurde durch Sieden von Wasser über einem Kohlefeuer erzeugt. Im Laufe der folgenden Jahrzehnte traten Dampfmaschinen in Konkurrenz zum traditionellen Handwerk und in vielen Bereichen wie der Metallverarbeitung, der Weberei und dem Bergbau wurde die Produktivität um ein Vielfaches gesteigert. Arbeit, Konsum und die gesamte Lebensweise der Menschen hat sich im 19. Jahrhundert grundlegend geändert, man spricht von der industriellen Revolution. Unser modernes Leben wäre ohne die Erfindung der Dampfmaschine undenkbar.

1.1.2 Sind Dampfmaschinen gefährlich?

Die ersten Dampfmaschinen wirkten durch Unterdruck in einem Kessel, der durch Kondensation von Wasserdampf verursacht wurde; der maximale Druckunterschied beträgt knapp 1 bar, so dass bei einer bestimmten Größe des Kolbens die Kraft der Maschine begrenzt war. Eine Steigerung der maximalen Kraft wurde ermöglicht, in dem man den Dampf in einem abgeschlossenen Behälter bei höherer Temperatur erzeugte, zum Beispiel 6 bar bei 160 Grad Celsius. In der Anfangszeit sind solche Maschinen häufiger explodiert und viele Arbeiter sind verletzt oder getötet worden. Durch technische Verfeinerungen hat man das Problem schließlich in den Griff bekommen und eine weitere Steigerung des Dampfdrucks wurde möglich. Die Leistung bei kleineren Dampfmaschinen konnte so weit gesteigert werden, dass man sie zum Antrieb der Eisenbahn verwenden konnte.

1.1.3 Wie sind moderne Dampfmaschinen aufgebaut?

Die Dampflokomotive kennen wir nur noch von Photographien und aus Museen. Dennoch übernehmen mit Dampf angetriebene Maschinen einen bedeutenden Anteil am Antrieb in der industrialisierten Welt, nämlich als Dampfturbinen in Elektrizitätswerken, einschließlich Kernkraftwerken. In der Dampfturbine strömt sehr heißer Dampf unter großem Druck auf ein Turbinenrad, welches im Prinzip wie eine Windmühle funktioniert: Der vorbeiströmende Dampf verursacht eine Drehbewegung. Allerdings sind in der Turbine mehrere Räder hintereinander angeordnet, dazwischen sind Umlenkschaufeln, die dem Dampf die richtige Bewegungsrichtung geben. An jedem Rad wird der Druck und die Temperatur des Dampfes geringer, mit einem Turbinenrad allein würde man nicht so große Temperaturunterschiede erreichen können.

1.1.4 Wie funktioniert ein Elektrizitätswerk im Prinzip?

Ein Elektrizitätswerk besteht aus einem Generator (ähnlich einem riesigen Fahrraddynamo) mit einem Antrieb. Bei einer Windkraftanlage erfolgt der Antrieb durch das Windrad, bei einem Wasserkraftwerk durch ein Wasserrad. Die meisten Kraftwerke jedoch haben eine Heizung zur Erzeugung von Wasserdampf, der in eine Dampfturbine geleitet wird, welche wiederum den Generator antreibt. Diese Kraftwerke mit Heizung nennt man die *gewöhnlichen* oder *konventionellen* Kraftwerke. Als Brennstoff verwendet man häufig Kohle, weil man mit geringen Brennstoffkosten viel Elektrizität erzeugen kann.

1.1.5 Was ist das Besondere am Kernkraftwerk?

Das Kernkraftwerk hat genau wie das Kohlekraftwerk eine Dampfturbine mit Generator. Die Besonderheit besteht in der Heizung: Hier nutzt man die Wärme einer atomaren Kettenreaktion in einem sogenannten Kernreaktor.

1.2 Grundlegende Begriffe

1.2.1 Was ist Wärme?

Beim Stichwort Wärme denkt man zuerst an das Thermometer und die Temperatur. Gegenstände können heiß oder kalt sein. Wärme hat aber noch eine andere Seite: Zwei verschieden große Körper können die gleiche Temperatur haben, aber die Menge der im jeweiligen Körper enthaltenen Wärme ist unterschiedlich. Eine gefüllte Badewanne enthält mehr Wärme als ein daraus geschöpfter Becher mit warmem Wasser. Die Wärmemenge ist leicht zu berechnen: Bei der Zerlegung eines großen Körpers ist dessen Wärmemenge genauso groß wie die Wärmemengen der Einzelteile zusammengenommen. Im Beispiel der Badewanne ist die Wärmemenge in der gefüllten Wanne genauso groß wie die Wärmemenge in dem geschöpften Becher und dem in der Wanne verbliebenen Rest. Das Prinzip der addierbaren Wärmemengen gilt auch bei unterschiedlichen Temperaturen. In der Physik wird die Größe, die wir hier Wärmemenge nennen, mit dem Fachbegriff Entropie bezeichnet [1].

1.2.2 Ist die Wärmemenge immer konstant?

Im Badewannenbeispiel ändert sich die Wärmemenge nicht, wenn man das Wasser auf verschiedene Behälter aufteilt. Diese Eigenschaft der physikalischen Größe Wärmemenge ist sehr wertvoll bei Berechnungen, aber man kann nicht immer davon ausgehen, dass die Wärmemenge konstant ist. Es gibt eine Vielzahl von Vorgängen, bei denen Wärme erzeugt wird: Bei der mechanischen Reibung der Hand über eine raue Fläche, oder beim Bremsen eines Fahrrades oder Autos. Bei elektrischen Geräten entsteht Wärme, wenn Strom durch einen elektrischen Widerstand fließt, wie bei Bügeleisen, Toaster und Fön der Fall ist. Bei chemischen Vorgängen, die von selbst ablaufen, entsteht ebenfalls Wärme, vor allem bei der Verbrennung. Die Vorgänge, bei denen Wärme erzeugt wird, haben eine wichtige Gemeinsamkeit: sie sind nicht umkehrbar (Fachbegriff: irreversibel). Die Vernichtung von Wärme ist trotz zahlloser Versuche niemals beobachtet worden. Zwar gibt es Geräte wie den Kühlschrank, die die Wärmemenge in einem Raum verringern können, aber die Wärme wird nur von einem Ort zum anderen gepumpt, also vom Innenraum in die Küche. Das kann man leicht beobachten, denn der Kühlschrank ist auf der Rückseite ziemlich warm.

1.2.3 Was versteht man unter einer Wärmekraftmaschine?

Wärmekraftmaschine ist der physikalische Oberbegriff für Maschinen, die durch Wärme angetrieben werden und eine Bewegung verursachen. Dazu zählen der Benzin- oder Dieselmotor beim Auto, das Flugzeugtriebwerk, die Dampfturbine im Kohlekraftwerk und das Raketentriebwerk. Die technischen Details sind für die Physik nicht so interessant, wir beschränken uns auf das Prinzip: Wärme wird durch Verbrennung eines Treibstoffes erzeugt

und durch einen Mechanismus entsteht Bewegung, entweder vorwärts oder drehend.

1.2.4 Was ist Abwärme?

Wenn man akzeptiert, dass Wärme erzeugt, aber nicht vernichtet werden kann, ist es ziemlich klar, warum eine Wärmekraftmaschine (also ein Motor oder ein Kraftwerk) Wärme an die Umgebung abgibt: Die in der Maschine durch Verbrennung erzeugte Wärme muss herauskommen, anderenfalls würde die Temperatur immer weiter ansteigen. Das ist ein Naturgesetz.

1.2.5 Wie kann man die Wärmekraftmaschine optimieren?

Für die technische Anwendung möchte man den Treibstoff möglichst gut ausnutzen. Bekanntlich gibt es verschiedene Autos, die bei konstanter Geschwindigkeit unterschiedlich viel Benzin brauchen, und die technische Entwicklung schreitet in dem Sinne voran, dass man für eine bestimmte Transportaufgabe (z.B. fünf Personen mit 100km/h von Erlangen nach Hamburg bringen) immer weniger Benzin braucht. Es wäre interessant zu wissen, wie groß der Benzinverbrauch mindestens sein muss, was würde ein perfekter Motor verbrauchen? Diese Frage ist nicht neu, und die Antwort darauf wurde schon 1824 von Sadi Carnot gegeben. Der theoretisch erreichbare Nutzen hängt allein von den Temperaturen am Eingang und am Ausgang der Maschine ab, die erste Temperatur muss möglichst hoch sein, die zweite Temperatur möglichst niedrig. Auf technische Details kommt es nicht an! Leider ist es nicht möglich, einen perfekten Motor zu bauen, vielmehr gibt es Reibung der bewegten Teile untereinander sowie weitere Vorgänge, die effektiv zusätzliche Wärme erzeugen. Die zusätzlich erzeugte Wärme geht zu Lasten des mechanischen Nutzens.

1.2.6 Was ist Energie?

Der vorherige Abschnitt lässt offen, wie viel mechanischen Nutzen oder wie viel Elektrizität man aus einer gegebenen Menge Brennstoff eigentlich gewinnen kann. Zur Klärung dieses Problems brauchen wir die physikalische Größe Energie. Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Diese Eigenschaft ist von größtem Nutzen bei Berechnungen. Es ist auch die einzige Eigenschaft der Energie, man kann sich ansonsten nichts darunter vorstellen.

Obwohl Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, spricht man davon, Energie zu verbrauchen. Damit meint man, dass man einen unumkehrbaren Vorgang antreibt. Beispielsweise braucht man Energie, um ein Loch in eine Wand zu bohren. Mit der bloßen Hand ist das anstrengend. Daher nimmt man eine Bohrmaschine. Für das Bohren braucht man dann eine bestimmte Menge Energie auf dem Träger Elektrizität. Für ein großes Loch braucht man mehr Energie als für ein kleines Loch.

1.2.7 Was ist der maximal erreichbare Nutzen eines Kraftwerks?

Den Nutzen eines Kraftwerks bezeichnet man als Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel Wärme man mit einer elektrischen Heizung produzieren kann im Vergleich zur Wärme, die bei der Verbrennung des Treibstoffes entsteht. In einer idealen Wärmekraftmaschine mit Temperatur T_1 am Eingang (Verbrennung oder Frischdampf) und der Temperatur T_2 am Ausgang (Abgas oder gekühlter Dampf) ist der Wirkungsgrad η (griech., sprich: eta) gegeben durch

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (1)$$

Die Temperatur muss wie bei allen thermodynamischen Berechnungen in der Einheit Kelvin angegeben werden. Für ein Kohlekraftwerk mit der Eingangstemperatur $T_1=800\text{K}$ und Ausgangstemperatur $T_2=300\text{K}$ erhält man 63%, d.h. aus einer Portion Kohle mit 1kWh Energieinhalt könnten im Idealfall 0,63 kWh Elektrizität produziert werden.

1.2.8 Warum wird der theoretische Wirkungsgrad in der Praxis nicht erreicht?

In der Praxis erreicht man trotz größtem technischem Aufwand im Kohlekraftwerk nur gut 48% Wirkungsgrad. Das wollen wir aufklären. Carnot hat in seiner bahnbrechenden Arbeit bewusst angenommen, dass in der Maschine keine unumkehrbaren Prozesse stattfinden. Das bedeutet unter anderem, dass die Maschine äußerst langsam sein muss, sonst gäbe es Reibungsverluste. Eine ideale Carnot-Maschine kann man im Elektrizitätswerk nicht gebrauchen, denn die Leistung ist verschwindend gering. Es gibt eine Erweiterung der Formel für den Wirkungsgrad von Maschinen, die mit größtmöglicher Leistung laufen; diese wurde - erstaunlicherweise erst 1975 - von Curzon und Ahlborn angegeben [2]. Diese Autoren konnten zeigen, dass der Wärmewiderstand am Eingang und Ausgang der Maschine eine prinzipielle Grenze für den Wirkungsgrad setzt, die auch mit den klügsten Vorkehrungen nicht überwunden werden kann. Jegliche Verbesserungen an diesen Komponenten würden höchstens die Leistung der Maschine erhöhen, aber der Brennstoffverbrauch würde entsprechend ansteigen. Die Formel von Curzon und Ahlborn wird von realen Kraftwerken ziemlich gut erfüllt. Bei den neuesten Anlagen ist der Wirkungsgrad sogar etwas höher: Man lässt die Anlage absichtlich etwas langsamer laufen, weil in der wirtschaftlichen Gesamtrechnung nicht nur der Bau des Kraftwerks, sondern auch die Brennstoffkosten eine Rolle spielen. Steigerungen im Wirkungsgrad sind noch möglich mit neuen Materialien und Fertigungstechnologien, wodurch die Verbrennungstemperatur in einer Gasturbine bzw. Dampftemperatur in einer Dampfturbine noch weiter erhöht werden kann. Das unterscheidet die Kraftwerke von Haushaltsgeräten: Die Energie der Brennstoffe wird so gut ausgenutzt, wie es technisch machbar ist; neue Kraftwerke hätten immer die Effizienzklasse A++, wenn man sie dieser Kategorisierung unterwerfen würde.

2 Kernenergie

2.1 Radioaktivität

2.1.1 Was ist Radioaktivität?

Die Radioaktivität wurde 1896 von Henri Becquerel entdeckt, nämlich durch die Belichtung einer eingepackten Photoplatte durch ein Stück Uranerz. Das Uranerz sendet eine unsichtbare Strahlung aus, auf die die Photoplatte reagiert. Danach fand man, dass die Radioaktivität auf unterschiedlichen Arten von Strahlung beruht, nämlich α -, β - und γ -Strahlung. α -Strahlung besteht aus Helium-Atomkernen, β -Strahlung sind sehr schnelle Elektronen (ähnlich wie im Teilchenbeschleuniger) oder Positronen und γ -Strahlung ist als elektromagnetische Welle recht ähnlich zur Röntgenstrahlung. Die Art der Strahlung ist stoffabhängig. Radioaktivität findet man bei verschiedenen Naturstoffen, nicht nur in speziellen Erzen, sondern auch in alltäglichen Stoffen wie Kalium. Radioaktivität geht einher mit dem Zerfall des Stoffes.

2.1.2 Was ist die Halbwertszeit?

Nach der Halbwertszeit ist die Hälfte eines radioaktiven Stoffes zerfallen, d.h in einen oder mehrere andere Stoffe umgewandelt.

2.1.3 Was ist ein Isotop?

Aus der Chemie kennen wir die chemischen Elemente, aus denen man prinzipiell sämtliche Stoffe herstellen kann. Untersucht man ein chemisches Element wie Sauerstoff mit sehr empfindlichen physikalischen Methoden, so stellt man fest, dass darin mehrere Sorten Sauerstoff sind, die sich ganz geringfügig voneinander unterscheiden. Diese Einzelkomponenten werden Isotope genannt. Der natürliche Sauerstoff (chem. Symbol O) besteht aus den Isotopen O-16, O-17 und O-18, wobei die Zahl die Summe aus Neutronen und Protonen im Atomkern angibt, die uns hier aber nicht näher interessiert. Die Isotope O-16 und O-18 gehen chemische Verbindungen gleichermaßen ein. Geringste Unterschiede sorgen aber dafür, dass in chemischen Verbindungen das Verhältnis der Stoffmengen O-16/O-18 von der Temperatur abhängt. Dadurch kann man beispielsweise feststellen, wie die Erdtemperatur in verschiedenen geologischen Zeitaltern war.

Neben den gewöhnlichen Isotopen gibt es auch radioaktive Isotope, von denen manche auch in der Natur vorkommen, andere werden künstlich hergestellt. Manche Stoffe haben ausschließlich radioaktive Isotope, beispielsweise das Uran.

2.1.4 Warum ist Radioaktivität gefährlich?

Radioaktivität bricht chemische Verbindungen auf, es ist sogenannte ionisierende Strahlung. Sie zerstört lebendes Gewebe und verändert das Erbgut. Die natürliche Radioaktivität

gilt als unbedenklich, eine andere Wahl hat man auch nicht, weil man sich ihr nicht entziehen kann. Künstliche Radioaktivität kann millionenfach intensiver sein als die natürliche. Bei großer Intensität entsteht die akute Strahlenkrankheit, die unter Umständen tödlich ist. Bei geringerer Intensität und bei der Aufnahme radioaktiver Substanzen in den Körper kann im Laufe von Jahren Krebs entstehen.

2.1.5 Wie wird Radioaktivität nachgewiesen?

Im einfachsten Fall wird Radioaktivität mit dem Geiger-Müller-Zähler nachgewiesen. Dieses Gerät reagiert auf die ionisierende Wirkung der Strahlung und kann verschiedene Strahlungsarten nicht unterscheiden. Aufwändigere Detektoren können das Spektrum der γ -Strahlung messen, damit kann man radioaktive Isotope identifizieren. Jedes Isotop emittiert eine charakteristische Frequenz. Die Methode kann man gut vergleichen mit der Flammenspektroskopie, bei der bestimmte Elemente über charakteristische Leuchterscheinungen nachgewiesen werden. Die Analyse von α - und β -Strahlung ist technisch sehr aufwändig, aber da die meisten radioaktiven Isotope bzw. deren Zerfallsprodukte γ -Strahlung emittieren, ist die Gamma-Spektroskopie eine gute Analysemethode.

2.1.6 Wie wird die Gefährlichkeit von Radioaktivität in Zahlen ausgedrückt?

Die physikalische Stärke der Radioaktivität, kurz *Aktivität* wird in der Einheit Becquerel pro Mengeneinheit eines Stoffes angegeben, z.B. 100 Becquerel pro Kilogramm Wasser. Das bedeutet 100 Zerfallsereignisse pro Sekunde. Ein idealer Geigerzähler würde in diesem Fall 100 Ionisationsereignisse pro Sekunde und kg Wasser zählen.

Gesundheitliche Schäden steigen zwar mit der Aktivität eines radioaktiven Stoffes, aber die Auswirkungen hängen stark davon ab, um welche Art von Strahlung es sich handelt. Es kommt darauf an, welcher Anteil der Strahlung tatsächlich in den Körper gelangt und in welchem Umfang das Gewebe zerstört wird; das wird mit der Äquivalentdosis in der Einheit Sievert angegeben. Neben der Dosis wird auch noch die Dosisleistung in Sievert pro Stunde angegeben. Diese Größe ist wichtig, wenn man die gesundheitlichen Risiken abschätzen will, wenn eine Person vorübergehend einer erhöhten Radioaktivität ausgesetzt wird.

2.1.7 Wie kann man sich über aktuelle Messwerte informieren?

Der Geigerzähler gibt die Zählrate von radioaktiven Zerfällen an. Zählraten können witterungsbedingt um 10% - 20% schwanken. In Gebäuden sind die Zählraten bei schlechter Belüftung erhöht. Die Aussagekraft solcher eigenen Messungen ist begrenzt. Das Bundesamt für Strahlenschutz unterhält ein Netzwerk von Stationen zur Messung der Gamma-Strahlung. Die lokalen Dosisleistungen für Gammastrahlung sind im Internet verfügbar [3].

Messwerte für Japan sind verfügbar unter [4].

2.2 Der Kernreaktor

2.2.1 Wie ist ein Kernreaktor aufgebaut?

Abgesehen von technischen Feinheiten ist ein Kernreaktor ein Heißwasserbereiter. Das Wasser wird unter hohem Druck gehalten, so dass es bei einer Temperatur von rund 300° noch flüssig ist. Die Heizung besteht aus sogenannten Brennstäben; das sind Metallröhren, die mit Tabletten aus Uran-Dioxid gefüllt sind. Das Uran durchläuft eine künstlich herbeigeführte Kernreaktion, bei der sehr viel Wärme erzeugt wird.

2.2.2 Was ist eine Kernreaktion?

Bei chemischen Reaktionen werden Stoffe so umgewandelt, dass sich die beteiligten chemischen Elemente dabei nicht verändern. Bei der Kernreaktion hingegen werden chemische Elemente in andere chemische Elemente dadurch umgewandelt, dass sich die Atomkerne verändern. Bei radioaktiven Isotopen passiert das von allein. Cäsium-137 wandelt sich mit einer Halbwertszeit von rund 30 Jahren in Barium-137 um; als Reaktionsprodukt entsteht β -Strahlung. Bei den meisten Kernreaktionen sind Ausgangs- und Endstoffe Nachbarn im Periodensystem der chemischen Elemente.

2.2.3 Wie kann die Kernspaltung zur Kettenreaktion werden?

Beim Uran gibt es eine besondere Form der Kernreaktion, nämlich die Kernspaltung. Es entstehen zwei neue Stoffe gleichzeitig, und es werden Neutronen freigesetzt. Diese Neutronen begünstigen die Kernspaltung weiterer Urankerne, was wiederum eine größere Menge von Neutronen produziert. Die Reaktion nimmt stark zu, es entsteht eine Kettenreaktion. Diese Kettenreaktion kann nur stattfinden, wenn viel Uran auf kleinem Raum zusammen kommt, ansonsten sind die Neutronen zu verdünnt. Außerdem sind die Neutronen sehr heiß, aber für eine wirksame Reaktion müssen sie abgekühlt werden, was man mit dem Fachbegriff Moderation bezeichnet. Im Kernreaktor geschieht die Moderation meistens durch Wasser, welches gleichzeitig die Wärmeübertragung in die Dampfturbine übernimmt. Bei Kernreaktionen entsteht pro eingesetzter Stoffmenge millionenfach mehr Wärme als bei chemischen Reaktionen.

2.2.4 Wie wird die Wärmeerzeugung im Reaktor gesteuert?

Im Kernreaktor befindet sich so viel Uran auf kleinem Raum, dass die Kernreaktion von allein startet und zu starke Ausmaße annehmen würde, wenn man sie nicht künstlich bremsen würde. Um die Wärmeerzeugung zu kontrollieren, werden Stoffe in den Reaktor eingebracht, die Neutronen absorbieren und die Reaktionsgeschwindigkeit auf ein gewünschtes

Maß begrenzen. Zum einen gibt es sogenannte Kontrollstäbe, die zwischen die Brennstäbe geschoben werden; damit kann man die Kettenreaktion komplett unterbrechen. Zum anderen wird etwas Bor im Reaktorwasser aufgelöst, welches die Kettenreaktion so begrenzt, dass die Kontrollstäbe fast komplett zwischen den Brennstäben herausgezogen werden können. Wenn der nukleare Brennstoff im Verlauf der Zeit verbraucht wird, muss das Bor aus dem Wasser sukzessive entfernt werden, teilweise passiert das von allein durch Reaktion mit Neutronen unter Bildung von radioaktivem Tritium (Wasserstoffisotop H-3).

2.2.5 Welche Isotope werden beim regulären Betrieb eines Kernkraftwerks abgegeben?*

Beim Betrieb eines Kernkraftwerks ist die Emission von Tritium und Edelgasen unvermeidlich und erfolgt im Umfang von mehr als 1.000.000.000 Becquerel pro Jahr im Rahmen der Betriebsgenehmigung. Das Tritium entsteht durch Kernreaktion des Bors, welches dem Kühlwasser zur Reaktorsteuerung beigegeben werden muss. Das Gefährdungspotential von Tritium ist umstritten. Einerseits ist die β -Strahlung sehr energiearm und wird schon durch dünnste Materieschichten abgeschirmt, andererseits kann Tritium zu Wasser reagieren und im menschlichen Körper eingelagert werden. Die radioaktiven Edelgasisotope Kr-85, Xe-131m, Xe-133 und Xe-135 sind Zerfallsprodukte und entweichen teilweise aus den Brennelementen. Die Emission von Jod-131 und sonstigen Spaltprodukten ist ebenfalls möglich und im Rahmen der Betriebsgenehmigung, wobei deren Aktivitäten typischerweise tausendmal kleiner sind als bei den Edelgasen.

2.3 Die nukleare Katastrophe von Fukushima

2.3.1 Worauf reagiert eine automatische Abschaltung?

Jedes Kernkraftwerk hat eine Vielzahl von Sensoren, mit denen die wichtigen Betriebsgrößen ständig kontrolliert werden. Dazu zählen unter anderem der Wasserdruck im Reaktor, der Gehalt an Radioaktivität im Kühlwasser und im Reaktorgebäude, aber auch Alarmanlagen, die beispielsweise die Störung von Sicherheitssystemen wie Notstromanlagen anzeigen können. Wird beispielsweise eine erhöhte Radioaktivität im Kühlwasser festgestellt, so deutet das auf ein undichtes Brennelement hin. Der Reaktor wird schnellstmöglich und ohne menschliches Zutun automatisch abgeschaltet. Selbstverständlich kann die Schnellabschaltung auch durch das Betriebspersonal ausgelöst werden, es gibt einen Not-Ausschalter. In Fukushima sind alle Reaktoren direkt nach dem Erdbeben und vor dem Eintreffen des Tsunamis abgeschaltet worden.

2.3.2 Was passiert bei der Abschaltung eines Reaktors?

Zuerst wird die Kettenreaktion im Reaktor unterbrochen, indem die Kontrollstäbe ganz in die Brennelemente eingetaucht werden. Beim Druckwasserreaktor fallen die Stäbe durch ihr Gewicht von oben in den Reaktor, beim Siedewasserreaktor werden sie von unten eingeschoben. Wenn das automatische Sicherheitssystem bzw. der Betriebsführer schnell reagieren, ist dieser erste Schritt zuverlässig möglich, wie eine Vielzahl von erfolgreichen Schnellabschaltungen belegt haben. Nukleare Unfälle und Katastrophen entwickeln sich erfahrungsgemäß erst im Verlauf von Stunden und Tagen, so auch in Fukushima (Ausnahme ist die Katastrophe in Tschernobyl, bei der die Kettenreaktion außer Kontrolle geriet).

2.3.3 Welche Gefahr geht von einem abgeschalteten Reaktor aus?

Der Reaktor ist eine extrem starke Heizung mit einer Leistung von bis zu 4 Milliarden Watt im normalen Betrieb. Nach dem Einfahren der Kontrollstäbe wird zwar die Kettenreaktion unterbrochen, aber die Heizung wird nicht komplett ausgeschaltet. Die Reaktionsprodukte der Uranspaltung zerfallen weiter und erzeugen Wärme von zunächst 7% der ursprünglichen Leistung. Das sind immerhin noch 280 Millionen Watt (280MW) bei einem großen Kraftwerk. Diese Wärme muss mit Kühlwasser kontinuierlich aus dem Reaktor abgeführt werden. Es ist also nicht damit getan, den heißen Reaktor abzukühlen und wie ein Kohlenfeuer zu löschen. Nach einer Stunde beträgt die Wärmeerzeugung weniger als 1% des ursprünglichen Wertes, was mit 40 Millionen Watt (40MW) aber weiterhin eine konsequente Kühlung erfordert.

Für die weitere Diskussion unterscheiden wir zwei verschiedene Arten von Störfällen, nämlich den Ausfall der Kühlung durch Versagen der Pumpen, und das Leck im Kühlkreislauf.

2.3.3.1 Ausfall der Wasserpumpen

Wir gehen jetzt nicht auf die Unterschiede von Siedewasser- und Druckwasserreaktoren ein, sondern stellen nur fest, dass der Reaktor effektiv dadurch gekühlt wird, dass die Wärme aus dem Reaktorwasser in einen gekühlten Wärmetauscher strömen kann. Der Wärmetauscher wird von kühlem Wasser aus einem Kühlturm oder einem großen Gewässer durchflossen, und dafür ist eine elektrische Pumpe notwendig. Wenn diese ausfällt versiegt der Kühlwasserzufluss und damit der Abstrom von Wärme aus dem Reaktor in das Kühlwasser. Die Temperatur im Reaktor immer weiter an, weil die Heizung weiterhin Wärme produziert. Bei steigender Temperatur verdampft ein Teil des Reaktorwassers und der Druck im Reaktor wird höher. Man müsste jetzt den Dampf ablassen, aber das geht eigentlich nicht: Zum einen ist das Wasser radioaktiv und im frühen Stadium eines Störfalls will man die Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt vermeiden. Zum anderen würde

bei einer Druckreduzierung ein großer Teil des Wassers verdampfen.¹ Wenn sich die Situation zugespitzt hat, muss man trotz dieser Risiken Dampf ablassen, um zu vermeiden, dass eine Leitung unkontrolliert platzt. In jedem Fall geht dieser Störfall in das folgende Problem über, wenn die rechtzeitige Wiederherstellung der externen Kühlung misslungen ist.

2.3.3.2 Leck im Reaktor

Bei einem Leck im Reaktor muss das ausgelaufene bzw. ausgedampfte Wasser ersetzt werden. Dazu braucht man eine Pumpe, die einen Druck von mindestens 70bar erreicht. Das ist etwa zwanzigmal mehr als der Druck in einer Haushaltswasserleitung und auch viel mehr, als man mit Wasserpumpen von Feuerwehr und THW erreicht. Der erforderliche Druck ist so hoch, dass ein austretender Wasserstrahl rein rechnerisch bis zu 700m hoch spritzen würde. Wenn die im Reaktor installierten Pumpen nicht funktionieren, spitzt sich die Situation im Reaktor weiter zu, denn der Aufbau und Anschluss einer Pumpanlage, die diesen hohen Druckunterschied bewältigen kann, ist sehr aufwändig. Zu diesem Zeitpunkt ist das Innere des Sicherheitsbehälters wegen des Lecks radioaktiv kontaminiert, was die Arbeiten erschwert.

2.3.4 Warum muss um jeden Preis Wasser in den Reaktor nachgefüllt werden?

Beim Fortschreiten des Störfalls fällt der Wasserstand im Reaktor so weit, dass die Brennstäbe nicht mehr bedeckt sind. Dann können die Brennstabhüllen aufgrund von Überhitzung undicht werden, und große Mengen Radioaktivität gelangen in den gesamten Reaktor. Aus dem Störfall wird ein nuklearer Unfall wie in Harrisburg (1979) und Fukushima (2011). Neben der Kühlung gibt es einen weiteren Grund, Wasser in den Reaktor nachzufüllen: Dem Wasser kann Borsäure zugesetzt werden. Das darin enthaltene Bor absorbiert Neutronen und vermindert damit das Risiko, dass die Kernspaltungsreaktion wieder aufflammt, wenn der Reaktorkern schmelzen sollte.

2.3.5 Wodurch entsteht eine Wasserstoffexplosion?

Sobald ein Teil eines Brennstabes nicht mehr von flüssigem Wasser bedeckt ist, fängt er an zu glühen, weil die Wärme vom Wasserdampf viel schlechter abtransportiert wird als von flüssigem Wasser. Das Material der Brennstabhülle (Zirkonium) reagiert mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Sauerstoff; letzterer oxidiert das metallische Zirkon zu sprödem Zirkonoxid. Dann entstehen Risse in den Brennstabhüllen, so dass flüchtige Spaltprodukte wie Jod entweichen können – die Radioaktivität im Wasserdampf steigt millionenfach an. Der

¹Die im Wasser befindliche Wärmemenge bei 70bar und 290 °C ist genauso groß wie in einer Mischung von 70 Prozent Dampf und 30 Prozent Wasser bei Atmosphärendruck und 100°C.

Wasserstoff bildet mit dem Sauerstoff der Luft ein explosives Gemisch. In Fukushima kam es zu mehreren Wasserstoffexplosionen, bei denen jeweils große Mengen Radioaktivität freigesetzt wurden, weil zu diesem Zeitpunkt die Brennelemente schon undicht geworden waren. In diesem Stadium des Unfalls wäre es theoretisch noch denkbar, dass man durch Nachfüllen des Wassers im Reaktor die ansonsten folgende Kernschmelze verhindert. Auf jeden Fall riskiert man dabei das Leben der Reaktorbesatzung.

2.3.6 Was ist eine Kernschmelze?

Ohne Wiederherstellung der Wasserkühlung werden die Brennstäbe immer heißer und schmelzen schließlich bei über 1700° . Der Kernbrennstoff ist zuerst noch fest und bildet einen lose zusammengebackenen Stab, der hauptsächlich aus Uran-Dioxid besteht, welches keramische Eigenschaften hat. Beim Aufbrechen oder Aufschmelzen der Brennstabhüllen verteilen sich die vorher eingeschlossenen radioaktiven Substanzen im ganzen Reaktor. Der Reaktorbehälter kann undicht werden, so dass die ihn umgebende Sicherheitshülle die wirksame Barriere gegen den Austritt von Radioaktivität wäre. Solange die Brennstäbe und Kontrollstäbe fest sind, kann keine Kettenreaktion stattfinden, zumal das Wasser als Moderator fehlt, aber es reicht eine geringe Temperaturerhöhung für die eigentliche Kernschmelze: Beim Schmelzen der Uran-Keramik kann das spaltbare Material sich so verteilen, dass die Kettenreaktion teilweise wieder starten kann, wodurch die Temperatur noch weiter ansteigt. Ob das passiert, hängt unter anderem davon ab, ob es vorher gelang, Borsäure in den Reaktor zu pumpen. Zwar gibt es auf keinen Fall eine Explosion wie bei einer Atombombe, aber der Reaktor und Sicherheitshülle können durch die möglicherweise heftige Reaktion dennoch komplett zerstört werden. Es besteht die Gefahr, dass alle radioaktiven Substanzen des gesamten Reaktors in die Umwelt gelangen.

Bei neueren Kraftwerken wird der Sicherheitsbehälter so konstruiert, dass dieser bei vernünftigen Annahmen einer Kernschmelze standhält. Die Formulierung *vernünftige Annahme* ist eigentlich unpassend, denn man versucht zuerst, die Kernschmelze mit sehr vielen Vorsichtsmaßnahmen zu verhindern. Eine allerletzte Maßnahme soll die Auswirkung einer Kernschmelze kontrollieren, die es gemäß den vorher getroffenen Annahmen gar nicht geben dürfte.

2.3.7 Welche Rolle spielen die chemischen Eigenschaften der radioaktiven Spaltprodukte?*

Die chemischen Eigenschaften bestimmen, ob ein Spaltprodukt aus einem defekten Brennelement leicht entweichen kann. Die radioaktiven Isotope der Edelgase Krypton und Xenon entweichen am leichtesten, aber sie verteilen sich auch sehr schnell in der Luft. Das Jod bildet chemische Verbindungen, die leicht verdampfen und es wird daher bei erhöhter

Temperatur leicht freigesetzt; in etwas geringerem Maße gilt das auch für Cäsium. Chemische Verbindungen von Cäsium und Jod sind meistens sehr gut in Wasser löslich. Andere Substanzen wie Strontium, Promethium und Zirkon bilden direkt im Brennstab sehr stabile Oxide, weil das Uran als Oxid UO_2 eingesetzt wird. Die Oxide der genannten Spaltprodukte haben ebenso wie das Uranoxid Schmelzpunkte weit oberhalb von 2000°C und verdampfen auch bei hohen Temperaturen vergleichsweise wenig. Die Verstrahlung der Umgebung geschieht kurzfristig vor allem durch Jod-131, welches aufgrund der Halbwertszeit von acht Tagen sehr hohe Aktivität aufweist. Langfristig dominiert das Cäsium-137 mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren.

2.3.8 Wie kann man aus der Freisetzung bestimmter Isotope auf den Zustand eines Reaktors schließen?

Im Normalbetrieb eines Reaktors werden radioaktives Tritium und Edelgase freigesetzt. Bei einem Störfall, bei dem lediglich Dampf aus dem Reaktor abgegeben wird, werden diese radioaktiven Substanzen in höherer Konzentration frei, sie verteilen sich schnell in der Atmosphäre. Die Spaltprodukte Jod-131 und Cäsium-137 treten nur in größeren Mengen aus, wenn die Brennstabhüllen undicht sind. Daraus kann man schließen, dass die Wasserstoffreaktion eingesetzt hat, eventuell ist auch schon ein Teil der Brennstabhüllen geschmolzen. Zur Kernschmelze mit Verflüssigung des Kernbrennstoffes ist es dann nur noch ein kleiner Schritt.

2.3.9 Warum wird bei einem Super-GAU mehr Radioaktivität freigesetzt als bei einer Atombombenexplosion?*

In einem Kernreaktor ist die Menge an spaltbarem Material rund tausendfach größer als bei einer Atombombe. Innerhalb von drei Stunden wird die gleiche Wärmemenge freigesetzt wie bei einer Atombombe innerhalb eines winzigen Sekundenbruchteils. Das ist an sich nicht bedenklich, sondern erwünscht, und die Wärmeerzeugung durch Gas der Kohle im konventionellen Kraftwerk ist vergleichbar hoch. Tatsache ist allerdings, dass innerhalb von drei Stunden auch die gleiche Menge Spaltprodukte entsteht, und im Verlauf von Monaten eben eine entsprechend größere Menge. Zwar zerfallen die meisten Spaltprodukte sehr schnell, aber dennoch beträgt die Menge an radioaktiven Stoffen auch längere Zeit nach Ende der Kettenreaktion noch mehrere Tonnen, also tausendmal mehr als bei einer Atombombenexplosion. Wenn davon nur ein Zehntel Prozent in die Umwelt gelangen würde, hätte man die gleiche Verstrahlung wie bei einer Atombombe. Bei einer Kernschmelze muss man mit der Freisetzung noch größerer Mengen rechnen.

3 Gefahrenanalyse und Investitionen in die Sicherheit

3.1 Die Situation in Fukushima

3.1.1 Wodurch wurden die Kernschmelzen ausgelöst?

In allen im Betrieb befindlichen Reaktoren des Kraftwerkskomplexes in Fukushima I sowie in weiteren Kernkraftwerken an der japanischen Ostküste wurde durch das Erdbeben am 11.3.2011 die Schnellabschaltung ausgelöst, die jeweils einwandfrei funktioniert hat. Durch das Erdbeben wurde das Elektrizitätsnetz zerstört. In Fukushima I wurden Notstromdiesel gestartet und haben den Betrieb der Anlage aufrecht erhalten. Nach einer Stunde wurden die Dieselmotoren durch den Tsunami überflutet, so dass die Notstromversorgung komplett ausfiel. Eine Zeit lang konnten die Wasserpumpen zur Kühlung der Restwärme auf Akkumulatoren zurückgreifen, aber ohne die Wiederherstellung des Netzes fielen die Notkühlpumpen schließlich aus. In den Reaktoren wurde das Reaktorwasser durch die neu entstehende Wärme der Reaktorkerne immer heißer und verdampfte schließlich. Dadurch kam es in den Reaktoren 1 und 3 zu Wasserstoffexplosionen und in den Reaktoren 1, 2 und 3 zu Kernschmelzen.

Entgegen mancher Darstellung, dass eine *Verkettung von Ereignissen* die Katastrophe ausgelöst habe, muss man feststellen, dass allein die Zerstörung der elektrischen Anlage außerhalb des Reaktorgebäudes der Auslöser war. Der Tsunami an sich oder ein Flugzeugabsturz hätten die gleiche Wirkung haben können. Das Erdbeben hat den Verlauf der Katastrophe in gewisser Weise sogar abgemildert, denn zwischen der Schnellabschaltung und dem Ausfall der Kühlung lagen mehrere Stunden, so dass die Überhitzung des Reaktors langsamer voranschritt, als es bei einem Ausfall der Kühlung direkt nach (oder sogar vor) der Schnellabschaltung der Fall gewesen wäre.

3.1.2 Wie konnten die Abklingbecken in Fukushima zur Gefahr werden?

Wenn Brennelemente verbraucht sind, wird der Reaktor abgeschaltet und zunächst einige Zeit gekühlt, bis man den Druckbehälter öffnen und die Brennelemente herausnehmen kann. Diese werden dann in einem Wasserbecken in einigen Metern Tiefe gelagert, wo sie mindestens fünf Jahre lang weiter Wärme abgeben. Das Wasser hat eine Temperatur von 20 bis 30 Grad und ist unter Atmosphärendruck, also eine offene Wanne. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass ein ursprünglich intaktes Brennelement unter diesen Bedingungen undicht würde und Radioaktivität entweichen könnte. Es ist aber fatal, wenn man aufgrund der leichter handhabbaren Bedingungen - Raumtemperatur, Umgebungsdruck und relativ geringe Wärmeerzeugung - weniger Vorkehrungen trifft, dass diese Bedingungen auch im Störfall bestehen bleiben. Für das Abklingbecken ist ebenfalls ein Wasseraustausch zur Kühlung notwendig; wenn diese ausfällt, fängt das Wasser nach einiger Zeit an zu kochen und verdampft. Eine komplette Reaktorladung von Brennelementen erzeugt ein Jahr nach

Ende der Kettenreaktion noch 1MW an Wärme durch radioaktiven Zerfall, damit könnten einhundert Tonnen Wasser in weniger als einer Stunde zum Kochen gebracht werden.

In Fukushima war wegen des totalen Stromausfalls auch die Kühlung der Abklingbecken ausgefallen. Die Abklingbecken befinden sich außerhalb des Sicherheitsbehälters. Damit fehlt die wichtigste Barriere zum Einschluss radioaktiver Stoffe im Falle einer Undichtigkeit durch Überhitzung der verbrauchten Brennstäbe. Offensichtlich war es aufgrund fehlender Leitungen nicht möglich, Wasser gezielt nachzufüllen, obwohl gewöhnliche Pumpen ausgereicht hätten, den relativ geringen Höhenunterschied vom Erdboden zum Abklingbecken zu überwinden.

3.1.3 Welche Sicherheitsmaßnahmen fehlten in Fukushima?

Zunächst ist festzustellen, dass Japan zu den geologisch aktivsten Regionen der Erde gehört; es musste damit gerechnet werden, dass gewaltige Erdbeben auftreten. Das stärkste Beben des vergangenen Jahrhunderts war dreimal stärker als das in Japan, es hätte also noch schlimmer kommen können. Die fatalen Zerstörungen entstanden durch den Tsunami, jedoch war auch der Tsunami vorhersehbar. Es ist kein Zufall, dass das Wort Tsunami aus dem Japanischen kommt, denn dort sind diese Naturereignisse besonders häufig. Die Wellenhöhe von 14 Metern ist kein Höchstwert; der Tsunami des stärksten jemals gemessenen Erdbebens in Chile erreichte 27m und bei anderen Ereignissen sind aufgrund besonderer Küstenform noch höheren Wellen nachgewiesen worden. Man kann also ohne Kenntnis der technischen Details feststellen, dass die Gefahr durch Erdbeben und Tsunami bei der Konstruktion der Kernkraftwerke in Fukushima nicht sachgerecht einbezogen wurde.

Es gab zu wenig Frischwasser zum Ausgleich der Kühlwasserlecks; schon sehr bald musste Meerwasser zur Kühlung verwendet werden, welches aufgrund des Salzgehaltes die Korrosion im Reaktor beschleunigt, vor allem bei den hohen Temperaturen im Verlauf des Unfalls. Die Reparatur der Stromleitungen hat mehrere Tage in Anspruch genommen; es gab keine mobilen Notstromaggregate auf LKW oder Eisenbahnwagen. Es standen weder Löschfahrzeuge noch Hubschrauber zur Verfügung, in denen die Besatzung durch eine Abschirmung vor Radioaktivität geschützt worden wäre. Vermutlich gab es keine Sensoren, die vor Wasserstoff warnen würden, denn sonst hätten die Explosionen verhindert werden können. Die Vielzahl von Mängeln zeigt, dass die Katastrophe auch möglich gewesen wäre, wenn die Notkühlung durch ein anderes Ereignis als die Überflutung ausgefallen wären.

3.2 Generelle Gefahren durch den Betrieb von Kernkraftwerken

3.2.1 Warum gibt es keine sicheren Standorte für Kernkraftwerke?

Im vorigen Abschnitt wurde erklärt, dass jedes Kernkraftwerk durch den Ausfall der internen Elektrizitätsanlagen in höchste Gefahr kommen kann. Man kann sich verschiedene

Szenarien ausmalen, wie die elektrischen Anlagen zerstört werden könnten; heute geht man davon aus, dass der Absturz eines Flugzeugs durch einen Unfall oder einen Terroranschlag das größte Risiko darstellt. Wie die Ereignisse in Japan uns allen vor Augen geführt haben, reicht es nicht, dass der eigentliche Reaktor durch eine dicke Betonhülle geschützt ist. An sich müsste man für wesentliche Komponenten wie Notstromdiesel, Transformatoren, etc. einen separaten Schutzmantel bauen, aber aus Kostengründen geschieht das nicht.

3.2.2 Kann es in Deutschland einen Tsunami geben?*

Mehrere Vulkaninseln im Atlantik könnten einen Tsunami auslösen, der die deutsche Nordseeküste samt den Kernkraftwerken Brunsbüttel, Brokdorf und Krümmel überfluten würde. Die kanarische Insel La Palma wird von Geologen sorgfältig beobachtet, weil dort ein gigantischer Erdrutsch möglich scheint, der die gesamte amerikanische Ostküste in verheerender Weise überfluten könnte - es wäre naiv zu glauben, dass von dieser Flutwelle nichts in die Nordsee gelangen könnte. Island ist vulkanisch sehr aktiv, so dass auch dort die Gefahr eines Tsunamis nicht ausgeschlossen werden kann. Im Jahre 1755 wurde die Stadt Lissabon in Portugal von einem schweren Erdbeben erschüttert und durch einen Tsunami mit etwa 20m Wellenhöhe vollständig zerstört. Im Mittelmeer sind mehrere verheerende Tsunamis durch historische Quellen und geologische Spuren zuverlässig belegt.

Da die Nordsee ziemlich flach ist, würde ein Tsunami schon vor der Küste gedämpft werden. Die Vorwarnzeit würde viele Stunden betragen, in denen man ins Landesinnere fliehen könnte, zur Not sogar mit dem Fahrrad. Kernkraftwerke müssten gegen Überflutung gesichert sein, doch das sind sie nicht, weil die oben geschilderten Auslöser für Tsunamis in Abrede gestellt werden.

3.2.3 Warum kann man sich nicht vor allen denkbaren Unfällen schützen?

Das Beispiel der Abklingbecken in Fukushima zeigt, dass man noch so viele Eventualitäten durchdenken kann - irgendetwas wird immer übersehen [5]. Nun ist es zweifellos so, dass man zwar aus Unfällen lernt, aber dass die nuklearen Katastrophen nicht absichtlich herbeigeführt werden können, um die Sicherheit von Kernkraftwerken zu verbessern. Es gibt keinen Crashtest für Kernkraftwerke!

Ein weiterer Aspekt sind die Kosten der Sicherheitseinrichtungen. Gewiss könnte man für das Abklingbecken einen eigenen Sicherheitsbehälter bauen, und man könnte an Stelle einer elektrisch betriebenen Pumpe mit 70bar Druck einen Wasserturm von 700m Höhe bauen, aus dem das Wasser im Falle eines vollständigen Ausfalls der Kühlung über ein Handventil in den Reaktor gepresst werden könnte, und man wird noch Hunderte von Verbesserungsmöglichkeiten finden, die in der Summe das Kernkraftwerk so teuer machen, dass es unwirtschaftlich wäre. Die Protagonisten der Kernenergie behaupten, dass man ver-

besserte Reaktoren bauen könne, die man ganz ohne Wasserpumpen nach einer Schnellabschaltung sicher kühlen könne [6] - man fragt sich dann, warum man darauf nicht schon in den 1970er und 1980er Jahren gekommen ist, schließlich ist die dazu notwendige Physik und Technik schon seit Jahrzehnten bekannt, und der Totalausfall aller Pumpen wurde als Katastrophenszenario immer wieder in die kritische Betrachtung der Kernenergie eingebracht. Man muss also klar sagen: Es werden nicht alle möglichen, sondern nur die finanzierbaren Sicherheitseinrichtungen eingebaut.

3.2.4 Wie können aus abgebrannten Brennelementen Atombomben gebaut werden?*

Beim Betrieb des Reaktors entsteht aus dem Uran-Isotop U-238, welches an sich nicht an der Kernreaktion beteiligt ist, durch Neutroneneinfang und weitere Kernreaktionen Plutonium, Pu-239. Das Plutonium kann auf chemischem Wege abgetrennt werden. Dieser chemische Prozess ist wegen der Radioaktivität recht aufwändig, aber einfacher zu bewerkstelligen, als die Anreicherung von U-235. Es ist eine berechtigte Befürchtung, dass Staaten, die in den Besitz einer Atombombe gelangen wollen, diese Möglichkeit für die Erzeugung von bombenfähigem Material nutzen könnten. Die militärisch Nutzung der Kernenergie ist von der zivilen Nutzung in Kernkraftwerken nicht zu trennen. Da im längeren Reaktorbetrieb auch ein anderes Plutonium-Isotop, Pu-240, entsteht, muss zur Gewinnung von waffenfähigem Plutonium das betreffende Brennelement relativ schnell ausgetauscht werden.

3.2.5 Kann ein Reaktor wie eine Atombombe explodieren?*

In einer Atombombe werden Uran-235 oder Plutonium-239 sowie eine Neutronenquelle durch konventionellen Sprengstoff zusammengepresst; dadurch wird ein erheblicher Anteil des nuklearen Sprengstoffes sofort gespalten, und die Temperatur erreicht viele Millionen Grad Celsius. Alle Spaltprodukte werden in die Umgebung freigesetzt. Es sind wenige Kilogramm, die aber eine verheerende Wirkung haben, weil die Menschen in der Nähe der Explosion der intensiven Radioaktivität der kurzlebigen Zerfallsprodukte ausgesetzt sind. In einem Kernreaktor kann das nicht passieren, weil beim Einsetzen der unkontrollierten Kettenreaktion der Reaktorkern sofort auseinander fliegen würde, ohne dass ein nennenswerter Teil des Urans spaltet. Die Auswirkungen auf Umwelt und Menschen sind dennoch verheerend, weil die Menge an radioaktiven Spaltstoffen aus vielen Monaten Betrieb viel größer ist als bei einer Atombombe.

4 Optionen für die Elektrizitätserzeugung

4.1 Ersatz von Kernkraftwerken

4.1.1 Was muss beim Ersatz von Kernkraftwerken beachtet werden?

Das zur Zeit wichtigste Argument für Kernkraftwerke ist die Möglichkeit, Elektrizität ohne nennenswerte CO₂-Emission zu erzeugen. Daher kommen als Ersatzlösung auf lange Sicht nur regenerative Kraftwerke in Frage. Für einen schnellen Ausstieg aus der Kernenergie müssen die bestehenden Kraftwerke mit Kohle- und Gasfeuerung stärker ausgelastet werden und ggf. müssen auch neue Kraftwerke gebaut werden. Dadurch steigt die CO₂-Emission für die Elektrizitätserzeugung an. Mit internationalen Verträgen hat sich Deutschland zur Senkung des CO₂-Ausstoßes verpflichtet, und für die Begrenzung des Treibhauseffektes ist es unabdingbar, dass diese Verträge erfüllt werden. Daher müssen Einsparmaßnahmen in anderen Bereichen forciert werden. Sehr großes Einsparpotential besteht im Bereich der Wohnraumheizung und Warmwasserbereitung, die in Deutschland für 20% der CO₂-Emission verantwortlich ist. Die Modernisierung von Gebäuden mit Isolation der Wände und Dächer sowie die Installation von solarbeheizten Warmwasserspeichern lässt sich für ein individuelles Gebäude innerhalb von wenigen Wochen bewerkstelligen. Im Straßenverkehr würde mit kleineren Fahrzeugen weniger CO₂ emittiert werden, auch ein Tempolimit könnte wirksam beitragen. Solche Maßnahmen sind möglich und im Falle des Tempolimits sofort wirksam, sie sind allerdings unpopulär. Ein dritter, weitgehend unbekannter Bereich ist die Landwirtschaft: Nahrungsmittel, welche nach ökologischen Kriterien angebaut und regional verkauft werden, haben eine erheblich besser CO₂-Bilanz, als Produkte der konventionellen Agrarindustrie.

Befürworter der Kernkraftwerke führen neben der CO₂-Problematik ein weiteres Argument an, welches jedoch gemogelt ist: Kernkraft würden die Grundlast abdecken, und andere Kraftwerksarten wären dazu nicht so gut geeignet. Mit dem Wort Grundlastfähigkeit wird jedoch ein technischer Nachteil umschrieben. Bekanntlich schwankt der Bedarf an Elektrizität im Verlauf des Tages, und zwar so stark, dass man allein wegen dieser Schwankung viele Kraftwerke braucht, die flexibel geregelt werden können. Dazu zählen vor allem Gaskraftwerke und an einzelnen Standorten auch Pumpspeicherkraftwerke, wie z.B. Geesthacht bei Hamburg, 120MW, seit 1958 in Betrieb.

In der öffentlichen Diskussion wird oft behauptet, bei einem Ausstieg aus der Kernenergie müsste Deutschland in noch größerem Maße als bisher „Atomstrom aus Frankreich“ importieren. Die aktuellen Statistiken beweisen jedoch, dass seit 2003 Elektrizität in großem Umfang ins europäische Ausland exportiert wird, wobei Frankreich wechselnd als Exporteur oder Importeur erscheint. [7], [8]. Ein Szenario für den Ausstieg aus der Kernenergie innerhalb der nächsten vier Jahre wurde von der Umweltschutzorganisation Greenpeace erstellt [9].

4.1.2 Warum sind Kohlekraftwerke kein guter Ersatz?

Bei der Verbrennung von Kohle entsteht CO_2 , welches den Treibhauseffekt verstärkt. Zwar entsteht dieses Gas auch bei der Verbrennung von Erdgas und Erdöl sowie bei der Verbrennung von Biogas und Bioalkohol, aber für eine bestimmte Wärmemenge entsteht bei der Kohleverbrennung besonders viel CO_2 . Während Erdgas und Erdöl Wasserstoff enthalten, der zu Wasser reagiert, besteht Kohle aus fast reinem Kohlenstoff. Es gibt technische Ansätze, das CO_2 aus dem Abgas abzutrennen, aber die Endlagerung von CO_2 wirft viele technische Probleme auf und ist mit substanziellen Gefahren verbunden. Ein weiteres Problem sind Fremdstoffe, die in der Kohle enthalten sind und auch mit modernster Filtertechnologie nicht vollständig zurückgehalten werden können. Dazu zählen insbesondere Quecksilber und radioaktive Substanzen. Von den Befürwortern der Kohlekraftwerke wird argumentiert, dass man mit neuen Kohlekraftwerken alte „Dreckschleudern“ ersetzen könne und pro Energieeinheit Elektrizität weniger CO_2 und weniger Schadstoffe freigesetzt würden. Der Wirkungsgrad moderner Anlagen beträgt bis zu 48%, während alte Anlage um die 30% bis 35% erreichen. Man muss bedenken, dass der Neubau eines Kraftwerks mit der Erwartung verbunden ist, dass dieses Kraftwerk dann 40-50 Jahre im Betrieb bleibt.

4.2 Bessere Ausnutzung fossiler Brennstoffe

4.2.1 Was ist ein GuD-Kraftwerk?

Im Abschnitt 1 wurde gesagt, dass ein Wärmemotor umso effizienter ist, je größer der Temperaturunterschied zwischen Einlass und Auspuff des Motors ist. Beim Verbrennungsmotor (Benzin oder Diesel) sowie bei der Flugzeug- und bei der Gasturbine hat man sehr hohe Temperaturen im Kolben bzw. in der Brennkammer. Wir diskutieren hier die Gasturbine als Stellvertreter für alle Verbrennungsmotoren. Die Temperatur von bis zu 1300 Grad Celsius liegt nicht weit unter dem Schmelzpunkt von Eisen, die hohe Temperatur ist ideal im Sinne der technisch erreichbaren Grenze. Das Abgas der Gasturbine ist auch ziemlich heiß. Man kann es innerhalb des Motors nicht weiter abkühlen, weil die durch Verbrennung des Erdgases erzeugte Wärme nach außen transportiert werden muss. Bei der Dampfturbine sind die Verhältnisse anders. Der in die Umgebung ausgestoßene Dampf ist nur 100 Grad Celsius heiß; in der geschlossenen Dampfturbine kann man bei vermindertem Druck den Dampf sogar bis ca. 30 Grad Celsius kühlen, ohne dass Wasser kondensiert. In Bezug auf die niedrige Temperatur ist die Dampfturbine ideal. Das Problem der Dampfmaschine ist die hohe Temperatur, die durch den hohen Druck von erhitztem Wasser begrenzt ist. Mehr als 250bar Druck bei 800 Grad Celsius ist technisch nicht machbar.

Man kann die Nachteile von Gas- und Dampfmaschine beseitigen, in dem man beide Maschinen kombiniert. Die Idee ist schon vor knapp zweihundert Jahren von Sadi Carnot formuliert worden, aber erst seit kurzem werden solche Kombinationen als Gas- und

Dampfkraftwerk gebaut. Die Dampfturbine wird ohne zusätzlichen Treibstoff mit dem heißen Abgas der Gasturbine beheizt. Beide Turbinen können gemeinsam mit dem Dynamo verbunden sein, wodurch die Anlage kompakt und preiswert ist. Die Ausnutzung des Erdgases beträgt in der GuD- Anlage bis zu 60%, im Vergleich zu jeweils rund 40-50%, die man mit den Komponenten jeweils allein erreichen würde. Das GuD-Prinzip erfordert Erdgas als Brennstoff, weil Erdöl und Kohle jeweils zu viele Verunreinigungen enthalten. Als alternativer Brennstoff dient Biogas, welches genau wie Erdgas hauptsächlich aus Methan besteht, sowie in Zukunft auch Wasserstoff, der ebenfalls sehr heiß verbrennt und neben dem Wasserdampf keine aggressiven Abgase produziert²

Ein neues Erdgas-GuD-Kraftwerk erzeugt im Vergleich zu einem neuen Kohlekraftwerk viel weniger CO₂: Zum einen wird der Brennstoff um die Hälfte besser ausgenutzt, zum anderen entsteht pro Wärmeinheit weniger CO₂. Insgesamt ist der CO₂-Ausstoß pro kWh Elektrizität beim Kohlekraftwerk doppelt so hoch wie beim GuD-Gaskraftwerk, so dass allein aus diesem Grund das Kohlekraftwerk keine Option für die Zukunft ist. Hinzu kommen noch die Giftstoffe im Abgas der Kohlefeuerung, die sich nicht komplett ausfiltern lassen. Die Abgasreinigung ist beim Gaskraftwerk bedeutend einfacher und wirkungsvoller.

4.2.2 Was ist Kraft-Wärme-Kopplung?

Es liegt nahe, die aus dem Kraftwerk ausströmende Wärme nicht in Kühltürme oder Flüsse zu leiten, sondern zum Heizen von Wohnungen zu verwenden. An vielen Orten geschieht das durch ein sogenanntes Fernwärmenetz, in dem Wohnungen und Industrieanlagen mit der Abwärme des Kraftwerkes beheizt werden.

Fernwärmenetze sind sehr aufwändig im Aufbau. Es wäre undenkbar, eine Stadt wie Hamburg oder Berlin in wenigen Jahren flächendeckend mit Leitungen für heißes Wasser auszustatten. Seit kurzem gibt es eine Alternative [10]: Man ersetzt die konventionelle Erdgasheizung in Wohnhäusern durch einen Motor mit Dynamo. Dieser Motor wird genau wie eine einfache Heizung an- und ausgeschaltet, um mit seiner Abwärme das Wasser der Heizungsanlage aufzuwärmen. Gleichzeitig treibt der Motor einen Generator an, welcher Elektrizität erzeugt, die in das Netz eingespeist wird. Der Hausbesitzer muss nun mehr Erdgas kaufen, weil ja ein Teil für die Elektrizitätserzeugung aufgebraucht wird. Da Elektrizität pro kWh viel teuer ist als Erdgas, lohnt sich das finanziell. Nun wäre es ungünstig, wenn alle Motoren zufällig zur gleichen Zeit anspringen würden, dann hätte man ein Überangebot an Elektrizität. Es ist daher günstig, den genauen Start- und Stop-Zeitpunkt zentral zu steuern, und zwar nach dem Elektrizitätsbedarf im Netz. Für eine individuelle Heizungsanlage ist es ziemlich egal, ob ein Motor um 11:00 Uhr oder um 13:00 den Wärmespeicher im

²Streng genommen ist Wasserdampf bei 1300 Grad ziemlich aggressiv, aber Wasser entsteht auch bei der Verbrennung von Methan, worauf die Turbine bereits ausgelegt ist.

Haus auffüllt, für die Elektrizitätsversorgung ist diese Flexibilität jedoch sehr wertvoll.

4.2.3 Kann man GuD und Kraft-Wärme-Kopplung kombinieren?*

In Bezug auf die Ausnutzung des Erdgases für die Elektrizitätserzeugung ist das GuD-Kraftwerk nach dem heutigen Stand der Technik optimal. In vielen Anlagen kann ein Teil des Dampfes vor der Dampfturbine für eine bereits bestehende Fernwärmanlage abgezweigt werden. Dann sinkt die Ausnutzung in Bezug auf die Elektrizität. Aus physikalischer Sicht ist es optimal, wenn die ausströmende Wärme des Elektrizitätswerkes Umgebungstemperatur hat und Wohnraumheizungen durch gute Isolation überflüssig gemacht werden. Praktisch wird es nicht möglich sein, auf alle Wohnraumheizungen zu verzichten, und dann muss man die gesamte Menge Erdgas betrachten, die zur Elektrizitätserzeugung und zur Wohnraumheizung gebraucht wird. Aus dieser praktischen Sicht ist die Ausnutzung des Erdgases bei einer GuD-Anlage mit Fernwärmeabgabe noch besser als ohne Fernwärmeabgabe.

4.3 Regenerative Kraftwerke

4.3.1 Was ist eine regenerative Energiequelle?

Die Nutzung von Sonne, Wind und Wasserbewegung für den Antrieb elektrischer Generatoren nennt man eine regenerative Energiequelle, weil man diesen Antrieb immerfort nutzen kann, ohne einen Vorrat zu verbrauchen. Kraftwerke, die so arbeiten, nennen wir kurz *regenerative Kraftwerke*.

4.3.2 Warum kann man nicht alle Kernkraftwerke sofort durch regenerative Kraftwerke ersetzen?

Kernkraftwerke haben eine elektrische Leistung bis zu 1600MW. Jedes Kraftwerk deckt ein Prozent des gesamten Bedarfs an Elektrizität ab, d.h. die Erzeugung geschieht konzentriert an wenigen Orten, während der Verbrauch über das Land verteilt ist. Die Struktur des Netzes von Stromleistungen ist darauf ausgelegt. Regenerative Kraftwerke sind wie die Verbraucher stärker verteilt; allerdings kann nicht jeder Verbraucher mit dem nächstgelegenen Kraftwerk versorgt werden, weil die Einspeisung einer einzelnen Solar- oder Windanlage stark von den Wetterbedingungen abhängt. Das Netz der Stromleitungen muss also eine andere Struktur bekommen und es müssen zusätzliche Leitungen gebaut werden. Das betrifft nicht nur die Hochspannungsleitungen, sondern auch die Verteilungen vor Ort, weil ja zunehmend Solaranlagen auf den Dächern von Privat- und Industrieverbrauchern installiert werden. Aus technischer Sicht wäre der Neubau von Solar- und Windanlagen mit passenden Stromleitungen sicher schneller zu bewerkstelligen als der Neubau von Gaskraftwerken. Schwierigkeiten entstehen vor allem durch langwierige Planungs- und Genehmigungsver-

fahren.

4.3.3 Wie kann man Elektrizität speichern?

Die Speicherung von Elektrizität hat auf dem heutigen Stand der Technik einen geringen Anteil an der Elektrizitätsversorgung. Die Möglichkeiten sind vielfältig, wobei lediglich das Pumpspeicherkraftwerk praktische Bedeutung hat. Ein Pumpspeicherkraftwerk ist ein Stausee ohne natürlichen Zufluss. Bei einem Überangebot von Elektrizität (z.B. bei hoher Windstärke) wird der See mit elektrisch betriebenen Wasserpumpen aufgefüllt, bei hohem Bedarf wird das Wasser über eine Wasserturbine mit Dynamo abgelassen. Man kann die Pumpspeichertechnik auch mit gewöhnlichen Stauseen kombinieren, wenn die Geographie ein tief gelegenes Vorratsbecken erlaubt. Mit einem Paar Speicherseen (oberer und unterer Speicher) von 3km Durchmesser, 100m Höhendifferenz zwischen den Speichern und 10m Wassertiefe kann man 12 Stunden lang eine Leistung von 1400MW abgeben - äquivalent zu einem Kernkraftwerk.

In Zukunft können Elektroautos eine wichtige Rolle spielen. Zunächst erscheint es widersinnig, in einer Phase knapper Kraftwerkskapazität die Einführung zusätzlicher Verbraucher vorzuschlagen, aber sobald genügend regenerative Kraftwerke gebaut sind, erscheinen Elektroautos in vielfacher Hinsicht sinnvoll, in unserem Zusammenhang als Speicher für Elektrizität. Die Batterien aller Autos zusammen genommen bilden eine sehr große Batterie. Zwar macht es keinen Sinn, aus diesen Batterien Elektrizität für das Netz zu entnehmen, denn die Besitzer möchten ihr Auto möglichst voll geladen haben. Aber man kann den Zeitraum der Aufladung so steuern, dass er in Zeiten eines Überangebots liegt. Typischerweise ist das in den Nachtstunden, was für die meisten Nutzer die normale Aufladezeit ist. Es dürfte den meisten Nutzern egal sein, ob ihr Auto zwischen 1:00 und 2:00 Uhr nachts oder von 5:00 bis 6:00 Uhr morgens geladen wird, auch Unterbrechungen sind möglich. Für dieses Konzept ist ähnlich wie bei den Kleinkraftwerken eine zentrale Steuerung nötig.

4.3.4 Wie kann man mittelfristig die gesamte Elektrizität aus regenerativen Quellen gewinnen?

Heute werden rund 15 % der Elektrizität durch regenerative Kraftwerke produziert. Für die Vollversorgung müsste die Zahl der Anlagen versiebenfacht werden. Das ist technisch möglich, und es würde bei seriösen Abschätzungen etwa 20 Jahre dauern. Die Vorhersagen für die Umstellung sind zwar sehr unterschiedlich, aber man kann auf ehemalige Zukunftsprognosen von 1990 für 2010 zurückblicken. Die Tatsache, dass die größten Optimisten die besten Prognosen abgegeben haben, macht Hoffnung, denn diese Institute und Organisationen haben ihre Glaubwürdigkeit unter Beweis gestellt. Neben den regenerativen Kraftwerken selbst ist eine grundlegende Umgestaltung des Elektrizitätsnetzes erforderlich und es

müssen Speicher mit hoher Kapazität gebaut werden.

Die vollständige Umstellung auf regenerative Kraftwerke wird in der Landschaft deutlich sichtbar und die Kosten werden für Alle spürbar sein. Dafür entfällt das Risiko einer radioaktiven Verseuchung durch die ersetzten Kernkraftwerke. Es ist wie bei einer Versicherung: Man zahlt regelmäßig eine kleine Summe, um das finanzielle Risiko eines großen Unglücks abzusichern. In diesem Fall hat man aber noch mehr davon: Während eine Unfallversicherung nur die Folgen absichert, wird beim Ausstieg aus der Kernenergie auch die Möglichkeit des Unfalls selbst ausgeschlossen. Es ist erstaunlich, wie gering die Bereitschaft in der Bevölkerung ist, höhere Elektrizitätspreise hinzunehmen, während für Versicherungen gegen Schäden und Unfälle jährlich 55 Milliarden Euro ausgegeben werden [11].

4.3.5 Müssten wir Energie sparen, wenn alle Kraftwerke regenerativ wären?

Ja. Es wurde schon angesprochen, dass Wind- und Solarkraftwerke sowie Pumpspeichieranlagen die Landschaft beeinträchtigen. Es gibt zudem einen physikalischen Grund. Eine einzelne Windmühle ist für den Wind ein kleines Hindernis, welches keine sichtbaren Auswirkungen hat. Bei einer sehr großen Anzahl der Windanlagen wird der Wind jedoch so stark abgebremst, dass es Auswirkungen auf das Wettergeschehen haben kann. Bei einer Solaranlage liegt der Boden unter den Kollektoren im Schatten und ist kühler als bei direkter Sonneneinstrahlung. Dadurch kann ebenfalls das Wetter beeinflusst werden. Entsprechende Argumente kann man für alle regenerativen Kraftwerke anführen, es gilt immer das folgende Prinzip: Am Ort des Kraftwerks entsteht weniger Wärme, die dafür am Ort des Elektrizitätsverbrauchers erzeugt werden kann.

Für unsere Zukunft ist es wichtig, die zum Leben notwendigen und wünschenswerten Prozesse mit dem geringstmöglichen Aufwand zu gestalten. Unumkehrbare Vorgänge, die für ein bestimmtes Ziel nicht unbedingt notwendig sind, müssen vermieden werden.

Literatur

- [1] Friedrich Herrmann. *Der Karlsruher Physikkurs*. Aulis, Köln, 1989.
- [2] F. L. Curzon and B. Ahlborn. Efficiency of a carnot engine at maximum power output. *American Journal of Physics*, 43(1):22–24, 1975.
- [3] Radioaktivitätsmessnetz des Bundesamts für Strahlenschutz, Postfach 10 01 49, D-38201 Salzgitter. <http://odlinfo.bfs.de>.
- [4] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan. Nuclear Safety Division, Disaster Prevention Network for Nuclear Environments. www.bousai.ne.jp/eng/.

- [5] Charles Perrow. *Normale Katastrophen : die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*. Campus-Verl., Frankfurt [u.a.], 2. edition, 1992.
- [6] Weston M. Stacey. *Nuclear reactor physics*. WILEY-VCH, Weinheim, 2007.
- [7] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Mohrenstraße 58, 10117 Berlin. www.ag-energiebilanzen.de.
- [8] Statistisches Bundesamt, Gustav-Stresemann-Ring 11, 65189 Wiesbaden. www.destatis.de.
- [9] Greenpeace e. V., Große Elbstraße 39, 22767 Hamburg. www.greenpeace.de.
- [10] ZuhauseKraftwerk der LichtBlick AG, Zirkusweg 6, 20359 Hamburg. www.lichtblick.de.
- [11] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Wilhelmstraße 43/43G, 10117 Berlin. www.gdv.de/DatenUndFakten/Gesamtmarkt/inhalt.html.