

Joachim Kahlert

Unheimliche Energie

Kernspaltung
zwischen Bombe
und Kraftwerk

Beltz Verlag
Weinheim und Basel 1984

Inhaltsverzeichnis

Unsere radioaktive Umwelt 5

Unfühlbar heißt nicht wirkungslos 5 Wieviel Strahlung kann man verkraften? 7 Es strahlt die Erde, das traute Heim - und unser Körper 10

Im Inneren zerfällt - ein Teil der Welt. Radioaktive Atomkerne 14

Professor Röntgens durchdringende Entdeckung 15 Bilder auf verpacktem Fotopapier 17 Strahlungsquellen - versteckt wie Nadeln im Heuschaber. 18 Eine runde Sache - die alte heile Welt der Atome 20 „... die Radioaktivität bringt alles durcheinander“ 23 Ein paar harte Brocken in gähnender Leere - ein neues Atommodell muß her 24 Der Kern der Sache - das Atom nimmt Gestalt an 26 Spontane Atomkernumwandlungen - die Quelle der Radioaktivität 28 Zwischen Sekundenbruchteilen und Ewigkeiten - die Halbwertszeit 30

Der Atomkern als Energiepaket 33

Atomrümpfe pflastern ihren Weg - die Wirkung der Strahlung auf Materie 33 Wie kommt man 'ran an die Energie? 36 Atomkerne unter Beschuß - die erste künstliche Atomkernumwandlung 37 Das Neutron als Werkzeug der Atomkernbastler 38 Das Energiepaket wird geknackt - die Atomkernspaltung 39 Hektik in der Atomwelt - die Kettenreaktion 40

Fehlschaltung - von der Atomkernspaltung zur ersten

Atombombe 43

Atomwaffen für Hitler? 43 Uran gibt noch keinen Bombensprengstoff 45 Anreichern oder Brüten? Zwei Wege zur Atombombe 48 Wettlauf gegen ein Phantom - die Fertigstellung der ersten Atombombe 52 Atombomben auf Japan? 54 Hiroshima und Nagasaki 55

Fortschritte zum Ende der Welt? Die Weiterentwicklung

von Atomwaffen 58

Hitze, Druck und Radioaktivität - die Vernichtungswirkung von Atomwaffen 58 Mit Bombenstarts in den Rüstungswettlauf 64 Das erste Etappenziel: Die Was-

serstoffbombe 65 Es geht auch handlicher – Atomwaffen für das Schlachtfeld
Bundesrepublik 69 Leben zerstören – Gebäude erhalten. Die Neutronen-
bombe 71

Neutronengewimmel unter Kontrolle – die Atomkernspaltung im Kernkraftwerk 74

Geheimniskrämerei und kühne Pläne – die Anfänge der Kernenergienutzung in
Kernkraftwerken 74 Energiefreisetzung häppchenweise – die Zähmung der
Kettenreaktion 78 Kernkraftwerke made in Germany – mit Nachhilfe aus
Amerika 81 Flipper mit Neutronen – die Steuerung der Kettenreaktion im
Leichtwasserreaktor 84 Von der Atomkernspaltung zum elektrischen Strom – die
Energieumwandlungskette 86 Doppelt hält besser – die Sicherheitstechnik 89
Vielseitige Neutronen – die Arbeitsweise des Schnellen Brüters 92 Ein Haufen
Kohlekugeln mit heißer Füllung – Der Hochtemperaturreaktor 95 Wer soll das
bezahlen ...? 96

Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer Kummer 98

Nach Gebrauch ein heißes Eisen – die abgebrannten Brennstäbe 98 Abgebrannt
heißt nicht wertlos – die Wiederaufarbeitung 99 Große Pläne für die Atommüll-
abfuhr ... 101 ...Entsorgung aus dem Stegreif 102 Wie riskant ist ungefähr-
lich – der Streit um die Kernkraftwerke 104 Strahlenangst läßt sich nicht weg-
rechnen 108 Halbwahrheiten verunsichern ganz 111 Vorhersage oder Herbei-
gerede? Die Energielücke 112

Büchertips und Anschriften 117

Verzeichnis der Abbildungen 120

Unsere radioaktive Umwelt

Schmerzen – wie oft schon haben sie jeden von uns gequält!

Ein kranker Zahn verdirbt einem tagelang die Stimmung, an heißen Mahlzeiten verbrennt man sich die Zunge, und mit dem Finger zwischen der zufallenden Tür und dem Rahmen soll mancher schon die Engel singen gehört haben.

Doch so sehr uns Schmerzen manchmal plagen mögen, sie sind eine Warnung vor Gefahren für unsere Gesundheit. Ohne Schmerzempfinden würde es uns mit vielen Gefahren für unseren Körper genauso ergehen wie mit der Radioaktivität: Man spürt sie nicht, aber man kann an ihren Folgen leiden – unter Umständen erst nach vielen Jahren.

Unfühlbar heißt nicht wirkungslos

Diese Erfahrung mußten auch Pierre und Marie Curie machen, die Ende des vorigen Jahrhunderts mit der Erforschung der gerade entdeckten Radioaktivität begonnen hatten.

Wochenlang war den radioaktiven Stoffen, mit denen das Forscher Ehepaar arbeitete, nichts anzumerken gewesen. Weder konnte man den Stoffen etwas Außergewöhnliches ansehen, noch fühlte man eine besondere Wirkung oder gar Schmerzen, wenn man sie berührte. Aber hin und wieder bildeten sich Schuppen an den Händen, die Fingerkuppen schmerzten, manchmal entzündete sich die Haut und löste sich ab.

Um die Wirkung der Radioaktivität auf lebendes Gewebe näher zu untersuchen, setzte Pierre Curie stundenlang seinen Arm der Strah-

lung von Radium aus, einer neu entdeckten stark radioaktiven Substanz:

„Die Haut hat sich auf einer Oberfläche von sechs Quadratcentimetern gerötet; das Aussehen ist dem einer Verbrennung ähnlich, doch ist die Haut nicht oder kaum schmerzhaft. Nach einigen Tagen begann die Rötung stärker zu werden, ohne sich auszubreiten: am zwanzigsten Tag bildeten sich zuerst Krusten, dann eine Wunde, die man mit Verbänden behandelte ...“ (Notizen von Pierre Curie aus dem Jahre 1900).

Marie Curie erlitt ähnliche Verbrennungen, als sie geringe Mengen des Radiums, doppelt verpackt in einem Glasröhrchen und einer Metalldose, bei sich trug.

Aber die radioaktive Belastung der Curies beschränkte sich nicht auf den direkten Kontakt mit den untersuchten Stoffen. Ihre Meßgeräte zeigten bald an, daß mit der Zeit sämtliche Laborgeräte, Notizblöcke, ihre Kleidung, ja selbst die Luft im Labor radioaktiv geworden war.

Einen Grund zur Beunruhigung sahen die Curies darin offenbar nicht. Zwar litt Pierre Curie bis zu seinem Unfalltod (1906) immer häufiger an Schmerzanfällen, doch seine Ärzte führten die Schmerzen auf Rheumatismus zurück. Erst als Marie Curie zwanzig Jahre später über Sehstörungen und Ohrensausen klagen mußte, schöpfte sie Verdacht, daß ihre Gesundheit unter der ständigen Strahlenbelastung gelitten haben könnte. Weitere 14 Jahre später, 1934, starb Marie Curie an einer Blutkrankheit. Ihre Ärzte zweifelten damals nicht mehr daran, daß diese Krankheit viele Jahre zuvor durch die hohe Strahlenbelastung ausgelöst worden war.

Nichts bemerkt hatten 1954 auch die Mitarbeiter des John-Wayne-Films „Der Eroberer“. Für die Außenaufnahmen dieses Films waren sie in der Wüste Nevada, USA, zusammengekommen, in der Nähe des amerikanischen Testgebiets für Atomwaffen.

In den nächsten 20–25 Jahren erkrankten 91 der 150 Teammitglieder an Krebs; bis Ende 1982 sind 46 von ihnen daran gestorben, unter anderen auch John Wayne 1979.

Sowohl die Curies als auch die Filmleute waren während ihrer Arbeit sehr hohen Strahlenbelastungen ausgesetzt gewesen.

Aber man muß weder als Strahlenforscher arbeiten, noch in radio-

aktiv verseuchten Gegenden herumtollen, um von Strahlung betroffen zu sein, denn:

Radioaktivität ist überall.

Im Boden, in der Atemluft, in den Gemäuern der eigenen vier Wände, in Obst, Gemüse, Fleisch und Fisch, sogar im Mineralwasser.

Die Strahlung trifft unseren Körper von außen, wir atmen radioaktive Teilchen ein, nehmen sie mit der Nahrung auf und speichern sie zum Teil im Körper. Deshalb strahlen auch wir selbst.

In der Regel merken wir von all dem nichts. Die Strahlung ist nicht zu sehen und nicht zu fühlen, sie hinterläßt auch keine unmittelbaren Spuren. Dennoch hat sie ihre Wirkung auf Mensch und Tier schon seit Ewigkeiten.

Die Umweltstrahlung ist so alt wie die Erde selbst, sie ist eigentlich ganz natürlich. Das heißt aber nicht, harmlos.

Wieviel Strahlung kann man verkraften?

Wenn Strahlung auf Körpergewebe trifft, kann sie das Gewebe verändern oder zerstören. Schwache Strahlung beschädigt nur wenig Gewebe, der betroffene Mensch spürt zunächst nichts. Stärkere Strahlung kann aber so viele Gewebezellen zerstören, daß sich dieses als Krankheit bemerkbar macht. In leichten Fällen treten Hautrötungen und Trübung der Augenlinse auf, schwere Strahlenvergiftungen führen zu Haarausfall, Übelkeit, Erbrechen, Blutungen und im Extremfall - zum Tod.

Schwache Strahleneinwirkungen können das Körpergewebe so verändern, daß Krebswucherungen auftreten. Leukämie, eine Bluterkrankung mit oft tödlichem Ausgang, kann ebenfalls durch geringe Strahlenbelastung ausgelöst werden. Wenn Strahlung auf Fortpflanzungsorgane trifft, besteht die Gefahr, daß die gespeicherten Erbinformationen im männlichen Samen oder in der weiblichen Eizelle verändert werden und die Nachkommen der bestrahlten Personen an Mißbildungen leiden.

Die Schädlichkeit von Radioaktivität für den Menschen richtet sich jedoch nicht allein nach der Intensität der Strahlung. Wie sich

eine bestimmte Strahlung auswirkt, hängt von der Herkunft der Strahlung, ihrer zeitlichen Dauer und vor allem vom Körperteil ab, das von der Strahlung getroffen wird. So wird das Gewebe von Lunge, Leber, Magen, Dickdarm, Schilddrüse und Gehirn eher von Strahlung geschädigt als das Muskelgewebe.

Um die gesundheitlichen Folgen von Radioaktivität zu beurteilen, genügt es daher nicht, nur die Stärke der Strahlung zu kennen. Vielmehr muß die Strahlung je nach Herkunft, Zeitdauer und Art des Gewebes, auf das sie trifft, unterschiedlich stark bewertet werden.

Nach zahlreichen Untersuchungen über die Wirkung von Radioaktivität auf lebendes Gewebe hat man sich international auf Bewertungsgrößen für die verschiedenen Bedingungen der Strahleneinwirkungen geeinigt. Unterschiedliche Arten der Strahlenbelastung sind somit vergleichbar geworden. Die festgelegten Vergleichszahlen für die Belastung des Menschen durch Radioaktivität nennt man *Äquivalentdosis* (Äquivalenz = Gleichwertigkeit; Dosis = Menge, Größe).

Die Äquivalentdosis ist ein auf Erfahrung beruhendes Maß für die gesundheitliche Auswirkung von radioaktiver Strahlung.

Die Maßeinheit für die Äquivalentdosis ist das Rem* (rem).

$$1 \text{ rem} = 1000 \text{ Millirem (mrem)}$$

* Ab 1.1.1986 soll die Einheit Rem durch die Einheit Sievert (Sv) zu Ehren eines schwedischen Strahlenforschers ersetzt werden. Es gilt: 1 Sievert = 100 Rem.

In der Tabelle auf S. 9 wird man vergeblich nach Angaben darüber suchen, ab wann eine Strahlenbelastung *Langzeitschäden* wie Krebs, Leukämie oder Mißbildungen hervorruft.

Es gibt keine gesicherten Angaben darüber!

Da man Strahlung nicht spürt und sich Krebs und Leukämie oft erst Jahrzehnte nach Einwirkung der Strahlung bemerkbar machen, können Ärzte niemals mit Sicherheit feststellen, wann und wodurch bei einem Menschen die Erkrankung ausgelöst worden ist.

Auswirkungen verschiedener Strahlenbelastungen auf den Menschen

Kurzzeitige Strahlenbelastung des ganzen Körpers	Auswirkungen bei den betroffenen Personen
bis 20 rem	keine sofort erkennbare Wirkung
bis 50 rem	geringe Veränderung im Blutbild
bis 120 rem	einige der bestrahlten Menschen leiden unter Übelkeit, Erbrechen und Müdigkeit
bis 170 rem	Zunahme der Zahl der Personen, die unter Übelkeit und Erbrechen leiden. Vereinzelt tritt Haarausfall auf.
bis 260 rem	Die meisten Menschen leiden unter Übelkeit und Erbrechen. Einzelne Todesfälle sind möglich.
bis 350 rem	Fast alle Menschen erbrechen. Jeder Fünfte der bestrahlten Menschen stirbt innerhalb von 2–6 Wochen. Für die anderen ist Erholung nach 3 Monaten möglich.
bis 500 rem	etwa die Hälfte der bestrahlten Menschen stirbt innerhalb eines Monats. Überlebende erholen sich nach 6 Monaten.
bis 750 rem	kaum ein Mensch überlebt diese Strahlenbelastung
über 750 rem	keine Überlebenschance

(nach Schultz/Vogt: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes/Koelzer: Lexikon der Kernenergie)

Sicher ist nur, daß jede Belastung durch Radioaktivität, und sei sie noch so gering, Krebs, Leukämie oder Erbschäden auslösen kann. Die natürliche Strahlenbelastung in der Bundesrepublik beträgt für den ganzen Körper durchschnittlich 110 mrem pro Jahr. Diese sehr geringe Strahlenbelastung wird von den meisten Menschen unbe-

schadet überstanden. Aber die Aussage: „natürlich und schwach = harmlos“ hinkt, denn sie vernachlässigt die Zufallstreffer:

Die Bundesregierung schätzt, daß immerhin jede 500. Krebserkrankung auf das Konto der natürlichen Umweltstrahlung geht.

Pro Jahr wären das bei uns etwa 400 Krebsfälle.

Das fällt, bezogen auf die Gesamtbevölkerung von knapp 60 Millionen, kaum auf. Die Betroffenen sehen das sicher anders.

Das Risiko für jeden einzelnen von uns, durch die natürliche Strahlenbelastung Krebs oder Leukämie zu bekommen, ist sehr gering – aber einige Hundert unter uns trifft es jedes Jahr mit Sicherheit.

Es gibt allerdings auch Menschengruppen, die infolge der natürlichen Umweltstrahlung viel häufiger an Krebs erkranken als der Durchschnitt der Bevölkerung.

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts starben Bergarbeiter einer Erzgrube im Erzgebirge (heute: Tschechoslowakei und DDR) auffallend häufig an Lungenkrebs. Unter amerikanischen Arbeitern, die in den fünfziger und sechziger Jahren Uranerz abbauten, trat fünf mal häufiger Lungenkrebs auf als bei Männern im vergleichbaren Alter. Diese Menschen wurden Opfer eines Teils der natürlichen Umweltstrahlung: der *terrestrischen Strahlung* (terra = Erde). In den Bergwerken dieser Arbeiter war die natürliche Umweltstrahlung aufgrund der Gesteinszusammensetzung besonders stark, aber es gibt sie überall, sozusagen auf Schritt und Tritt.

Es strahlt die Erde, das traute Heim – und unser Körper

Lange bevor sich vor 3–4 Milliarden Jahren aus Gas und Staubansammlungen im Weltall die Erde bildete, entstanden die chemischen Elemente, Grundstoffe, aus denen alle uns bekannten Substanzen aufgebaut sind. Einige dieser Elemente, wie zum Teil das Kalium, das Schwermetall Uran und das Metall Thorium sind radioaktiv, von ihnen wird ständig Strahlung ausgesendet.

Da diese Stoffe überall auf der Welt verteilt sind, strahlt die ganze Erde. Und obendrein noch die Luft, denn einige radioaktive Teilchen sind gasförmig, andere schweben, an feinen Staubteilchen angelagert, umher.

Je nach Zusammensetzung des Bodens kann die *terrestrische Strahlenbelastung* erheblich schwanken.

Während die durchschnittliche Strahlenbelastung durch terrestrische Strahlung in der Bundesrepublik 50 mrem pro Jahr beträgt, erreicht sie im französischen Zentralmassiv 250 mrem, an der brasilianischen Atlantikküste bis zu 1000 mrem und an der Südwestküste Indiens sogar bis zu 4000 mrem. Die hohen Belastungen in Brasilien und Indien sind auf die dortigen Vorkommen an Monazit zurückzuführen, einem Mineral, das einen hohen Anteil des radioaktiven Metalls Thorium enthält.

Da hierzulande kaum jemand in Blockhütten oder sonstigen Holzhäusern wohnt, schleppen wir uns die radioaktiven Teilchen mit den Baustoffen auch noch ins Haus. Die terrestrische Strahlenbelastung in der Bundesrepublik ist daher im Haus mit durchschnittlich 57 mrem pro Jahr größer als draußen (43 mrem).

Und weil radioaktive Teilchen von Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und dann von Tieren gefressen werden, ist Radioaktivität auch bei jeder Mahlzeit mit dabei.

Die durch Nahrung und Atemluft aufgenommenen radioaktiven Teilchen gelangen über die Lunge und den Darm ins Blut und setzen sich zum Teil im Körper fest. In der Fachsprache wird die Aufnahme und Ablagerung von Radioaktivität *Inkorporation* genannt. Auf 30 mrem Eigenstrahlung bringt es unser Körper durch die eingebauten radioaktiven Teilchen pro Jahr.

Durchschnittliche Strahlenbelastung von Körperteilen
durch eingelagerte natürliche radioaktive Teilchen
in mrem pro Jahr

<i>Knochen</i>			
<i>Hoden bzw. Eierstöcke</i>	<i>Knochenhaut</i>	<i>Knochenmark</i>	<i>Bronchien</i>
26–30	113–133	48–53	200–400

(aus: Bundesminister des Innern, 1979, S. 19)

Da sich die radioaktiven Stoffe an einigen Körperstellen bevorzugt niederlassen, treten für einige Organe wesentlich höhere Belastungen auf.

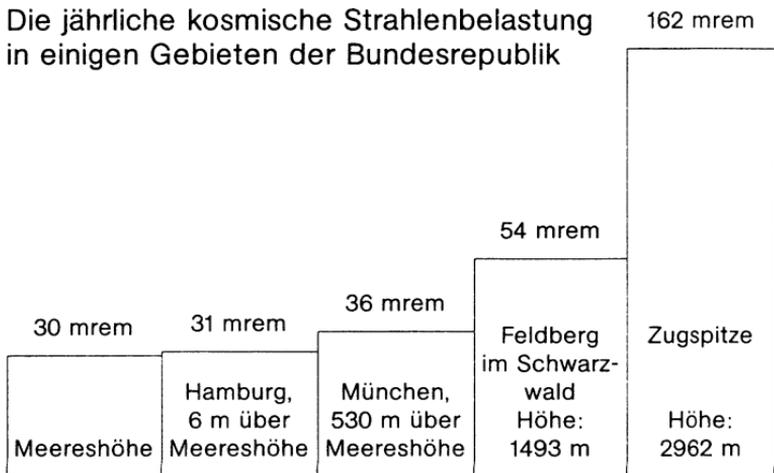
Zu all dem bekommen wir noch zusätzlich Strahlung im wahrsten Sinne des Wortes aufs Dach: die *kosmische Strahlung*.

Winzige, elektrisch geladene Teilchen, die vermutlich von der Sonne und von anderen Sternen ausgeschleudert werden, jagen in dichten Strömen durch das Weltall. Auch unsere Erde ist einem Dauerbeschuß dieser Teilchen ausgesetzt, die ununterbrochen mit Geschwindigkeiten bis zu 3000 km pro Sekunde auf die Lufthülle der Erde prasseln.

Dort hinterlassen sie einen Trümmerhaufen: Stickstoff und Sauerstoffteilchen der Luft werden von der kosmischen Schrottladung zerschlagen. Ihre Trümmerstücke bilden einen wahren Schauer radioaktiver Teilchen, die zum Teil den Erdboden – und somit auch uns – erreichen.

Auf Meereshöhe beträgt die kosmische Strahlenbelastung pro Jahr bei uns durchschnittlich 30 mrem, mit zunehmender Höhe wird sie stärker.

Die jährliche kosmische Strahlenbelastung in einigen Gebieten der Bundesrepublik



(Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen)

Was man auch unternimmt, der natürlichen Strahlenbelastung sind wir mehr oder weniger ausgeliefert.

Man kann mittlerweile erklären, woher sie stammt, wodurch sie entsteht und wie sie wirkt – ändern läßt sich an ihr nichts.

Als Naturwissenschaftler vor fast 90 Jahren damit begonnen hatten, die Quelle der Strahlung im Inneren der Materie aufzuspüren, krepelten ihre Entdeckungen zunächst die damaligen *Vorstellungen* von den kleinsten Bausteinen unserer Welt gründlich um. Als es ihnen schließlich sogar gelang, am Aufbau der Materie selbst herumzubasteln, trugen ihre Forschungsergebnisse dazu bei, *das Leben* auf unserer Welt gründlich zu verändern. Aber das war nicht mehr allein Sache der Physiker.

Im Inneren zerfällt – ein Teil der Welt. Radioaktive Atomkerne

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts staunten Jahrmarktsbesucher nicht schlecht über die Vorführung des Bonner Glasbläfers Heinrich Geißler.

Der vielseitige Handwerker hatte in die Enden einer selbst geblasenen Glasröhre Metallstückchen eingeschmolzen, die Röhre mit Gas gefüllt und anschließend mit einer eigens von ihm gebauten Luftpumpe fast leer gepumpt. Legte er nun eine elektrische Stromspannung an die Metallstückchen an, leuchtete das stark verdünnte Gas in der Röhre auf. Je nach Gasart rot, grün, blau oder gelb.

Heute begegnet uns dieses Prinzip täglich in den Leuchtstoffröhren der Schaufenster und Lichtreklamen, damals sahen es die Leute als ein kleines Wunder an.

Vierzig Jahre später brachte eine solche Röhre die ganze Welt zum Staunen.

Während Heinrich Geißler mit den Röhren seine Geschäfte machte, grübelten zahlreiche Naturforscher damals über die Entstehung der Leuchterscheinung nach. In ihren Experimenten mit den Röhren machten sie eine interessante Beobachtung:

Wurde das schon sehr dünne Gas weiter aus der Röhre hinausgepumpt, leuchtete irgendwann nur noch eins der beiden eingeschmolzenen Metallstückchen – und ein winziger Flecken der Glaswand am anderen Ende der Röhre. Ein Blech, das zwischen die beiden leuchtenden Stellen in die Röhre eingebaut wurde, erwärmte sich und hinterließ auf der Glaswand einen scharfen Schatten. Kein Zweifel: irgendeine Art von Strahlung wurde aus dem Metallstückchen herausgeschleudert, prallte auf die gegenüberliegende Glaswand und regte sie zum Leuchten an.

Professor Röntgens durchdringende Entdeckung (1895)

Auch der Würzburger Professor *Wilhelm Röntgen* (1845–1923) hatte sich die Erforschung der Strahlung zur Aufgabe gemacht.

Um seine Röhre von äußeren Lichteinwirkungen abzuschirmen, umwickelte er sie mit schwarzem, lichtundurchlässigem Papier und verdunkelte obendrein noch sein Labor, als er am Abend des 8. November 1895 weitere Untersuchungen anstellen wollte. Kaum hatte er die elektrische Spannungsquelle an seine Röhre angeschlossen, bemerkte er ein mattes grünes Leuchten auf einem in der Nähe befindlichen Pappschild. Die Pappe war mit einer chemischen Verbindung, Bariumplatincyanoxyd, bedeckt, die bei Lichteinwirkung zum Leuchten angeregt wird – ähnlich wie die Ziffernblätter von Uhren.

Aber Licht gab es doch im ganzen Raum nicht, und die Röhre war völlig mit schwarzer Pappe verhüllt!

Röntgen unterbrach den Strom, das Leuchten verschwand – und kehrte zurück, wenn er den Apparat wieder anschaltete. Er drehte die Pappe mit der leuchtstoffbeschichteten Seite von der Röhre weg, doch die Seite leuchtete weiter. Als er Gegenstände zwischen Pappe und Röhre hielt, vielleicht um die Schattenwirkung zu prüfen, wuchs sein Erstaunen: Weder ein Buch, ein Holzbrett noch verschiedene Metallbleche konnten die Leuchterscheinung merklich abschwächen. Und dann folgte der Versuch, dessen Wirkungen heute jedes Kind kennt: Ob Zufall oder Absicht, irgendwie kam seine Hand zwischen Pappe und Röhre, und auf der Leuchtpappe war der Schatten – der Knochen zu sehen.

Sieben Wochen lang arbeitete Röntgen nun fieberhaft in seinem Labor, ohne jemandem von seiner neuen Entdeckung zu berichten. Er ließ sich Mahlzeiten dorthin bringen und stellte sich dort sogar ein Bett auf. Anfang Januar 1896 wußte er so viel über seine neue Entdeckung, daß er sich getraute, sie bekanntzugeben.

In Windeseile ging die Meldung von den durchdringenden Strahlen um die Welt. Bereits 14 Tage später berieten Ärzte auf einem Kongreß über medizinische Anwendungsmöglichkeiten, und nach weiteren zwei Wochen gab es schon die ersten Aufnahmen von Glassplittern im Inneren einer Hand und von Knochenverwachsungen.



Ein Röntgenarzt um die Jahrhundertwende

Sehr primitiv waren zu Beginn der Röntgenmedizin die Aufnahmeapparate. Schutzkleidungen, Abschirmvorrichtungen und Sicherheitsabstände, wie sie heute vorgeschrieben sind, hielt man damals nicht für nötig.

Unter den Fachkollegen löste Röntgens Entdeckung ein wahres Strahlenfieber aus. Obwohl man immer noch keine Erklärung für die Strahlung in der Glasröhre und für Röntgens Entdeckung gefunden hatte, hofften zahlreiche Forscher darauf, weitere, bisher unbemerkte Strahlungen aufzuspüren. Zwar erwies sich manche Sensationsmeldung als Zeitungssente oder Täuschungsmanöver – doch immerhin war man auf die unbekanntenen Strahlen aufmerksam geworden.

Bilder auf verpacktem Fotopapier - Becquerel entdeckt einen strahlenaussendenden Stoff (1896)

Der französische Physiker Henri Becquerel (1852-1908) war Spezialist für die Art von Gesteinen, die nach Bestrahlung mit Sonnenlicht zum Leuchten angeregt werden.

Er wollte herausfinden, ob diese Leuchtstoffe Strahlen aussenden, die den Röntgenstrahlen vergleichbar wären.

Um das zu überprüfen, legte er im Frühjahr 1896 in seinem Pariser Labor verschiedene Mineralien zunächst ins Sonnenlicht und anschließend auf Fotopapier, das mit schwarzem Karton umwickelt war. Wenn seine Vermutung richtig wäre, müßten die Strahlen den Karton durchdringen und eine Verfärbung des Fotopapiers bewirken.

Zuerst verliefen seine Untersuchungen enttäuschend, bis er ein uranhaltiges Gestein testete. Dieses verursachte tatsächlich eine Verfärbung des Fotopapiers und Becquerel hielt seine Vermutung für bestätigt - etwas voreilig wie sich bald zeigte.

Zu seinem Kummer verschlechterte sich das Wetter in Paris; die Sonne blieb tagelang hinter einem Wolkenschleier verborgen. Ohne ausreichend helles Sonnenlicht blieb Becquerel nichts anderes übrig, als das Urangestein und das Fotopapier im Schreibtisch zu verstauen und das Ende der trüben Tage abzuwarten.

Da das Wetter jedoch keine Anstalten zur Besserung machte, entwickelte Becquerel das Fotopapier, in der Hoffnung, wenigstens ein paar matte Flecken vorzufinden.

Doch welche Überraschung: Auf dem Fotopapier, das die ganze Zeit über zusammen mit dem Gestein in der dunklen Schublade gelegen hatte, war ein deutliches Bild des Gesteinsbrockens zu sehen. Offenbar sendete das Urangestein Strahlen aus, ohne daß es irgendwie durch Sonnenlicht oder sonstige Einflüsse dazu angeregt wurde.

Drei Monate nach Röntgens Entdeckung von Strahlen, die Materie durchdringen können, fand Becquerel nun Materie, die selbst Strahlen aussendet.

Strahlungsquellen - versteckt wie Nadeln im Heuschöber

Das polnisch-französische Physikerehepaar Marie (1867–1934) und Pierre Curie (1859–1906) versuchten, den Becquerelstrahlen, wie sie vorerst genannt wurden, auf den Grund zu gehen. Irgendwie mußten sie doch aus der Substanz zu bestimmen sein, von der sie pausenlos ausgesendet werden. Doch im Gegensatz zu Becquerel, der sich erfolglos mit der Untersuchung von Uran plagte, machten sich die Curies daran zu prüfen, ob nicht noch weitere chemische Elemente Strahlung aussenden. Und tatsächlich stellten sie fest, daß auch Thorium, nach Uran das zweitschwerste der damals bekannten Elemente, strahlt. Jetzt gab Marie Curie dieser Erscheinung den auch heute noch gebräuchlichen Namen: *Radioaktivität* (vom lateinischen Wort „radius“ = Strahl).

Ein von Pierre Curie eigentlich für andere Zwecke entwickeltes Meßgerät erwies sich als geeignet, unterschiedliche Strahlungsstärken verschiedener Stoffe festzustellen. Als Marie Curie damit Erzproben untersuchte, in denen Thorium und Uran enthalten waren, wirkte die Radioaktivität als Botschafter für ein bisher unbekanntes Element: Einige der Erzproben strahlten viel stärker, als es nach ihrem Uran- und Thoriumgehalt zu erwarten gewesen wäre. Zweifellos: in diesen Erzen mußte ein weiteres, noch nicht entdecktes Element in so geringen Mengen vorhanden sein, daß es den Chemikern mit ihren bisherigen Untersuchungsmethoden immer durch die Maschen geschlüpft war.

Aber wie sollte man einen äußerst spärlich verteilten Stoff finden, dessen Eigenschaften fast völlig unbekannt waren, bis auf eine: die Radioaktivität. Sie diente Marie Curie als Wegweiser auf der Suche nach der geringen Menge des unbekanntes Stoffes in den Erzproben.

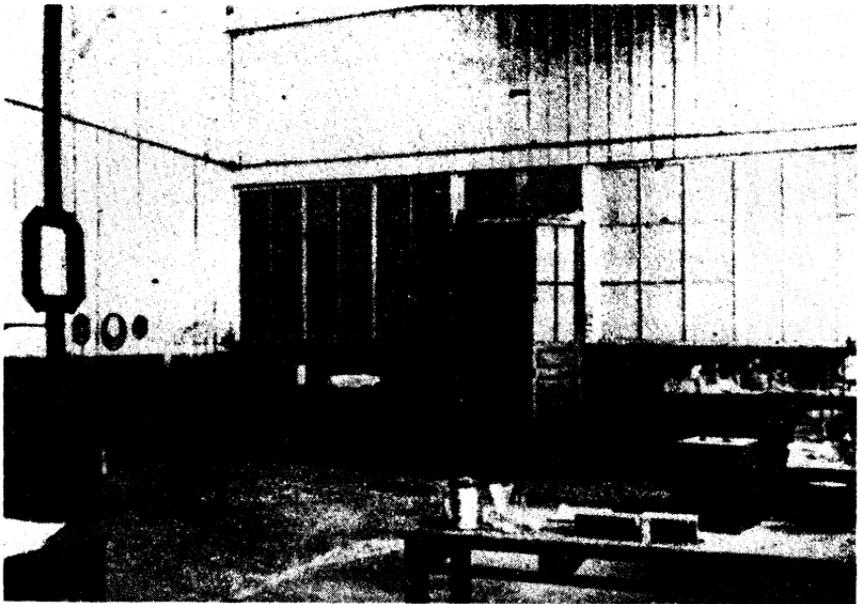
Mit chemischen und physikalischen Trennverfahren wurde das Erz zerlegt. Dann untersuchte Marie Curie Teilmenge für Teilmenge auf Radioaktivität. Die am stärksten strahlenden Mengen wurden ausgesondert und wieder zerlegt. Wieder maß Marie Curie die Strahlung der verschiedenen Teilmengen, sortierte wieder aus und zerlegte weiter; nach und nach mußte sich auf diese Weise der unbekanntes radioaktive Stoff konzentrieren.

Im Sommer 1898 hatte Marie Curie keinen Zweifel mehr, daß die winzige Menge der übriggebliebenen Substanz einen neuen Stoff enthält, den sie *Polonium* nannte, zu Ehren ihres Heimatlandes Polen, das damals zwischen Österreich, Preußen und Rußland aufgeteilt war. Ihr Versuch, die chemischen Eigenschaften von Polonium zu bestimmen, zeigten ihr bald, daß noch ein zweiter bisher nicht bekannter Stoff in den Überresten vorhanden sein mußte, in noch viel geringeren Mengen, aber mit einer vielfach stärkeren Strahlenwirkung. Wegen seiner alles übertreffenden Strahlungsstärke nannte Marie Curie diesen Stoff Radium – „das Strahlende“. Aber so sicher sich Marie Curie aufgrund der gemessenen Strahlung auch über das Dasein der neuen Stoffe war, in wägbaren oder gar sichtbaren Mengen hatte sie sie noch nicht herstellen können. Zu gering waren die Vorkommen in den Erzproben. Man mußte schon einige Kilogramm dieser Erze verarbeiten, um vielleicht wenige Gramm zu erhalten. Es gelang dem Forscherehepaar Curie, eine Tonne (1000 kg) Uranerzreste von einer böhmischen Erzgrube geschenkt zu bekommen, aus dem das Uran für die Verwendung in der Glasindustrie schon herausgetrennt war. Zwanzig Zentner schmutzig brauner Erde, vermischt mit den Nadeln von den Bäumen böhmischer Wälder lagerten in dem Laborschuppen der Curies und irgendwo in dieser Erde, fein verteilt, geringe Mengen von Polonium und Radium, die sich durch ihre Strahlung bemerkbar machten.

Die Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen begann. Stück für Stück mußte die Erzmasse nach der bewährten Methode aufbereitet werden. Einige Monate würde die Arbeit wohl dauern, um einige Gramm Radium abzutrennen.

Doch die mühselige Mischung aus Präzisions- und Schwerstarbeit dauerte – vier Jahre. Die Ausbeute: ein zehntel Gramm Radium! Ein zehntel Gramm eines weißlich glänzenden Metalls hatte sich verteilt in zwanzig Zentner Erzmasse durch seine Strahlung bemerkbar machen können, in einer Masse also, die 10millionenmal größer war. Wie stark mußte die Strahlung dieses Stoffes sein?!

Und tatsächlich strahlt Radium 2millionenmal stärker als Uran; in seiner Nähe kann man sogar Buchstaben in dunklen Räumen entziffern. Die Ursache der Strahlung blieb für die Curies allerdings noch unerklärlich. Zwar vermuteten sie, daß die Strahlung irgendwie mit



Ein alter Holzschuppen der Schule für Physik in Paris diente den Curies als Labor. Es gab weder ausreichende Belüftungs- noch Heizmöglichkeiten. Bei Regen mußten die Curies ihre Forschungsgeräte hin und her räumen – das Dach war undicht.

dem inneren Aufbau der Materie zu tun haben müßte, aber in die damalige Vorstellung von Atomen als kleinste unveränderliche Teilchen eines Stoffes paßte die neu entdeckte Erscheinung nicht hinein.

Eine runde Sache – die alte heile Welt der Atome

Erst rund ein Jahrhundert vor der Entdeckung der Radioaktivität hatte sich unter den Naturforschern die Auffassung durchgesetzt, daß die gesamte Materie aus winzigen kleinen Teilchen aufgebaut sei, den Atomen.

Zwar hatten schon vor 2400 Jahren griechische Philosophen (Demokrit und Leukipp) versucht, die wahrnehmbaren Vorgänge

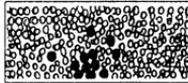
Naturscheinungen – veranschaulicht mit dem Kugelmodell von Dalton*

... die Auflösung von Zucker in Wasser

die kleinsten
Teilchen eines
Zuckerkörnchens...



... lösen sich
nach und nach ab und
vermischen sich...



... völlig mit den
Wasserteilchen.



... die Zusammensetzung chemischer Verbindungen

Durch Zusammenschluß von Atomen verschiedener Elemente entstehen neue Stoffe, die chemischen *Verbindungen*. Ihre kleinsten Teilchen heißen *Moleküle*.

Zwei Atome
Wasserstoff...



... und ein Atom
Sauerstoff...



... bilden ein Molekül
Wasser



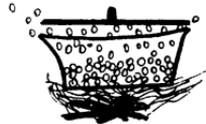
... die Zustände fest, flüssig und gasförmig (Aggregatzustand)



In Körpern, die einen festen Aggregatzustand einnehmen, sitzen die Atome eng aneinander gepackt, ohne Bewegungsspielraum. Die Form eines festen Körpers kann nur durch die Wirkung von Kräften verändert werden.



Im flüssigen Zustand haben die Teilchen Bewegungsspielraum gegeneinander. Daher kann eine Flüssigkeit die Form jedes Gefäßes ausfüllen.



Im gasförmigen Zustand bewegen sich die Teilchen frei im Raum und können – wie beim Wasserdampf – sogar einen Deckel heben, wenn sie schnell und häufig genug dagegen sausen.

* nicht maßstabsgerecht

auf der Welt mit dem Verhalten von kleinsten, unteilbaren Teilchen zu erklären. Aber erst die im 17. Jahrhundert beginnende moderne Naturwissenschaft verhalf der Vorstellung von Atomen als kleinsten Bausteinen der Materie zum Durchbruch:

So stellte man unter anderem fest, daß die riesige Vielfalt unterschiedlicher Stoffe aus einer begrenzten Anzahl von Grundstoffen, den chemischen Elementen, zusammengesetzt ist. Diese Elemente können sich in unterschiedlichen Kombinationen miteinander verbinden, wodurch immer wieder neue Stoffe mit neuen Eigenschaften entstehen können. Der englische Naturforscher *John Dalton* (1766–1844) entwickelte um 1800 die Auffassung, jedes Element habe seine ganz besondere Art von Atomen, die sich in Größe und Gewicht von den Atomen der anderen Elemente unterscheiden.

In Daltons Modell hatten diese Atome die Gestalt einer Kugel, galten als stabil und unveränderlich.

Dieses Kugelmodell von Dalton wurde in dem Maße anerkannt, wie man damit Vorgänge in der Natur erklären konnte. Man darf natürlich nicht glauben, die Atome würden wirklich aus kleinsten Kügelchen bestehen. Diese Vorstellung ist nur ein Modell, mit dem man jedoch auch heute noch einige Erscheinungen verstehen kann. (Vgl. S. 21)

Nach dem Modell von Dalton können sich die Atome mit wenigen oder vielen anderen verbinden, sich wieder aus der Verbindung lösen und mit anderen Atomen eine Verbindung eingehen. Sie mögen eng aneinandergepackt liegen oder mit Riesengeschwindigkeiten durch den Raum jagen – das einzelne Atom verändert sich dabei nicht. Seit seiner Entstehung, irgendwann am Beginn der Welt, blieb es immer die gleiche unveränderliche Kugel. Die Grundbausteine der Welt hielt man für stabil. Aber ...

... „die Radioaktivität bringt alles durcheinander“

So seufzte zu Beginn unseres Jahrhunderts der damals in Montreal, Kanada, forschende Physiker *Ernest Rutherford* (1871–1937).

Schon Marie und Pierre Curie hatten während ihrer mühseligen Suche nach dem Radium festgestellt, daß sich die Radioaktivität aus dem Erz auf andere Gegenstände des Raums überträgt. Sie notierten:

„Beim Experimentieren mit stark radioaktiven Substanzen muß man besondere Vorsichtsmaßregeln gebrauchen, wenn man empfindliche Messungen vornehmen will ... Die Stäubchen, die Luft, die Kleider sind radioaktiv“ (zitiert nach Eve Curie, S. 230).

Offenbar entstanden aus den radioaktiven Substanzen gasförmige Stoffe, die selbst auch wieder radioaktiv waren, sich im Raum verteilten und sich an Gegenständen anlagerten.

Rutherford konnte schließlich nachweisen, daß sich aus den radioaktiven Metallen Thorium und Uran tatsächlich radioaktive Gase und einige weitere Stoffe bildeten.

Aber wie war das möglich? Wieso konnten aus dem chemischen Element Uran mit einer ganz bestimmten Art von Atomen plötzlich andere Stoffe mit ganz anderen Atomen entstehen?

Zunächst zögerte Rutherford noch, die Schlußfolgerungen aus seinen Beobachtungen konsequent zu ziehen. Doch als seine Zusammenarbeit mit dem Chemiker *Frederick Soddy* (1877–1956) noch einmal bestätigte, daß sich aus radioaktiven Elementen andere Elemente gebildet hatten, spontan, ohne Einfluß von außen, war es zu Ende mit der Vorstellung von der heilen Welt der Atome: Materie verwandelt sich von selbst in andere Materie. Atome, z.B. von Uran wurden zu Atomen eines anderen Elements, und eine erst vor wenigen Jahren gemachte Entdeckung war die Botschaft von diesen Vorgängen in der unendlich kleinen Welt der Atome: die Radioaktivität.

Denn soviel war den Forschern nunmehr klar: Strahlung entsteht, wenn sich Atome eines Stoffes plötzlich, spontan, in Atome eines anderen Stoffes verwandeln.

Die winzige, für alle Zeiten stabile Kugel von Dalton hatte als Modell der Atome zumindest für radioaktive Stoffe ausgedient.

Ein paar harte Brocken in gährender Leere - ein neues Atommodell muß her!

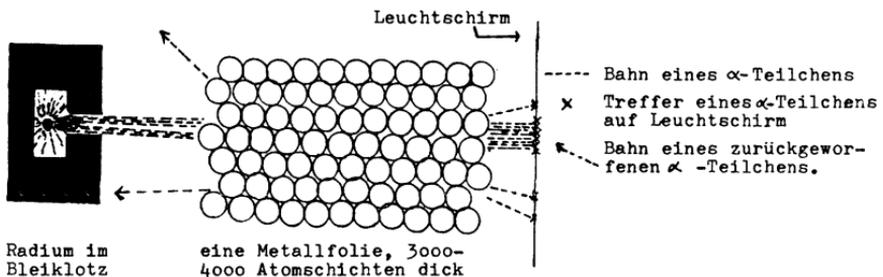
Seine Experimente mit radioaktiven Stoffen zeigten Rutherford bald, daß die ausgeschleuderte Strahlung keine einheitlichen Eigenschaften hat. In einem Magnetfeld wird ein Teil der Strahlung in eine Richtung abgelenkt, ein anderer Teil in die entgegengesetzte Richtung, ein dritter überhaupt nicht. Aus der Größe und der Richtung der Ablenkung konnte man die Schlußfolgerung ziehen, daß die beiden ablenkbaren Strahlungsarten aus winzigen elektrisch geladenen Teilchen bestehen müßten. Die dritte Art ähnelte in ihren Eigenschaften den immer noch nicht näher geklärten Röntgenstrahlen.

Um die drei Strahlungsarten voneinander unterscheiden zu können, benannte Rutherford sie mit den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets: α -, β -, γ -Strahlung (sprich: alpha-, beta-, gamma-Strahlung).

Besonders angetan hatte es Rutherford die α -Strahlung, die den angesammelten Erkenntnissen zufolge aus elektrisch positiv geladenen Teilchen bestehen mußte. Diese Teilchen wurden mit einer Geschwindigkeit von rund 15000 km in der Sekunde(!) aus der radioaktiven Substanz herausgeschleudert.

Aber das wichtigste, was sie zu einem begehrten Versuchsobjekt machte: Obwohl man die Strahlung weder sehen noch fühlen konnte, ließ sich ihre Wirkung doch unmittelbar feststellen. Ja, man konnte sogar die Einwirkung eines einzelnen α -Teilchens genau erkennen.

Modell von Rutherfords α -Teilchen Versuch (nicht maßstabsgetreu)



Wieder einmal diente dazu ein Stoff, der durch Strahlung zum Leuchten angeregt wird. Ein Schirm, der mit Zinksulfid bedeckt ist, einer chemischen Verbindung aus Zink und Schwefel, die auch auf Leuchtzifferblättern von Uhren vorkommt, scheint im grünen Licht, wenn α -Strahlung auf ihn trifft. Schon unter einer einfachen Lupe erweist sich der grüne Schein aus einer Vielzahl winziger kurz aufblitzender Punkte zusammengesetzt – jedes einzelne α -Teilchen hinterläßt so seine eigene Spur.

Im Jahre 1908 testeten Rutherford und seine Mitarbeiter Hans Geiger und Ernest Marsden mit Hilfe eines solchen Schirms die Fähigkeit von α -Strahlung, dünne Metallfolien zu durchdringen. Da das Metall Blei die α -Strahlung völlig abschirmt, legte Rutherford eine winzige Menge Radium in einen Bleiklotz, der nur eine kleine Öffnung hatte. So konnte er den α -Strahlen eine kontrollierbare Richtung geben.

Diesen gerichteten Strahl schnell fliegender Teilchen lenkte das Rutherfordteam auf eine hauchdünne Metallfolie von wenigen tausendstel Millimeter Dicke, hinter der ein Leuchtschirm aufgestellt war.

Das Aufblitzen auf dem Schirm zeigte, daß die allermeisten Teilchen ohne Störung auf einem geraden Weg durch die Metallfolie sausten. Doch es waren auch Lichtblitze abseits von der ursprünglichen Strahlungsrichtung zu erkennen; offenbar wurden einige Teilchen auf ihrem Weg durch die Folie aus ihrer Bahn geschleudert (vgl. Abb. S. 24).

Aber was das Erstaunlichste war: Hin und wieder wurde ein Teilchen in die Richtung zurückgeschleudert, aus der es gerade gekommen war! Da die α -Teilchen in der Welt der Atome Geschoße von recht ansehnlichem Kaliber sind, kam es Rutherford so vor, „als würde man mit einer Pistole auf ein Blatt Seidenpapier schießen, und die Kugel würde zurückprallen“. Wie konnte diese unterschiedliche Wirkung der Metallfolie auf die α -Strahlung erklärt werden? Wieso flogen die Teilchen zum größten Teil völlig ungestört durch die Metallfolie hindurch, so als wäre nur leerer Raum vorhanden? Immerhin befinden sich selbst in den dünnen Metallfolien noch etwa 3000–4000 Atomschichten hintereinandergereiht. Und was war andererseits in der Welt der Atome so stark, daß die heransausenden α -Teilchen manchmal zurückgeschleudert wurden?

Da Versuche anderer Naturwissenschaftler ergeben hatten, daß in der Atomwelt winzige elektrisch positive und negative Ladungen vorkommen, war Rutherford davon überzeugt, daß die Ablenkung der α -Teilchen, die ja ebenfalls positiv geladen waren, mit elektrischen Abstoßungskräften zusammenhängen müßte. Aber wieso wurden die α -Teilchen nur so selten abgelenkt und manchmal, wie von einer geballten Kraft, ganz zurückgeworfen?

Der Kern der Sache – das Atom nimmt Gestalt an

Einige Monate grübelte Rutherford über eine mögliche Erklärung nach. Dann, im Jahre 1911, hatte er ein Atommodell zu bieten, das seine bisherigen Beobachtungen erklären konnte. Daltons Vorstellung von einer massiven Kugel hatte nun endgültig ausgedient.

Rutherfords Atom hat einen Kern, in dem fast die gesamte Masse des Atoms versammelt ist und der aus elektrisch positiv geladenen Teilchen besteht, den *Protonen*.

Umkreist wird dieser Kern von elektrisch negativ geladenen Teilchen, den *Elektronen*.

Diese haben zwar eine Masse, die fast 2000 mal kleiner ist, als die der Protonen. Aber sie drehen sich so schnell um den Atomkern, daß sie ihn wie eine Hülle umschließen und die Atomkerne der Nachbaratome auf Distanz halten. Oder besser gesagt: Für gähnende Leere in der Atomwelt sorgen.

Der Atomdurchmesser des ganzen Atoms – also einschließlich der außen kreisenden Elektronen – ist über zehntausendmal größer als der Durchmesser des Atomkerns. Während der Durchmesser der Elektronenbahnen etwa ein zehnmillionstel Millimeter groß ist, ist der Atomkern also nochmals zehntausendmal kleiner und dazwischen befindet sich – nichts! Fürwahr, eine endlose Leere, in die die α -Teilchen dort gerieten. Kein Wunder, daß die α -Teilchen, die selbst noch kleiner sind als die Atomkerne der Metallfolie, meistens unbehindert durch die Welt der Atome sausen können.

Die winzigen Elektronen der Atomhülle werden von ihnen mühelos beiseite gerammt. Nur wenn die α -Teilchen auf einen Atomkern

prallen, der wie ein stabiler Rammbock wirkt, werden sie zurückgeschleudert. Aber wie selten kommt das vor!

In der winzigen Atomwelt ist die Entfernung zwischen den Atomkernen im Vergleich zu ihrer Größe riesig. Sie entspricht dem Abstand von zwei Tennisbällen, die über 600 Meter weit voneinander entfernt liegen!

Rutherfords Modell von den Atomen wurde in den folgenden Jahren weiter verbessert. Der dänische Physiker *Niels Bohr* (1885–1962) stellte fest, daß die Elektronen nicht alle im gleichen Abstand um den Atomkern kreisen können, sondern daß es verschiedene Bahnen geben muß, auf denen sich die Elektronen verteilen. Außerdem stellte sich etwa 20 Jahre nach Rutherfords Ideen vom Atombau heraus, daß es neben Elektronen und Protonen ein weiteres Atombauteilchen gibt: das *Neutron*. Es hat fast die gleiche Masse wie ein Proton und befindet sich ebenfalls im Atomkern, nur hat es keine elektrische Ladung, sondern ist neutral (vgl. S. 38).

Beispiel für den Bau von Atomen nach dem Rutherford-Bohr-Modell*

Bau eines Wasserstoffatoms



ein Proton
ein Elektron
kein Neutron
(in der Regel)

Bau eines Kohlenstoffatoms



sechs Protonen
sechs Elektronen
sechs Neutronen
(in der Regel)

Bau eines Sauerstoffatoms



acht Protonen
acht Elektronen
acht Neutronen
(in der Regel)

● Proton ○ Neutron ● Elektron

* nicht maßstabgetreu

Dalton konnte die Unterschiede zwischen den einzelnen Atomen verschiedener Elemente nur durch verschiedene Größen der Modellkugeln verständlich machen.

Nach dem neuen Modell unterscheiden sich die Atome der einzelnen Elemente durch die Anzahl der im Atomkern befindlichen Protonen. Jedes chemische Element hat sein besonderes Atom mit einer ganz bestimmten Anzahl von Protonen. Da das einzelne Atom in seiner Wirkung elektrisch neutral ist, müssen sich in jedem Atom genauso viel Elektronen wie Protonen befinden. Die Anzahl der Neutronen kann bei Atomen desselben Elements schwanken.

Spontane Atomkernumwandlungen – die Quelle der Radioaktivität

Die Erkenntnisse Rutherfords über den Bau der Atome und seine Beobachtungen, daß bei der Radioaktivität neue Elemente entstehen, brachten die Forschung nach den Ursachen der Radioaktivität ein entscheidendes Stück weiter.

Der Kern der Sache liegt – im Atomkern. Oder besser gesagt: in den Eigenschaften der Atomkerne einiger chemischer Elemente, sich von allein, spontan, in Atomkerne von anderen chemischen Elementen zu verwandeln.

Die allermeisten der 92 natürlichen Elemente haben diesen Hang zur Veränderung allerdings nicht. Ihre Atomkerne sind stabil. Sie bestehen seit Milliarden von Jahren und haben auch noch einige Milliarden Jahre vor sich – bis an's Ende der Welt.

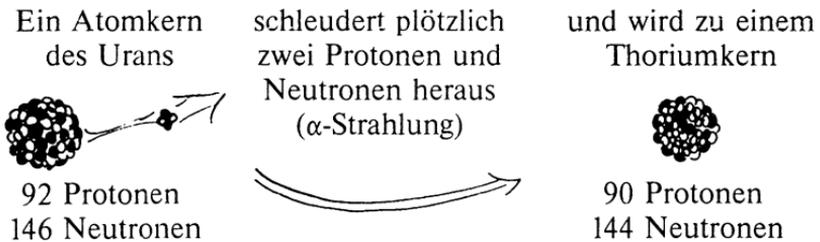
Eigentlich ist diese ewige Ruhe in der Welt der Atome verwunderlich. Denn in allen Atomkernen mit mehreren Protonen wirken elektrische Abstoßungskräfte zwischen den gleichartig geladenen Protonen, so daß der Atomkern eigentlich auseinanderfliegen müßte.

Doch im Atomkern ist noch eine zweite Art von Kräften zwischen den einzelnen Atombauteilchen wirksam, deren Ursache noch nicht geklärt ist: die Kernkraft. Sie ist eine Anziehungskraft zwischen Protonen und Neutronen untereinander und bewirkt, daß trotz der Abstoßungskräfte der allergrößte Teil der Welt im Inneren zusammenhält. Doch vorzugsweise bei Atomkernen mit einer großen Zahl

von Protonen wie bei Uran (92 Protonen), Radium (88), Polonium (84) oder Thorium (90) hält die Kernkraft nicht mehr alles beisammen, ein Teil des Atomkerns wird herausgeschleudert. So entsteht die Strahlung. Der unruhige Atomkern verwandelt sich dabei in den Atomkern eines anderen Elements. Aus Uranatomkernen entstehen die des Thoriums, Poloniumatomkerne werden zu Blei, Radiumkerne zu Radon.

Je nach Art der Umwandlung eines Atomkerns werden dabei unterschiedliche Strahlungsarten herausgeschleudert: α - oder β -Strahlung und als Beigabe zumeist noch die γ -Strahlung.

Die α -Strahlung kommt nur bei Atomkernen vor, die aus mehr als 200 Teilchen aufgebaut sind, z. B. bei Uran. Uranatome haben im Kern 92 Protonen und 146 Neutronen. Bei der Umwandlung von Uranatomkernen zu Thoriumkernen werden je 2 Protonen und Neutronen herausgeschleudert.



Die β -Strahlung tritt z. B. bei dem Element Thallium auf, das in chemischen Verbindungen auch als Rattengift Verwendung findet. Im Atomkern verändert sich plötzlich ein Neutron zu einem Proton. Dabei entsteht ein Elektron, das sofort vom Atomkern weggeschleudert wird. Dieses ist die β -Strahlung.

Im Atomkern des Thalliums... Es entsteht ein Bleiatomkern.



... wandelt sich plötzlich ein Neutron zu einem Proton. Das dabei entstehende Elektron wird hinausgeschleudert.

Die γ -Strahlung ist in der Regel nicht mit einer selbständigen Atomkernumwandlung verbunden, sondern tritt als Begleitung der beiden anderen Atomkernumwandlungen auf. Sie besteht auch nicht aus Atombauteilchen, sondern ist eine Abstrahlung von überschüssiger Energie, die bei der Atomkernumwandlung noch freigesetzt wird. Die γ -Strahlung ist eine elektromagnetische Welle, wie Radio- und Lichtwellen, nur wesentlich energiereicher. Im Jahre 1912 fand der Physiker *Max von Laue* (1879–1960) heraus, daß auch die Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind, den γ -Strahlen sehr ähnlich, nur weniger energiereich.

Zwischen Sekundenbruchteilen und Ewigkeiten – die Halbwertszeit

Je mehr Atomkerne eines radioaktiven Stoffes sich in einer bestimmten Zeit verwandeln, umso stärker ist die Radioaktivität der Substanz. Im Radium, das sich in der geringen Menge von einem zehntel Gramm durch seine Aktivität noch in 1000 kg Erzmasse bemerkbar machen konnte, geht die Atomkernumwandlung entsprechend flott: Pro Sekunde verändern sich in einem Gramm Radium durch Ausschleuderung von α -Teilchen 37 Milliarden Atomkerne zu Radon.

Im Uran geht es bedächtiger zu. Von einem Gramm Uran zerfallen pro Sekunde „nur“ 10000 Atomkerne. Die Radioaktivität von Uran ist somit einige Millionen Male schwächer als die von Radium.

Die Anzahl der Atomkernumwandlungen pro Sekunde bezeichnet man als die *Aktivität* einer Substanz. Die Maßeinheit der Aktivität ist das Curie (Ci), in Erinnerung an das polnisch-französische Forscherehepaar (vgl. S. 18–20).

Die Aktivität 1 Curie (Ci) bedeutet: in diesem Stoff wandeln sich pro Sekunde 37 Mrd. Atomkerne um. Das bedeutet auch, es werden pro Sekunde je nach Umwandlungsart 37 Milliarden α - oder β -Teilchen, oft noch begleitet von γ -Strahlung, aus der Substanz herausgeschleudert.

Radioaktivität in einigen Umweltbereichen

	Aktivität in Curie	Anzahl der Atomkern- umwandlung pro Sekunde
die Luft in einem mittelgroßen Wohnraum	rund 0,00000005	etwa 2000
die täglich im Durch- schnitt gegessene Nahrungsmenge	rund 0,000000002	etwa 100
ein Zentner Kartoffeln	rund 0,0000000001	etwa 3
eine Tonne Lehm oder Ton	rund 0,00003	etwa eine Million

Ein Gramm Radium hat die Aktivität von einem Curie, d.h. es sendet pro Sekunden 37 Milliarden α -Teilchen aus, die durch Atomkernumwandlungen entstehen.

Man sollte annehmen, daß von einem Gramm Radium angesichts der riesigen Zahl von Atomkernen, die sich pro Sekunde ändern, nicht lange etwas übrig bleibt. Doch nach 1620 Jahren sind erst die Hälfte aller Atomkerne des einen Gramms verwandelt. Man ahnt, welche Unmengen von Atomen allein in einem einzigen Gramm eines Stoffes enthalten sein müssen.

Andere radioaktive Stoffe lassen sich für die Atomkernumwandlungen etwas mehr Zeit. Von einer vorhandenen Menge Uran ist erst nach 4,5 Milliarden Jahren die Hälfte der Atomkerne zerfallen, Thorium benötigt dafür sogar 14 Milliarden Jahre. Radonatomkerne haben es da viel eiliger. Bereits nach vier Tagen hat sich ihre Anzahl um die Hälfte verringert. Wieder andere Stoffe benötigen nur einige tausendstel Sekunden für die Umwandlung der Hälfte aller vorhandenen Atomkerne.

Die Zeit, in der die Hälfte aller Atomkerne eines radioaktiven Stoffes sich in andere Atomkerne verwandelt, heißt *Halbwertszeit*.

Die bei einem radioaktiven Zerfall neu entstandenen Atomkerne bleiben ihrer Herkunft meistens treu. Auch sie sind radioaktiv und zerfallen irgendwann selbst.

Endstation für die Veränderung der Atomkerne ist das Blei – ein Element dessen Atomkerne stabil sind. Uran verwandelt sich zum Beispiel über 13 verschiedene Zwischenstationen in Blei, Thoriumatomkerne sind bereits nach 10 Umwandlungen zu Bleiatomkernen geworden. Seit ewigen Zeiten zerfallen auf der Erde ununterbrochen Atomkerne. Dabei wird die Erde immer ein wenig aufgeheizt, denn jede einzelne Atomkernumwandlung ist mit einer Freisetzung von Energie verbunden.

Die Energiemengen, die bei einer einzigen Atomkernumwandlung freigesetzt werden, sind winzig klein. Aber angesichts der unendlich vielen Atomkerne, die ständig umgewandelt werden, genügt die Gesamtenergie, um die Erde zusätzlich zur Wirkung der aufgenommenen Sonnenenergie etwas zu erwärmen.

Ununterbrochen „tropft“ sozusagen Energie aus einer winzigen Quelle im Inneren der Materie: aus den Atomkernen.

Der Atomkern als Energiepaket

Atomrümpfe pflastern ihren Weg – die Wirkung der Strahlung auf Materie

Schon bald nach der Entdeckung der Radioaktivität hatte man bemerkt, daß von den radioaktiven Substanzen Energie an die Umgebung abgegeben wird.

Das Schwärzen von Becquerels Fotoplatten war ebenso eine Wirkung der Strahlungsenergie gewesen, wie die von Pierre und Marie Curie beobachteten Veränderungen an ihren Händen (vgl. S. 6). Außerdem hatten die Curies bemerkt, daß das von ihnen entdeckte Radium immer etwas wärmer ist als die Umgebung. Auch dies ist ein Hinweis auf Freisetzung von Energie.

Schaut man sich die Geschwindigkeiten an, mit denen die Strahlung aus dem Atomkern herausgeschleudert wird, ist klar, daß Materie, die von ihr getroffen wird, nicht ungeschoren davon kommt: β -Strahlung, also Elektronen, fliegen mit Geschwindigkeiten von 290 000 km in der Sekunde aus dem Atomkern heraus; die α -Teilchen bringen es immerhin noch auf 14 000–21 000 km pro Sekunde. γ -Strahlung saust sogar mit Lichtgeschwindigkeit herum: 300 000 km in der Sekunde*.

In der Miniwelt der Atome eines Stoffes, in die die energiereichen Teilchen eindringen, richten sie ein Chaos an.

* Da die γ -Strahlung jedoch nicht aus Teilchen, sondern aus elektromagnetischen Wellen besteht, ist ihr Energiegehalt nicht so ohne weiteres mit den beiden anderen Strahlungsarten zu vergleichen. Wellenlänge und Anzahl der Wellenschwingungen pro Sekunde spielen dabei ebenfalls noch eine Rolle. Hier sei nur angemerkt, daß auch die γ -Strahlung sehr energiereich ist.

Die Elektronen, die um die Atomkerne kreisen, werden von ihnen einfach weggerammt.

Übrig bleibt jedesmal ein Atom, das nicht mehr elektrisch neutral ist. Die positiv geladenen Protonen im Atomkern sind jetzt in größerer Zahl vorhanden als die negativ geladenen Elektronen. Das Restatom verhält sich daher wie ein positiv geladenes Teilchen.

Solche Atomrümpfe, *Ionen* genannt, haben andere chemische Eigenschaften als das vollständige Atom, in dem gleich viele Protonen und Elektronen vorkommen.

Werden viele Atome derart demoliert, wirkt sich das auf die Eigenschaften des Stoffes aus, dessen kleinste Teilchen ja nun verändert sind.

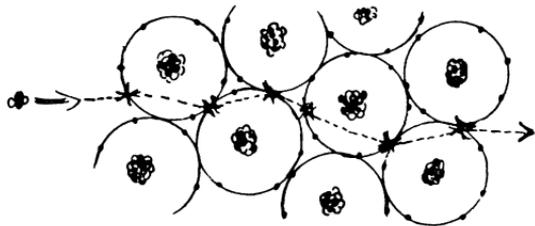
Die Bildung von Ionen ist auch der Grund, warum die Bestrahlung lebenden Gewebes für das Lebewesen selbst gefährliche Folgen haben kann.

Das normale Zusammenwirken der unvorstellbar vielen Atome, aus denen ja auch alle Lebewesen bestehen, wird gestört. Wenn ein vielleicht nur kleiner aber entscheidender Teil der Atome plötzlich ganz andere Eigenschaften bekommt, geraten die vielen fein aufeinander abgestimmten Vorgänge im lebenden Körper durcheinander: Unwohlsein, Krankheit und im Extremfall der Tod können die Folgen sein, je nach Schwere der Strahlenwirkung.

Besonders die α -Teilchen, die etwa 8000 mal größer sind als Elektronen, wirken beim Flug durch die Atomwelt wie Bulldozer: sie schlagen auf kürzestem Weg jede Menge Elektronen aus den gerammten Atomen heraus.

Die Durchstrahlung von Materie im Modell*

Ein α -Teilchen schlägt Elektronen aus den Atomen der durchstrahlten Materie



* nicht maßstabgetreu

Allerdings kommen sie nicht weit. Jedes Mal verlieren sie bei ihren Rammstößen etwas an Energie, sie werden abgebremst und bleiben schon bald irgendwo im Inneren der Atomwelt stecken. Die vergleichsweise kleinen Teilchen der β -Strahlung schlagen zwar weniger Elektronen aus den Atomen der durchstrahlten Stoffe heraus. Dafür können sie aber auch tiefer in das Material eindringen. Je nachdem, wie dicht die Atome der durchstrahlten Materie angeordnet sind, dringt die Strahlung mehr oder weniger tief ein.

Vergleich der Eindringtiefe von Strahlung*

Strahlungsart	in Luft	im Körper- gewebe vom Menschen	in Blei
 α -Strahlung	2,5 cm	0,1 mm	wenige tausendstel Millimeter
β -Strahlung	7,0 m	7,0 mm	0,8 mm
 γ -Strahlung	mehr als 10 m	durchstrahlt den ganzen Körper	mehrere cm

* ungefähre Vergleichswerte für mittlere Energiebereiche

Die Energie, die die Strahlung beim Elektronenrammen verliert, wird auf die Materie übertragen.

Die *Energiedosis* einer Strahlung gibt an, wieviel Energie auf jedes Kilogramm der durchstrahlten Materie übertragen wird.

Die Energiedosis wird in der Einheit Gray (Gy) gemessen.

Die Energiedosis beträgt ein Gray, wenn auf jedes Kilogramm der durchstrahlten Materie die Energie ein Joule übertragen wird*.

Zum Vergleich:

ein Joule ist die Energie, die man benötigt, um einen Stein mit der Masse ein Kilogramm 10 cm gegen die Erdanziehungskraft hochzuheben.

* Hin und wieder wird für die Energiedosis noch die alte Einheit „Rad“ verwendet. Ein Rad ist der hunderste Teil von einem Gray.

Wie kommt man 'ran an die Energie?

Schon bald nach der Feststellung, daß durch Strahlung Energie aus dem Atom freigesetzt wird, blühte die Spekulation über die neuen Möglichkeiten. Zeitungen verbreiteten Horrorgeschichten von dem möglichen Bau neuer Superwaffen, und der Berliner Chemieprofessor Markwald meinte bereits im Jahre 1908, daß man mit der Energiemenge von nur einem Pfund Uran einen Ozeandampfer über den Atlantik fahren lassen könnte – wenn es gelingen würde, den radioaktiven Zerfall zu beeinflussen.

Ein Gramm Radium gibt in drei Tagen nur soviel Energie ab wie bei der Verbrennung von einem Gramm Steinkohle frei wird. Nur ist das Gramm Steinkohle dann verbrannt – während von dem einen Gramm Radium nach 25 Jahren erst der hundertste Teil zerfallen ist! In den unendlich vielen Atomen des einen Gramms schlummert daher ein riesiger Energievorrat. Wenn zwei Gramm zu einem Gramm zerfällt, wird soviel Energie freigesetzt wie bei der Verbrennung von 500 kg Steinkohle. Aber: die Kohle kann man je nach Bedarf in ein paar Stunden, Tagen oder Wochen verheizen; der Zerfall von zwei Gramm Radium zu einem dauert 1620 Jahre – so lange wie eine Halbwertszeit.

Wenn es aber gelingen würde, den Umwandlungsprozeß der Atome zu steuern, ihn zu beschleunigen und bei Bedarf wieder zu bremsen, hätte man in den radioaktiven Substanzen einen riesigen Energievorrat zur Verfügung.

Angesichts dieser vielversprechenden Aussichten wurde schon zu Beginn dieses Jahrhunderts versucht, die Radioaktivität irgendwie zu beeinflussen.

Doch weder bei mehreren Tausend Grad Hitze noch in extremer Kälte, weder in der dünnen Hochgebirgsluft noch unter riesigem Druck ließen sich die Vorgänge im Inneren der Materie verändern. Unkontrollierbar für den Menschen wurde gemächlich wie seit ewigen Zeiten Energie in winzigen Mengen aus den Atomen freigesetzt – zumindest vorerst noch.

Atomkerne unter Beschuß – die erste künstliche Atomkernumwandlung

Wenn schon Hitze und Kälte der Radioaktivität eines Stoffes nichts anhaben konnten, war es dann vielleicht möglich, sie von innen her zu beeinflussen?

Wieder war es Rutherford, diesmal im Jahre 1919, der mit einer α -Strahlen-Kanone Materie beschuß; diesmal mit dem Ziel, Atomkerne zu treffen.

Da man natürlich in diesen winzigen Größenordnungen kein Zielschießen veranstalten kann, brachte er seine α -Strahlenquelle in einen Behälter, der mit dem Gas Stickstoff gefüllt war. Irgendwann würde sicherlich eines der ausgeschleuderten α -Teilchen auf einen Stickstoffatomkern knallen.

Und tatsächlich entdeckte Rutherford solche Volltreffer, besser gesagt, er entdeckte die Folgen solcher Treffer: Stickstoffatome hatten sich z.T. in Sauerstoffatome gewandelt. Protonen, also positiv geladene Atomkernteilchen, die plötzlich im Gasbehälter zu messen waren, brachten Rutherford auf die Spur dieser ersten vom Menschen bewußt durchgeführten Atomkernumwandlung.

Einmal auf den Geschmack gekommen, legten die Atomforscher nun richtig los. Auch die anderen chemischen Elemente wurden einem Bombenhagel von α -Teilchen ausgesetzt. Mit schmaler Erfolgsbilanz.

Zwar stellte man fest, daß sich auch die Atomkerne von Lithium, Bor und Beryllium verändern lassen, doch sind das alles Atomkerne, die aus einer geringen Anzahl Protonen aufgebaut sind.

Schon Aluminiumatomkerne, die 13 Protonen besitzen, konnten dem Ansturm der α -Teilchen-Granaten trotzen. Ihre große Zahl von positiven Ladungen hielt die ebenfalls positiv geladenen α -Teilchen auf Distanz. Gleichartige Ladungen stoßen sich ab, und bei 13 Protonen waren die Abstoßungskräfte so groß, daß die Energie der α -Teilchen nicht mehr genügte, um bis zum Atomkern vorzudringen.

Aber die Ruhe für die großen Atomkerne hielt nun auch nicht mehr allzu lange.

Im Jahre 1932 machte der Engländer *James Chadwick* (1891–1974) eine fürwahr durchschlagende Entdeckung: *das Neutron*.

Bei seinen Bombardierungsversuchen à la Rutherford stellte er fest, daß aus dem Metall Beryllium Teilchen herausgeschlagen werden, die eine Masse haben wie Protonen. Allerdings sind sie nicht elektrisch neutral, sondern geladen, Neutronen also.

Wenn es gelingen würde, Atomkerne einem Neutronenhagel auszusetzen?

Man müßte ja lediglich α -Teilchen auf Beryllium prallen lassen. Dabei werden Neutronen frei, die dann vielleicht auch Atomkerne mit einer großen Protonenzahl „stürmen“ könnten, denn schließlich sind die elektrisch ungeladenen Neutronen nicht den Abstoßungskräften ausgesetzt.

Das Neutron als Werkzeug für die Atomkernbastler

Der italienische Physiker *Enrico Fermi* (1901–1954) arbeitete genau nach dieser Idee. Sein Forschungsteam und er setzten an der Universität Rom Anfang der dreißiger Jahre vier Jahre lang Element für Element einem Neutronenhagel aus.

Die Neutronen erwiesen sich als ideales Instrument für das Atomkernebasteln. Bei zahlreichen Elementen hatten die Forscher Erfolg. Atomkerne von Stoffen, die normalerweise stabil waren, wurden nach dem Beschuß von Neutronen radioaktiv.

Aber das Uran, mit 92 Protonen das Element mit dem größten Atomkern, bereitete ihnen Kummer.

Die Uranatomkerne, die ja bereits von Natur aus schon radioaktiv sind, änderten sich unter Neutronenbeschuß zwar auch. Das konnte man an der Veränderung der Radioaktivität feststellen. Aber sie wurden dabei weder zu Thoriumatomkernen, wie beim natürlichen radioaktiven Zerfall, noch zu Radium oder Radonkernen, die 4 bzw. 6 Protonen im Atomkern weniger haben und somit noch in der Nachbarschaft der Uranatomkerne liegen.

Was war los mit dem Uranatomkern?

Wieder einmal blühte die Spekulation. Wurde vielleicht das Neutron vom Uranatomkern festgehalten? Könnte es nicht sein, daß

dadurch völlig neuartige, künstliche Atomkerne entstanden sind? In vielen Laboratorien der Welt wurden die Versuche von Fermi wiederholt, in der Hoffnung, die neuen Atomkerne endlich zu entdecken. Vergeblich!

Da zeigten im Winter 1938 die Berliner Chemiker *Otto Hahn* (1879–1968) und *Fritz Straßmann*, (1902–1980) daß man die ganze Zeit über sozusagen in der falschen Richtung gesucht hatte. Die neuen Atomkerne waren nicht größer, sondern erheblich kleiner geworden.

Das Energiepaket wird geknackt – die Atomkernspaltung

Als führende Spezialisten für den Nachweis von winzigen Mengen einer Substanz fanden Hahn und Straßmann in der Uranprobe nach Neutronenbeschuß einen Stoff, der alle chemischen Eigenschaften des Leichtmetalls Barium hatte.

Doch wo kam dieses Element her, dessen Atomkerne nur aus 56 Protonen bestehen und somit fast nur halb so groß sind wie die Uranatomkerne? Immer und immer wieder überprüften die beiden Forscher ihr Experiment, wiederholten die Versuche und suchten nach Ursachen von möglichen Verunreinigungen. Erst als sie mit Sicherheit alle Fehlerquellen ausschließen konnten, trauten sie sich, ihre Entdeckung der Fachwelt bekannt zu machen:

Die Atome des Bariums konnten nur aus Uranatomen entstanden sein, die bei Neutronenvolltreffern – zerplatzt sind.

Kaum hatte Otto Hahn am 22. 12. 1938 den Brief mit der Mitteilung dieser Ergebnisse im Briefkasten, wollte er ihn auch schon wieder herausziehen – so unwahrscheinlich kam es ihm vor, daß das winzige Neutron den Kern eines Uranatoms zertrümmert haben sollte! Doch erstaunlich war nicht nur, daß der Atomkern platzte, sondern vor allem: wie.

Das Neutron prallt mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 Kilometer pro Sekunde auf den Atomkern, doch die Kernbruchstücke fliegen mit etwa 10.000 Kilometer pro Sekunde auseinander. Insgesamt wird also durch die Spaltung eines Atomkerns mehr Energie freigesetzt als durch das heranfliegende Neutron hereingebracht.

Die Spaltung eines Uranatomkerns im Modell



Ein Neutron prallt
auf einen
Atomkern...



... dieser beginnt zu
schwingen. Die Kern-
kraft hält die Kern...



... -teilchen nicht mehr
zusammen. Der Atom-
kern zerplatzt in zwei
kleinere Atomkerne und
ein paar Neutronen.

Damit war der Weg gefunden, der zur Nutzung der Energie in den Atomen führen konnte. Das Energiepaket Atomkern ließ sich knacken, der Mensch konnte nun auf die Freisetzung der Kernenergie Einfluß nehmen.

Allerdings würde die Energie, die bei der Spaltung eines einzigen Atomkerns freigesetzt wird, nicht reichen, um auch nur einen Tropfen Wasser um einen Grad zu erwärmen.

Aber bei der Spaltung eines Uranatomkerns entstehen nicht nur zwei kleinere Trümmerkerne, sondern auch zwei oder drei Neutronen.

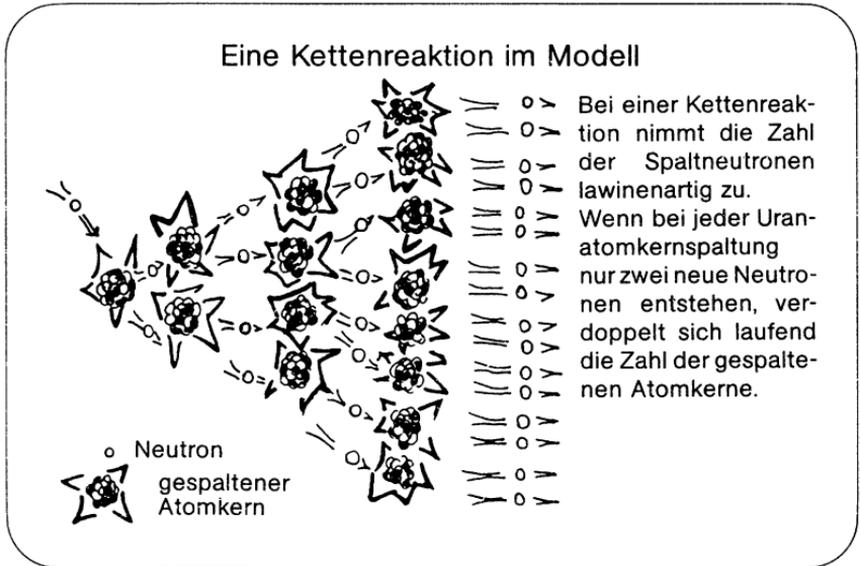
Und die können die übrigen Uranatomkerne ganz schön durcheinanderwirbeln.

Hektik in der Atomwelt – die Kettenreaktion

Mit etwa 20000 Kilometer pro Sekunde rasen die neu entstandenen Neutronen aus dem Atomkern. Bei dieser Riesengeschwindigkeit treffen sie in unvorstellbar kurzer Zeit auf die nächsten Uranatomkerne – und spalten diese.

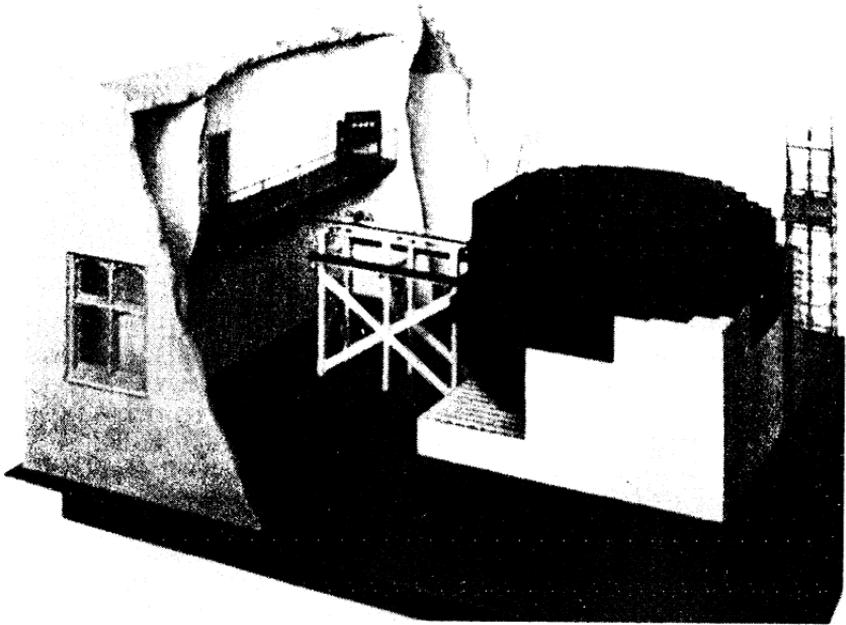
Nun sind vier Neutronen zum Spalten da, dann 8, 16, 32, 64 ... usw. Diese lawinenartige Neutronenvermehrung durch ständig neue Atomkernspaltungen geht so schnell, daß in weniger als einer millionstel Sekunde ungeheuer viele Atomkerne gespalten werden können.

Und dann sieht die Energierechnung schon anders aus: Werden die Atomkerne von einem einzigen Gramm Uran vollständig gespalten, wird soviel Energie frei wie bei der Verbrennung von 2500 kg Steinkohle.



Voraussetzung für die Entstehung einer solchen Kettenreaktion ist allerdings, daß soviel Uran vorhanden ist, daß die Neutronen sofort nach ihrer Entstehung wieder auf neue Atomkerne treffen können. Nur dann kann eine sich selbst unterhaltende Kettenreaktion ablaufen – explosiv, unter Freisetzung der ungeheuren Energiemengen in Bruchteilen einer Sekunde; oder nach und nach, wenn es gelingt, die ständig neu entstehenden Neutronen nach Bedarf wirken zu lassen.

Am 2. 12. 1942, vier Jahre nach der Entdeckung der Atomkernspaltung, war es soweit: die erste von Menschen kontrollierte Ketten-



Die unter Anleitung von Enrico Fermi gebaute Vorrichtung ähnelte eher einer Kohlenhalde.

Um eine gesteuerte Kettenreaktion zur Freisetzung der Kernenergie zu erreichen, wurden einige Tonnen Uran in 40000 Blöcken aus Graphit (Kohlenstoff) eingebettet. Graphit erhöht die Wirkung von Neutronen bei der Kernspaltung.

reaktion fand statt. In einer Halle unter den Tribünen eines Sportstadions in Chicago, USA, gelang es einem Team internationaler Wissenschaftler, eine Kettenreaktion in Gang zu setzen und wieder zu unterbrechen.

Die Leitung dieses Versuches hatte der uns schon bekannte Enrico Fermi (vgl. S. 38). Zwar war der damals freigesetzte Energiebetrag äußerst gering, doch das Experiment gab Gewißheit, daß es möglich ist, den Verlauf einer Kettenreaktion zu beeinflussen.

Dem Ziel, an dem man seit mehr als 2 Jahren arbeitete, war man ein erhebliches Stück näher gekommen: dem Bau der Atombombe – gegen Hitler-Deutschland.

Fehlschaltung – von der Atomkernspaltung zur ersten Atombombe

Atomwaffen für Hitler?

Otto Hahns Entdeckung der Atomkernspaltung 1938 in Berlin war in eine schwierige Zeit gefallen.

Nach Hitlers Machtübernahme im Januar 1933 hatten die Nationalsozialisten in Deutschland die Gewerkschaften zerschlagen, politische Gegner der Regierung wurden terrorisiert, die Juden sahen sich wachsender Verfolgung ausgesetzt. Waffenklirrend verkündete die nationalsozialistische Propaganda den Weg Deutschlands zu einer Weltmacht.

Obwohl zahlreiche Naturwissenschaftler vor den Nazis geflohen waren, arbeiteten in Deutschland Anfang 1939 noch bedeutende Atomphysiker, denen man genügend Fähigkeiten zutrauen konnte, Otto Hahns Entdeckung für den Bau von Atomwaffen weiterzuentwickeln.

Mit diesem Gedanken plagten sich jedenfalls zu Beginn des Jahres 1939 die in den USA lebenden Atomphysiker *Leo Szilard* (1898–1964), *Edward Teller* (geb. 1908) und Enrico Fermi.

Szilard und Teller, gebürtige Ungarn, waren 1933 vor den Nazis aus Deutschland geflohen; Fermi hatte zusammen mit seiner jüdischen Ehefrau 1938 sein Heimatland Italien verlassen, weil sich auch dort unter der Diktatur des Hitlerfreundes Mussolini Rassenhetze ausgebreitet hatte.

Ab März 1939 fanden die Sorgen dieser drei Physiker über geheime Fortschritte der deutschen Atomforschung neuen Nährboden:

Deutsche Truppen marschierten in die Tschechoslowakei ein; kurz darauf verboten deutsche Behörden die Ausfuhr von Uranerz aus den tschechischen Erzgruben. Und in Berlin trafen auf Einladung

der Regierung die deutschen Atomforscher zu einer gemeinsamen Konferenz zusammen.

War man in Deutschland schon dabei, mit Otto Hahns Entdeckung Pläne für eine Waffe zu schmieden, die den Nazis eines Tages die Vorherrschaft auf der Welt sichern würde?

Zunächst fanden die drei besorgten Wissenschaftler in den USA weder unter ihren Kollegen noch bei militärischen Stellen Gehör für ihre Warnungen. Die einen hielten den Bau von Atomwaffen auf absehbare Zeit für unmöglich, die anderen verstanden erst gar nicht die Reichweite von Otto Hahns Entdeckung.

Erst Albert Einsteins Hilfe brachte den Stein ins Rollen.



Einstein
USA 15c

Albert Einstein – sein Brief an den amerikanischen Präsidenten half mit, die Weichen für den Bau der amerikanischen Atombombe zu stellen. Nach dem Krieg sagte Einstein zu seiner Rolle:

„Ich war mir der furchtbaren Gefahr wohl bewußt, welche das Gelingen dieses Unternehmens für die Menschheit bedeuten würde. Aber die Wahrscheinlichkeit, daß die Deutschen an demselben Problem mit Aussicht auf Erfolg arbeiten dürften, hat mich zu diesem Schritt gezwungen.“

(Einstein, zitiert nach Herneck 1974, S. 100)

(aus: Radkau 1981)

Einstein (1879–1955) war seit Jahrzehnten weltberühmt und genoß auch in den USA hohes Ansehen, nicht nur wegen seiner unwältzenden physikalischen Entdeckungen, sondern auch, weil er sich unermüdlich für Gerechtigkeit, Frieden und Menschlichkeit eingesetzt hatte. Seit 1933 lebte auch dieser deutsche Physiker in den USA, geflohen vor den Nationalsozialisten.

Ein gemeinsam verfaßter und von Einstein unterzeichneter Brief verschaffte den Sorgen Szilards und seiner Kollegen Gehör an höchster Stelle – beim amerikanischen Präsidenten Roosevelt.

Als Roosevelt im Oktober 1939 schließlich zögernd die Unterstützung der Regierung für die Atomforschung zusagte, hatte sich in

Europa die Lage bereits weiter verschärft. Deutschland hatte Polen überfallen und lag im Krieg mit Frankreich und Großbritannien. Das amerikanische Atomprojekt kam zunächst zwar nur schleppend voran, aber die weitere Kriegsentwicklung beschleunigte die amerikanischen Anstrengungen:

Im Frühsommer 1940 überfielen deutsche Truppen die Niederlande, Belgien, Luxemburg und Frankreich, ein Jahr später die Sowjetunion. Als im Dezember 1941 japanische Bomber Pearl Harbour, den amerikanischen Flottenstützpunkt auf Hawaii, angriffen und wenige Tage darauf Deutschland und Italien den USA den Krieg erklärten, waren die USA endgültig am Zweiten Weltkrieg beteiligt. Im Frühjahr 1942 flossen schon mehrere Millionen Dollar in das amerikanische Atomprojekt, doch es sollten insgesamt zwei Milliarden Dollar und die Arbeit von über hunderttausend Menschen nötig werden, um aus der Planung in den Köpfen von Wissenschaftlern eine funktionierende Bombe zu machen.

Vorerst, Anfang 1942, war es jedoch noch nicht einmal sicher, ob es überhaupt jemals möglich sein würde, eine Bombe zu bauen.

Uran gibt noch keinen Bombensprengstoff

Im Sommer 1939 hatte Niels Bohr nachgewiesen, daß nicht alle Atomkerne des Urans durch Neutronen spaltbar seien.

Ja, eigentlich erwiesen sich die spaltbaren Atomkerne als ziemlich seltene Exemplare.

Wie von fast allen chemischen Elementen, gibt es auch von Uran verschiedene Arten von Atomkernen. Die Anzahl der Protonen (vgl. S. 26) ist in allen Uranatomkernen gleich groß, nicht so die Neutronenzahl.

So sind die meisten Uranatomkerne aus 92 Protonen und 146 Neutronen zusammengesetzt. Es gibt aber auch Uranatomkerne, die neben den 92 Protonen nur 143 Neutronen besitzen.

Atomkerne desselben Elements mit gleicher Protonenzahl, doch einer unterschiedlichen Anzahl von Neutronen, nennt man *Isotope*. Zur Kennzeichnung der jeweiligen Atomkernart schreibt man die Anzahl der Atomkernteilchen mit zum Stoffnamen:

Uran238 bedeutet: Uranatomkerne mit 92 Protonen und 146 Neutronen (zusammen 238 Teilchen).

Uran235 bedeutet: Uranatomkerne mit 92 Protonen und 143 Neutronen (zusammen 235 Teilchen).

Die Unterschiede zwischen den beiden Atomkernarten erscheinen gering. Doch ihre Reaktion auf einen Zusammenstoß mit einem Neutron ist so verschieden wie das Verhalten von rohen Eiern und Vollgummibällen, die zu Boden fallen.

Am Uran238 Atomkern prallen Neutronen je nach Geschwindigkeit einfach ab, manchmal bleiben sie auch im Atomkern stecken (vgl. dazu S. 49 u. S. 79). Lediglich die Uran235 Atomkerne können von Neutronen gespalten werden.

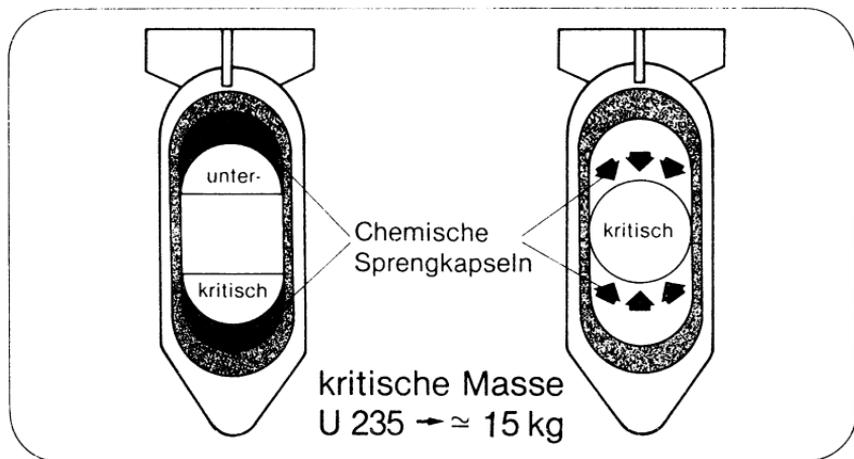
Im Natururan, wie es als Erz in verschiedenen Lagern der Erde gefunden wird, kommen die Uran235 Atomkerne jedoch sehr selten vor. Auf 139 Atomkerne des Uran238 kommt nur ein Uran235 Atomkern. Eine Kettenreaktion ist in diesem Natururan unter gewöhnlichen Umständen nicht möglich, denn viel zu selten trifft ein Neutron auf einen spaltbaren Uran235 Atomkern. Viel häufiger stoßen sie mit einem Uran238 Kern zusammen und werden von diesem einkassiert.

Um eine Bombe zu bauen, in der eine schlagartig ablaufende Kettenreaktion große Energiemengen freisetzen soll, müßte man reines Uran235 gewinnen, und das gleich kilogrammweise.

Zwar würde schon die vollständige Spaltung aller Atomkerne von wenigen Gramm Uran235 zur Freisetzung riesiger Energien führen - nur läßt sich in diesem Häufchen Uran keine Kettenreaktion auslösen. Aus dieser geringen Masse würden Neutronen häufiger herausausen, als auf Atomkerne zu treffen. Eine einmal einsetzende Kettenreaktion käme sehr schnell zum Erliegen. Man sagt, die Masse ist noch nicht *kritisch*.

Im Sommer 1942 war es den Atombombenbauern noch ziemlich unklar, ob die *kritische Masse* Uran235 nur 5 kg oder 100 kg betragen würde.

Auch heute ist nicht offiziell bekannt, wieviel Kilogramm Uran235 tatsächlich benötigt werden, um eine schlagartig verlaufende Kettenreaktion stattfinden zu lassen. Man schätzt die kritische Masse auf etwa 15 kg.



vor der Explosion:

die kritische Masse ist in zwei Halbkugeln aufgeteilt

Auslösung der Explosion:

die beiden Halbkugeln werden von der Druckwelle des gezündeten chemischen Sprengstoffs zusammengetrieben ► Kettenreaktion

Allerdings reicht diese Masse für die Entstehung einer Kettenreaktion nur dann aus, wenn das Uran in Kugelform zusammengeballt ist. Eine Kugel hat von den verschiedenen Körperformen, die eine Masse eines Stoffes einnehmen kann, die kleinstmögliche Oberfläche. Aus einer Kugel Uran235 von 15 kg können daher weniger Neutronen entweichen als aus einem kastenförmigen Uranblock von 15 kg.

Jetzt ist das Funktionsprinzip einer Atombombe zu erklären: Zwei Halbkugeln aus Uran235, die zusammen die kritische Masse von 15 kg ergeben, werden getrennt in den Bombenbehälter montiert und mit einem normalen chemischen Sprengstoff umgeben. Dazu kommt ein Zünder, um den Sprengstoff zur Explosion zu bringen, sowie eine Neutronenquelle, z.B. aus Radium-Beryllium (vgl. S. 38). Die Neutronen spalten zwar so manchen Uranatomkern, doch zu einer Kettenreaktion kann es zunächst nicht kommen.

Erst wenn der normale Sprengstoff gezündet wird, treibt die Druckwelle im Bombenmantel die beiden unterkritischen Uranhalb-

kugeln zusammen, und in Bruchteilen von Sekunden läuft eine Kettenreaktion ab, in der unvorstellbar viele Uranatomkerne gespalten werden und auf einen Schlag gewaltige Energiemengen freisetzen. Im Prinzip leicht einzusehen – nur müßte man das Uran²³⁵ haben.

Anreichern oder Brüten? Zwei Wege zur Atombombe

Wie kommt man heran an genügend große Mengen Uran²³⁵? Es ist nicht nur selten – eine Tonne enthält nur wenige Kilogramm der spaltbaren Atomkerne – sondern obendrein schwer vom Uran²³⁸ zu trennen.

Schließlich sind im Uran die Atomkerne nicht fein säuberlich geordnet, sondern liegen im festen Atomverband aneinandergepackt durcheinander. Zwischen 139 Atomkernen Uran²³⁸ findet sich im Durchschnitt einer von Uran²³⁵.

Da die chemischen Eigenschaften von beiden Isotopen völlig gleich sind, lassen sich die seltenen Uran²³⁵ Atome durch chemische Reaktionen weder orten noch gar herauslösen.

Aber es gibt einen Ausweg – als Umweg.

Die chemische Verbindung von Uran mit dem Gas Fluor ist ein gasförmiger, grünlicher Stoff, Uranhexafluorid genannt.

Die Moleküle dieser Uranverbindung bewegen sich einzeln frei im Raum.

Und dabei wirkt sich der winzige Unterschied zwischen Uran²³⁸ und Uran²³⁵ Atomkernen aus. Da die Uran²³⁸ Atomkerne drei Neutronen mehr besitzen als die Uran²³⁵ Kerne, sind sie etwas schwerer. Die Gasmoleküle, an denen Uran²³⁸ Atomkerne mit herumsausen, bewegen sich daher etwas langsamer als die Uran²³⁵ Verbindungen. Pumpt man das Uranhexafluorid in einen gasförmigen Behälter, dessen Wände winzige Porenöffnungen besitzen, wandern die flinkeren Moleküle des Uran²³⁵-haltigen Gases etwas häufiger durch die Poren hindurch als die trägeren Moleküle mit Uran²³⁸ im Schlepp. Außerhalb des Behälters nimmt also der Uran²³⁵ Anteil etwas zu. Man sagt, Uran²³⁵ wird *angereichert*.

Da sich durch chemische Reaktionen das Uran wieder vom Fluor

lösen läßt, kann man auf diese Weise fast reines Uran²³⁵ gewinnen. Aber das Verfahren ist ungeheuer mühselig.

Eine einzige Anreicherungsstufe erhöht den Anteil an Uran²³⁵ nur um Bruchteile eines Prozents. Das Gas muß tausende von Entmischungsbehältern durchlaufen, ehe halbwegs reines Uran²³⁵ zu gewinnen ist.

Doch die Atomphysiker in den USA hatten noch einen zweiten Weg gefunden, der ihnen zu Atombombensprengstoff verhelfen sollte. Beim Zusammenprall mit Uran²³⁸ Atomkernen verlieren die Neutronen immer ein wenig von ihrer Energie, sie werden langsamer. Solch ein verlangsamtes Neutron kann von einem Uran²³⁸ Atomkern eingefangen werden. Der Atomkern hat sich damit allerdings übernommen - er ist nicht mehr so stabil.

Unter Aussendung von β -Strahlung (vgl. S. 29) wandelt sich ein Neutron dieses Atomkerns in ein Proton um. Dabei entsteht mit nunmehr 93 Protonen ein neues chemisches Element - Neptunium. Auch die Atomkerne des Neptuniums sind sehr radioaktiv, d.h. der neu gebildete Kern erfreut sich nicht lange seines Daseins. Wieder wandelt sich unter Aussendung von β -Strahlung ein Neutron zu einem Proton. Somit entsteht ein Atomkern mit 94 Protonen, *Plutonium*, ein silberweißes Schwermetall, dessen Atomkerne sich ebenfalls durch Neutronen spalten lassen.

In der Natur kommt Plutonium so gut wie überhaupt nicht mehr vor, weil es stark radioaktiv ist und seine vor Milliarden von Jahren entstandenen Atomkerne längst zu anderen chemischen Elementen zerfallen sind.

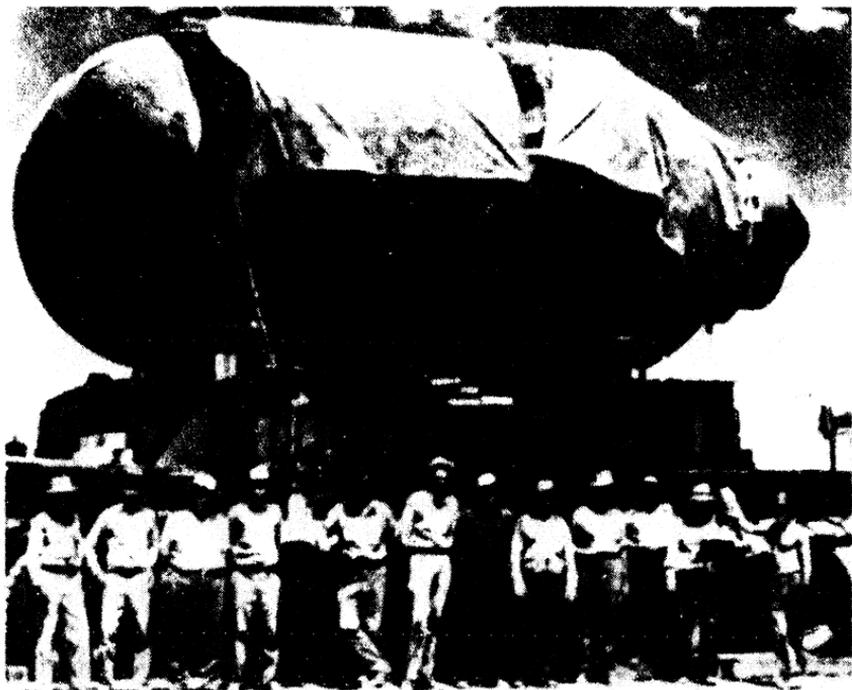
Aber durch Neutronenbeschuß von Uran²³⁸ Atomkernen läßt es sich herstellen oder, wie man auch sagt: *brüten*.

Soweit die Theorie über die Vorgänge im Kleinen.

Mit der Praxis zur Gewinnung von Uran²³⁵ oder Plutonium in großen Mengen haperte es 1942 allerdings noch empfindlich.

Plutoniumbrüten oder Urananreichern - welchen Weg sollte man wählen?

In Laborexperimenten hatte man in den ersten Monaten des Jahres 1941 etwa ein millionstel Gramm Plutonium herstellen können. Um es kilogrammweise zu erhalten, müßten Uranreaktoren gebaut werden, Vorläufer unserer heutigen Kernkraftwerke. In diesen würden nach einigen Wochen Betriebszeit soviel Uranatomkerne



Los Alamos im Frühjahr 1945

Jumbo nannte man diesen 214 Tonnen schweren Stahlkoloß.

Weil nicht sicher war, ob genügend Atombombensprengstoff hergestellt werden konnte, sollte der erste Atombombentest in diesem Behälter durchgeführt werden. Falls der Test fehlgeschlagen wäre, hätte man wenigstens das spaltbare Material von den Wänden kratzen können – hoffte man.

durch Neutronenbeschuß zu Plutonium werden, daß sich ausreichende Mengen Plutonium in einer Spezialfabrik vom Uran ablösen ließen (vgl. S. 100).

Auch auf dem Anreicherungswege winkten jede Menge Zusatzprobleme: Man würde einige Tausend Kilometer Rohrleitungen benötigen, um die erforderlichen 4000–5000 Gasentmischungsbehälter miteinander verbinden zu können. Zur Herstellung von Spezialpumpen, Meßgeräten und Ventilen müßten Fabriken gebaut werden. Und vor allem benötigte man für jeden Entmischungsbehälter ein „Sieb“ von höchster Präzision. Ein Metallplättchen von

der Größe eines Ein-DM-Stückes müßte viele Millionen genau gleiche winzige Löcher besitzen, um als Filter im Entmischungsbehälter überhaupt einen Trenneffekt für die verschiedenen Uran-gase zu erzielen.

Da im Frühjahr 1942 immer noch nicht feststand, welcher Weg am schnellsten und sichersten zum Atombombensprengstoff führen würde, entschied man sich für beide.

Die damit notwendig gewordenen umfangreichen Arbeiten mußten aufeinander abgestimmt werden, durften sich nicht wegen Streit um Geld und Zuständigkeit verzögern und vor allem: ihr Zweck mußte so weit wie möglich geheim bleiben.

Um all dieses zu gewährleisten, stellte man das Atomprojekt unter die Kontrolle der Armee. Im September 1942 übernahm General Groves, ein erfahrener Bauingenieur, die Leitung des Atomwaffenbaus.

Verstreut über die ganze USA wurden in den folgenden Monaten unter dem Decknamen „*Manhattan Projekt für die Entwicklung von Ersatzstoffen*“ Fabriken, ja ganze Städte aus dem Boden gestampft. In *Oak Ridge*, im US-Staat Tennessee im mittleren Osten der USA, wurde die Urananreicherungsanlage gebaut, eine gigantische Fabrik mit über 10000 Beschäftigten. Am anderen Ende der USA entstanden bei *Hanford* im nordwestlichen Bundesstaat Washington die Reaktoren zum Plutoniumbrüten, und in *Los Alamos*, einer kleinen Stadt in der Wüste Neu-Mexikos, entwickelte sich das „geistige Zentrum“ der Atomwaffenschmiede. Die besten Atomphysiker, unter ihnen Teller, Fermi und jede Menge zukünftiger oder schon ausgezeichneter Nobelpreisträger tüftelten dort unter der Leitung *Robert Oppenheimers* (1904–1967) an den Plänen für die endgültige Konstruktion der Bombe.

Mit unzähligen Berechnungen sollten sie die kritische Masse kalkulieren, einen geeigneten Zündmechanismus entwickeln und die zu erwartende Wirkung der Bombe vorhersagen. Hunderte von Technikern und anderen Wissenschaftlern unterstützten die Atomphysiker bei diesen Arbeiten.

Gerüchte aus Nazi-Deutschland trieben die amerikanischen Bombenbauer immer wieder zur Eile an und zerstreuten zeitweilig aufkeimende Bedenken an der moralischen Rechtfertigung für ihre Arbeit.

Wettlauf gegen ein Phantom – die Fertigstellung der ersten Atombombe

Mal verbreitete sich unter den Atomphysikern das Geücht, deutsche Agenten würden demnächst versuchen, Teile der USA radioaktiv zu verseuchen; ein anderes Mal verursachten Veröffentlichungen in deutschen Fachzeitschriften Aufregung, weil man in ihnen Anzeichen für deutsche Fortschritte in der Atomforschung zu sehen glaubte. Und als im November 1944 Luftaufklärer bemerkten, daß in Süddeutschland neue Industrieanlagen hochgezogen werden sollten, fürchtete man, in Deutschland würde bald die Urananreicherung beginnen.

Aber Pannen in allen Teilprojekten brachten immer wieder den Zeitplan der amerikanischen Bombenbauer durcheinander.

Als schließlich in den ersten Monaten des Jahres 1945 die ersten Plutoniumlieferungen in Los Alamos eintrafen, wurde dort immer noch fieberhaft an einem geeigneten Zündmechanismus für die Atombombe gewerkelt.

Doch noch bevor dieses Problem gelöst werden konnte, erwies sich der vermeindliche Wettlauf gegen die deutsche Atombombe als Kampf gegen ein Gespenst.

Am 25. 4. 1945 trafen sich amerikanische und sowjetische Truppen auf ihrem Vormarsch durch Deutschland in Torgau an der Elbe. Deutschland war geschlagen. Anfang Mai kapitulierte die deutsche Wehrmacht.

Als gut informierter General hatte Groves allerdings schon viele Monate vorher gewußt, daß die Furcht vor der deutschen Atombombe unbegründet gewesen war. Dieses hatte er aus Unterlagen eines führenden deutschen Atomphysikers, von Weizsäckers, erkannt, die einem Aufklärungstrupp in Straßburg in die Hände gefallen waren, kurz nachdem französische Truppen Ende 1944 die Stadt von den deutschen Besatzern befreit hatten.

Tatsächlich war schon im Sommer 1942 in der deutschen Atomforschung gegen die Entwicklung von Atomwaffen entschieden worden.

Zwar hatten auch in Deutschland Atomphysiker mit Unterstützung staatlicher Stellen seit 1939 an einer technischen Anwendung von

Otto Hahns Entdeckung gearbeitet und dabei auch über eine mögliche Anwendung der neuen Energiequelle für den Bau von Waffen geforscht. Doch im Juni 1942 hatte der Leiter der Arbeitsgruppe, Heisenberg, dem Rüstungsminister Speer berichtet, daß man zwar in absehbarer Zeit Atomenergie für den Betrieb von Kraftwerken, nicht aber für den Bau von Bomben nutzen könnte.

Ob die Atomforscher tatsächlich dieser Auffassung gewesen waren, oder ob sie ihr Wissen nicht zur Unterstützung der Kriegsführung Hitlers hergeben wollten, wurde nach dem Krieg Gegenstand vieler Spekulationen. Otto Hahn hat zeitlebens unter den Folgen seiner Entdeckung gelitten und sich zeitweise sogar mit Selbstmordgedanken getragen.

Allerdings wäre in Deutschland die Atomwaffenentwicklung wohl ohnehin kaum möglich gewesen:

Anders als die USA war Deutschland seit 1942 zunehmender Bombardierung ausgesetzt. Man hätte nirgends die nötigen Produktionsanlagen einigermaßen sicher aufbauen können. Außerdem hätte es wegen der riesigen Aufwendungen für die herkömmliche Rüstungsproduktion an Rohstoffen und Arbeitskräften gemangelt. Und schließlich war die Kriegsführung Deutschlands auf kurzfristige Erfolge ausgerichtet: Es hatte schon 1942 einen Befehl gegeben, nur diejenigen Forschungsarbeiten staatlich zu unterstützen, die innerhalb eines halben Jahres Fortschritte für die Kriegsführung bringen würden.

Von dieser Entwicklung hatten die Atomphysiker in den USA bis zur Niederlage Deutschlands nichts geahnt.

Aber als im Frühjahr 1945 der Alptraum von einer Atombombe in den Händen Hitlers zuende ging, folgte für einige unter den amerikanischen Atombombenbauern ein böses Erwachen.

Im Pazifik tobte zwischen Amerikanern und Japanern noch ein erbitterter Krieg - und der sollte nach Auffassung der amerikanischen Militärführung mit Atomwaffen rasch beendet werden.

Atombomben auf Japan?

Im Gegensatz zur Situation gegenüber Deutschland sechs Jahre zuvor, war sicher, daß Japan weder über Atombomben verfügen würde, noch Aussicht hatte, den Krieg für sich zu entscheiden.

Seit Anfang 1945 versanken japanische Städte unter dem Bombenhagel amerikanischer B 29-Bomber in Schutt und Asche. Die japanische Kriegsflotte war fast völlig zerstört, die Versorgung der Hauptinseln mit Lebensmitteln und Treibstoffen abgeschnitten. Dürfte gegen dieses Land die bald zur Verfügung stehende neue Waffe eingesetzt werden?

Wieder war Szilard unter den ersten, die aktiv wurden. Er sammelte unter seinen Kollegen Unterschriften gegen den Atombomberneinsatz und konnte auch Einstein wieder bewegen, einen Brief an den amerikanischen Präsidenten zu richten – dieses Mal, um vor den Folgen eines amerikanischen Atombombenabwurfs zu warnen.

Aber der im März 1945 verfaßte Brief erreichte den Präsidenten nicht mehr.

Roosevelt starb am 12. 4. 1945. Sein Nachfolger, der bisherige Vizepräsident *Harry Truman*, berief einen Ausschuß ein, der über den Einsatz der Atombombe beraten sollte.

Auch vier Wissenschaftler des Manhattan-Projekts arbeiteten in diesem Ausschuß mit, unter ihnen Fermi und Oppenheimer.

Zahlreiche Vorschläge wurden debattiert, wie die abschreckende Wirkung der Atombombe die Japaner auch ohne Blutvergießen zur Aufgabe des Krieges bringen könnte: z.B. durch eine Explosion in der Wüste vor japanischen Gesandten oder durch den Einsatz der Bombe nach vorheriger Warnung.

Doch schließlich kam man im Juni 1945 einstimmig zur Überzeugung:

Nur der direkte, unerwartete Einsatz der Atombombe gegen japanische Städte würde den möglicherweise noch Monate tobenden Kämpfen im Pazifik ein schnelles Ende bereiten.

Was zumindestens die Wissenschaftler in diesem Ausschuß nicht wußten:

Für den amerikanischen Geheimdienst mehrten sich die Anzeichen, daß in Japan Stimmen lauter wurden, die für eine Beendigung des Krieges sprachen.

Außerdem gab es Versuche aus Japan, über Regierungen anderer Länder die amerikanischen Bedingungen für die Einstellung der Kampfhandlungen zu erkunden.

Mittlerweile waren die Arbeiten im Manhattan Projekt soweit fortgeschritten, daß Groves mit genügend Atombombensprengstoff sowohl für eine Uran- als auch für ein Plutoniumbombe rechnen konnte.

Während die Konstruktion der Uranbombe als verlässlich angesehen wurde, war man sich über die Wirksamkeit des Zündmechanismus für die Plutoniumbombe nicht im klaren.

Doch am 16. 7. 1945 wurden in der Wüste im Süden Neu-Mexikos alle Zweifel über die gelungene Arbeit der Atomphysiker beseitigt: Die erste Plutoniumbombe wurde erfolgreich getestet.

Nur in einem hatten sich ihre Erbauer verrechnet: die Sprengkraft der Bombe war fast hundertmal größer, als die meisten von ihnen erwartet hatten.

Am 24. Juli 1945 gab Präsident Truman den endgültigen Einsatzbefehl: Sobald es die Wetterlage erlauben würde, sollte nach dem 3. August auf eine der folgenden Städte die Uranbombe abgeworfen werden:

Hiroshima, Nagasaki, Kokura, Niigata.

Während andere Städte Japans weiter unter dem Bombenhagel der B 29-Bomber lagen, blieben die vier für den Atomwaffeneinsatz ausgewählten Städte von den Bombenangriffen verschont:

In einer unzerstörten Stadt würde die Wirkung der Atombombe besonders deutlich werden.

Hiroshima und Nagasaki

Um Mitternacht zwischen dem 5. und 6. August starteten von der 2000 km südöstlich von Japan gelegenen Pazifikinsel Tinian Aufklärungsflugzeuge, um die Wetterlage über den japanischen Zielen zu erkunden.

Um 2.45 Uhr folgten drei weitere Flugzeuge, eines mit der Uranbombe an Bord.

Fünf Stunden später erreichten die Maschinen die japanische Hauptinsel. Eine Funkmeldung aus einem der vorausgeflogenen

Aufklärungsflugzeuge gab den Ausschlag für den Kurs auf Hiroshima: Ein Loch in der Wolkendecke hatte die Sicht auf den Stadtkern freigelegt.

Kurz nach acht Uhr tauchten die Bomber über Hiroshima auf. Dort hatte man gerade einen Fliegeralarm beendet, da Beobachtungstützpunkte nur die Annäherung von drei Maschinen gemeldet hatten – man hielt sie für Luftaufklärer.

Die Menschen kamen wieder aus ihren Schutzbunkern und Kellern heraus. Es war Hauptverkehrszeit, viele befanden sich auf dem Weg zur Arbeit.

Um 8.16 Uhr explodierte die Atombombe, 600 m über der Stadt.

Die Folgen ...

... aus der Sicht des ersten amerikanischen Augenzeugen

„Das Stadtgebiet sah aus, als sei es in Stücke gerissen worden. Nach einer Stunde, als wir uns etwa 440 km vom Ziel entfernt hatten, nahm die Wolke, die wir noch immer sehen konnten, an Mächtigkeit zu. Die Rauchsäule hatte eine Höhe von 15 km erreicht“.

(Bomber-Co-Pilot Robert Lewis, nach der Rückkehr auf Tinian, zitiert nach: Der Spiegel Nr. 22, 1957)

... nach Luftaufnahmen, wenige Tage später



... in nüchternen Zahlen

Von etwa 320000 Menschen, die sich in der Stadt aufhielten, starben etwa 80000 sofort oder kurze Zeit nach dem Angriff. 60000 waren verletzt.

Bis 1981 hatte sich die Zahl der Opfer infolge von Spätschäden auf über 150000 erhöht.

Von 200 Ärzten der Stadt waren 180, von 1780 Krankenschwestern 1654 tot oder verletzt.

Fast 70% der Gebäude wurden zerstört.

Drei Tage später, am 9. 8. 1945, explodierte die Plutoniumbombe über Nagasaki. Zu den Opfern von Hiroshima kamen 36000 Tote und 21000 Verletzte hinzu.

Einige Tage später war der Krieg mit Japan beendet.

Einige Jahre später gehörten Bomben mit der Zerstörungskraft der Nagasaki- und Hiroshimabomben bereits zu den kleineren Kalibern.

Fortschritte zum Ende der Welt?

Die Weiterentwicklung von Atomwaffen

Eine herkömmliche Fünfhundertnerbombe, wie sie im zweiten Weltkrieg zu Tausenden aus Flugzeugen über Städte abgeworfen wurde, enthielt etwa 200 kg TNT (Trinitrotoluol), ein blaß-gelbliches Sprengpulver, das auch zur Füllung von Minen, Granaten und Torpedos verwendet wird.

Um mit dem Bombensprengstoff TNT eine Sprengkraft wie mit der Hiroshimabombe zu erreichen, müßte man 13 000 Tonnen dieses heftig explodierenden Sprengstoffs in die Luft jagen – eine Ladung, die einen 2,2 km langen Güterzug füllen würde.

Von den rund 15 kg Uran²³⁵ in der Hiroshimabombe wurden die Atomkerne von knapp einem Kilogramm gespalten – als Kugel zusammengeballt hätte diese Masse kaum die Größe eines Tischtennisballs.

Hitze, Druck und Radioaktivität – die Vernichtungswirkung von Atomwaffen

Die Vorgänge im Kleinen ...

Sobald die beiden Uranhalbkugeln in der Atombombe zur kritischen Masse zusammengedrückt werden, genügt die Spaltung eines Uranatomkerns, um die Kettenreaktion auszulösen.

Es entstehen zwei Trümmeratomkerne und zwei oder drei weitere Neutronen, die mit Geschwindigkeiten bis zu 20.000 km pro Sekunde davonrasen.

Bei diesem Tempo vergeht kaum eine hundertmillionstel Sekunde, bis die neugebildeten Neutronen auf weitere Atomkerne knallen und diese spalten.

Jeweils im Abstand von einer hundertmillionstel Sekunde verdoppelt bzw. verdreifacht sich die Neutronenlawine und mit ihr die Anzahl der gespaltenen Atomkerne.

Der größte Teil der dabei freiwerdenden Energie verleiht den Trümmerstücken der Uranatomkerne Riesengeschwindigkeiten. Die auseinanderausenden Urankerntrümmer knallen auf die Atome des noch nicht gespaltenen Urans und des Bombenmantels und bringen auch diese in Schwung.

Ein Gewimmel von Neutronen, Atomkerntrümmern und ganzen Atomen rast auseinander; nicht einmal eine millionstel Sekunde nach ihrem Beginn kommt die Kettenreaktion zum Erliegen.

Von den unvorstellbar vielen und schnellen Atomtrümmern getroffen, kommen die Luftmoleküle in der Nähe der Bombe auf Riesengeschwindigkeiten. In einem grellen *Lichtblitz* macht sich die schlagartige Aufheizung am Explosionspunkt bemerkbar. Wie ein sich aufblähender Feuerball glüht die viele Millionen Grad heiße, sich in alle Richtungen ausdehnende Luft.

... ihre gewaltige Wirkung im Großen ...

Nach etwa einer Sekunde hat der glühende Luftball einen Durchmesser von 400 Metern erreicht. Seine Oberfläche ist mit über 8000°C heißer als die der Sonne (rund 6000°C). Ein bis zwei Sekunden lang strahlt er eine riesige *Hitze* ab, die von einer gewaltigen *Luftdruckwelle* begleitet wird.

Die Druckwelle entsteht, wenn die auseinanderfliegenden Bombenteilchen die Luftmoleküle vor sich hertreiben und zusammenpressen. Der Stoßdruck pflanzt sich zunächst mit Überschall-, dann mit Schallgeschwindigkeit (330 Meter pro Sekunde) fort.

Der Druckwelle folgt ein Wind von der Stärke eines schweren Orkans.

Zur Erhöhung der Druckwirkung wird die Atombombe in einigen hundert Metern Höhe zur Explosion gebracht. Ihre Folgen auf der Erde:

*im Umkreis von 400 m um den Bodennullpunkt (ground zero)**

- die Hitze läßt Gegenstände und Menschen verdampfen

im Umkreis von 2000 m

- die Druckwelle reißt Häuser ein und schleudert Menschen, Trümmer und Fahrzeuge durch die Luft
- kleine Gegenstände sausen wie Geschosse umher
- brennbare Materialien entflammen und verursachen Flächen- und Wohnungsbrände
- Menschen erleiden Verbrennungen dritten Grades (Hautverkohlung, Verdampfen der Zellflüssigkeit, Narbenbildung; tödliche Wirkung, wenn mehr als ein Viertel der Körperoberfläche betroffen ist)

im Umkreis von 3000 m

- die Druckwelle deckt Dächer ab, vereinzelt stürzen noch Wände ein
- leicht entflammbare Materialien geraten in Brand
- Verbrennungen zweiten Grades auf ungeschützter Haut (Blasenbildung, je nach Größe der betroffenen Körperoberfläche auch tödlich)
- ein orkanartiger Wind (Windstärke 11-12, 120 km/h) knickt Bäume und Masten)

Wenige Sekunden nach der Explosion ist der Feuerball erloschen und als Gemisch aus heißer Luft und Gas in die Höhe gestiegen. Mit der hochströmenden Luft werden säulenförmig Staubteilchen hinaufgerissen.

An den unendlich vielen Atombombentrümmern, den Spaltprodukten sowie an feinem Staub lagern sich Wassertröpfchen aus der Luft an. Es bildet sich eine Riesenwolke, die in 6-10 km Höhe langsam auseinandertreibt.

* als Bodennullpunkt wird der Punkt auf der Erde bezeichnet über dem die Bombe explodiert.

Dieser *Atompilz* kann stundenlang sichtbar bleiben, ehe er vom Winde verweht wird.

Mit dem *Atompilz* verteilen sich auch die Spaltprodukte der zerrümmerten Uranatomkerne, die mit ihrer starken Radioaktivität noch Jahre nach der Bombenexplosion für Menschen gefährlich werden können.

... die Folgen der Radioaktivität

Noch ehe die Hitzestrahlung und die Druckwelle wüten, werden Menschen von der *Anfangsstrahlung* einer Atombombenexplosion getötet oder schwer verletzt.

Ein Teil der bei der Kettenreaktion entstehenden Neutronen saust an allen Atomkernen vorbei – und verläßt das Bombenmaterial.

Ein dichter Neutronenschauer durchflutet das Gebiet in einigen hundert Metern Umkreis um den Bodennullpunkt.

Da die meisten Atomkerntrümmter stark radioaktiv sind, ist unmittelbar nach der Kettenreaktion die Luft auch von γ -Strahlung durchsetzt. Die gleichfalls entstehenden α - und β -Strahlungen bleiben dagegen wegen ihrer geringen Reichweiten auf die Umgebung der Bombenexplosion beschränkt (vgl. S. 35).

γ -Strahlung und Neutronen dringen in den Körper ein und verändern den Aufbau von Atomen; die γ -Strahlen hauptsächlich, indem sie Elektronen aus ihrer Bahn reißen (vgl. S. 34), die Neutronen, weil sie Atomkerne wegstoßen (vgl. S. 73).

Durch die Zerstörung der Atome von Körperzellen wird deren chemischer Aufbau und somit die biologische Wirkung verändert. Außerdem können die durch Veränderung von Atomen neu gebildeten chemischen Stoffe im Körper chemische Reaktionen auslösen, die zu weiteren Zerstörungen von Zellteilchen führen.

Besonders schwerwiegend wirken sich Zellschäden in Organen aus, deren Zellen in kurzen Zeitabständen immer neu gebildet werden, wie z.B. die Zellen des Knochenmarks, der Milz, der inneren Darmwände und der Haarwurzeln.

Übelkeit, Veränderung des Blutbildes, Erbrechen und Haarausfall sind daher auch die auffallenden Erscheinungen der *Strahlenkrankheit*, von der die Menschen je nach Abstand von der Atombombenexplosion mehr oder weniger stark betroffen sind.

Wirkung der Anfangsstrahlung nach einer Atombombenexplosion (Sprengkraft wie die Hiroshimabombe)

Abstand vom Bodennullpunkt	Verlauf der Strahlenkrankheit
bis 800 m	rasch eintretende Ohnmacht; Tod in ein bis zwei Tagen
bis 1000 m	nach einer Stunde Auftreten von Bewußtseins- störungen, Schwindelgefühl, vereinzelt Ohn- machtsanfälle, nicht endendes Erbrechen, bohrende Kopfschmerzen, Krämpfe nach einer kurzen Erholungszeit von 1-2 Tagen Verschlechterung des Zustands, Tod nach ein bis zwei Wochen
bis 1500 m	Auftreten der Erscheinungen der Strahlen- krankheit in abgeschwächter Form nach einigen Stunden; etwa 50 % der Betroffenen sterben, oft erst nach Wochen
über 1500 m	vereinzelt Schwächeanfälle und Übelkeit, Todesfälle sind nicht zu erwarten.

Langzeitschäden, die sich nicht mehr als Strahlenkrankheit bemerkbar machen, können auch in größerem Abstand vom Explosionsort entfernt hervorgerufen werden.

So z.B., wenn die Veränderung von Zellkernen zu Krebsbildungen führt oder, sofern Keimzellen betroffen sind, Mißbildungen bei Nachkommen bewirkt.

Die Einwirkungszeit der Neutronen dauert nur einen ganz kurzen Moment, die der γ -Strahlen hält einige Sekunden an.

Dann sind die Spaltprodukte mit dem wachsenden Atompilz in so große Höhen aufgestiegen, daß ihre Strahlung nicht mehr den Erdboden erreicht.

Vorläufig nicht.

Die im Atompilz verteilten Spaltprodukte der zertrümmerten Uranatomkerne haben zwar zusammengenommen nur eine Masse von einem knappen Kilo. Doch ihre Gesamtradioaktivität ist so groß wie die von einigen Zehntausend Tonnen Radium.

Zusammengeballt, zu winzigen Teilchen, schweben sie in der Luft umher, lagern sich an Staubteilchen und Wassertröpfchen an und kommen je nach Wetterlage, Windverhältnissen und eigenem Gewicht irgendwann wieder auf die Erde nieder – als *radioaktiver fall-out*.

Größere Staubteilchen rieseln bereits im Laufe der nächsten 24 Stunden nach der Bombenexplosion zu Boden, feinere Teilchen können dagegen jahrelang die Erde umschweben.

Explodiert die Atombombe jedoch nahe am Erdboden, wächst der radioaktive fall-out im Zielgebiet erheblich an. Hochgeschleuderte schwere Erdteilchen sinken rasch wieder zu Boden und schleppen ihre für Menschen noch tödlich wirkende Fracht mit.

Diese „hot spots“ (etwa: „heiße Flecken“) des frühen radioaktiven fall-outs werden durch Nahrung, Trinkwasser, Atemluft und offene Wunden in den Körper aufgenommen und bestrahlen von nächster Nähe lebenswichtige Organe.

Bei mäßigem Wind kann dieser fall-out noch auf einem Gebiet von 11 km Länge und 1,5 km Breite tödliche Strahlenbelastungen hervorrufen.

Der spätere, oft erst nach Jahren irgendwo niedergehende fall-out ruft keine Sofortschäden mehr hervor.

Doch auch diese Spaltprodukte lagern sich im Körper ab, so z.B. radioaktives Jod in der Schilddrüse, Strontium in den Knochen und Cäsium im Muskelgewebe.

Ob der Beschuss von Schilddrüsen und Knochenmarkszellen mit β - und γ -Strahlung aus unmittelbarer Nähe zu Schilddrüsenkrebs oder Leukämie führt, läßt sich nicht vorhersagen. Die Wahrscheinlichkeit ist umso größer, je mehr radioaktive Teilchen aufgenommen werden.

Soweit die Wirkung einer Atombombe von der Größenordnung der Hiroshima- und Nagasakibomben.

Mit Bombenstarts in den Rüstungswettlauf

Im Juli 1945 verhandelten die Staatschefs Truman (USA), Churchill (Großbritannien) und Stalin (UdSSR) in Potsdam über das zukünftige Schicksal des besiegten Deutschlands.

Als Truman am 24. 7. erfuhr, daß die Sowjetunion Anfang August in den Krieg gegen Japan eintreten würde, erteilte er noch am gleichen Tag den Befehl zum Atomwaffeneinsatz gegen Japan. Wie manche Geschichtsforscher glauben, auch, um den Krieg mit Japan zu beenden, ehe die Sowjets durch ihre Beteiligung Ansprüche im Fernen Osten anmelden könnten.

Nach Kriegsende verschärften die unterschiedlichen Interessen der USA und der UdSSR an der Aufteilung Deutschlands, der Neuordnung ihrer Einflüsse in Europa, ja im Grunde auf der ganzen Welt die Spannungen zwischen den beiden Staaten.

Das Auseinanderbrechen der gemeinsamen Verwaltung Deutschlands im März 1948, die Berlin-Blockade (Juni 1948 - Mai 1949) sowie der Koreakrieg (ab Juni 1950) stellten die vorläufigen Höhepunkte ihrer Interessenkonflikte dar.

Der „kalte Krieg“ lieferte in beiden Ländern bald die Argumente für immer neue Rüstungsanstrengungen.

Zunächst fühlte man sich in den USA durch den Besitz von Atombomben sicher und überlegen.

Für die nächsten 15-20 Jahre rechneten führende Politiker und Militärs nicht mit einer Konkurrenz der Sowjetunion auf dem Gebiet der Atomwaffen.

Doch am 29. 8. 1949 zündeten auf einem Testgelände in Sibirien sowjetische Atomforscher die erste Atombombe der UdSSR – mit sechsfacher Sprengkraft der Hiroshimabombe.

Das amerikanische Echo folgte drei Jahre später:

Am 1. 11. 1952 explodierte auf einer winzigen Pazifikinsel eine Testvorrichtung mit einer Sprengkraft von fast tausend Hiroshimabomben.

Eine Sprengwirkung von 12 Millionen Tonnen TNT löschte die Insel von der Landkarte und ließ einen Feuerball von sechs Kilometern Durchmesser wachsen. Solche Kaliber können mit der Atomkernspaltung nicht mehr erreicht werden. Der dafür notwendige Pluto-

nium- oder Uranbrocken würde auseinanderfliegen, ehe genügend Atomkerne gespalten wären.

Aber mit der Explosion der sowjetischen Atombombe hatte in den USA eine alte Idee Edward Tellers neuen Auftrieb gefunden – die Entwicklung einer Wasserstoffbombe.

Der Rüstungswettkampf kam auf Touren.

Das erste Etappenziel: Die Wasserstoffbombe

Energie aus Atomkernen läßt sich nicht nur durch Kernspaltung, sondern auch durch Kernverschmelzung freisetzen.

Während bei der Atomkernspaltung die schweren Elemente Uran und Plutonium Verwendung finden, sind es bei der Atomkernverschmelzung die Atomkerne des leichtesten Elements – des Wasserstoffs.

Unsere Erde bezieht seit ihrer Entstehung Energie aus Atomkernverschmelzungen in der Sonne.

Wasserstoff, unter gewöhnlichen Bedingungen ein Gas, besitzt im Atomkern in der Regel nur ein Proton. Umkreist wird dieses Proton von einem Elektron (vgl. S. 27).

In der Sonne, die zu über 70% aus Wasserstoff besteht, ist dies allerdings etwas anders.

Bei Temperaturen von 20 Millionen Grad und unter gewaltigem Druck haben dort die Wasserstoffatome ihre Elektronen verloren. „Hüllenlose“ Atomkerne, also Protonen, und einzelne Elektronen sausen mit Riesengeschwindigkeiten umher.

Diesen Zustand der Materie nennt man *Plasma*.

Protonen verschiedener Atomkerne, die in vollständigen Atomen von den umflitzenden Elektronen auf Distanz gehalten werden, können sich unter diesen Bedingungen sehr nahe kommen.

Ja, ihre großen Geschwindigkeiten machen es sogar möglich, daß sie die untereinander herrschenden elektrischen Abstoßungskräfte überwinden – und sich beim Zusammenprall zu einem gemeinsamen Atomkern vereinen.

Über einen mehrstufigen Vorgang entsteht in der Sonne auf diese Weise aus jeweils vier Wasserstoffatomkernen ein Atomkern des Edelgases Helium.

Mit zwei Neutronen und zwei Protonen im Atomkern ist Helium das zweitleichteste chemische Element.

Bei der Vereinigung der vier Protonen zu einem Heliumatomkern wandeln sich zwei Protonen zu Neutronen um, außerdem wird Energie freigesetzt.

Pro Kilogramm der so gebildeten Heliumatomkerne soviel, wie bei der Verbrennung von fast 20 Millionen Kilo Steinkohle.

In der Sekunde verschmelzen in der Sonne etwa 500 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium und liefern dabei die gewaltigen Energiemengen, von der die Erde in Form von Wärmestrahlung auch ihren Teil abbekommt, seit Milliarden von Jahren.

Da auch auf der Erde das Element Wasserstoff in der chemischen Verbindung Wasser reichlich vorhanden ist, spekulierten Atomphysiker schon in den dreißiger Jahren, ob das Sonnenfeuer wohl auch auf Erden zu entfachen sei.

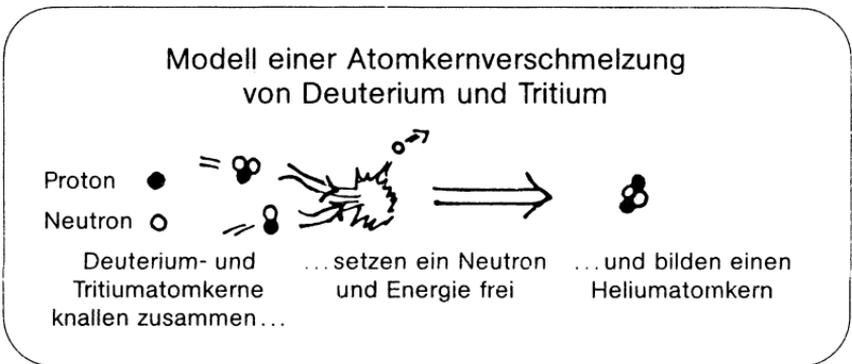
Zunächst schien die Sache ziemlich aussichtslos.

In der Sonne verläuft der Verschmelzungsprozeß der Wasserstoffatomkerne über mehrere Stufen, ziemlich gemächlich.

Dieser Vorgang läßt sich auf der Erde nicht nachahmen. Man müßte dafür längere Zeit Temperaturen von vielen Millionen Grad und einen hohen Druck aufrechterhalten.

Aber auch Wasserstoff hat verschiedene Atomkernarten, Isotope, zu bieten.

Atomkerne mit nur einem Proton (normaler Wasserstoff) sind zwar weitaus die häufigsten. Aber es gibt auch Wasserstoffatomkerne mit einem zusätzlichen Neutron (*schwerer Wasserstoff, Deuterium*) und,



noch seltener, Atomkerne, die sogar zwei Neutronen neben dem Proton zu bieten haben (*überschwerer Wasserstoff, Tritium*).

Ein Gemisch aus Tritium und Deuterium benötigt nur für Sekundenbruchteile hohe Temperaturen, um Atomkernverschmelzungen zur Bildung von Heliumatomkernen beginnen zu lassen.

Ist dieser Vorgang erst einmal angelaufen, wird in kürzester Zeit so viel Energie frei, daß unendlich viele Kernverschmelzungen stattfinden.

Die Energiemenge, die jeder einzelne Verschmelzungsprozeß freisetzt, ist zwar zehnmal kleiner als die Energie, die bei der Spaltung eines Uran²³⁵ Atomkerns abgegeben wird.

Doch da die Atomkerne des Deuterium-Tritium-Gemisches viel kleiner sind als die Uranatomkerne, befinden sich in einem Kilogramm des Wasserstoffgemisches etwa hundertmal mehr Atomkerne als in der gleichen Masse von Uran.

Die Energieausbeute pro Kilo Atomkerne ist daher bei der Kernverschmelzung um einige Male größer als bei der Kernspaltung.

Allerdings benötigt man zum Entfachen des nachgeahmten Sonnenfeuers für Sekundenbruchteile immerhin Temperaturen von rund 50 Millionen Grad.

Doch als zu Beginn der fünfziger Jahre die Atomkernbastler an der Wasserstoffbombe arbeiteten, stand das angemessene Streichholz zum Entzünden der künstlichen Sonne schon zur Verfügung: die Atombombe.

Die Hitzewirkung einer Kettenreaktion ist groß genug, um den Verschmelzungsvorgang in Gang zu bringen.

Tritium- und Deuteriumatomkerne, zur Verschmelzung gebracht durch eine Atombombenzündung – das ist das Prinzip der Wasserstoffbombe.

Die Testzündung im November 1952 (vgl. S. 64) hatte gezeigt, daß das Prinzip funktioniert.

Aber zur Herstellung einsatzfähiger Bomben war es noch nicht zu nutzen.

Wasserstoff, der bei Zimmertemperatur gasförmig ist, muß zunächst auf 240°C unter Null gekühlt werden.

Erst bei diesen Temperaturen wird Wasserstoff flüssig, so daß sich genügend große Mengen davon auf kleinem Raum unterbringen lassen.

Da für die Aufrechterhaltung derart frostiger Zustände einiges an Kühleinrichtungen nötig ist, glich der Sprengkörper eher einer Kühlhalle als einer Bombe.

Doch auch die Wasserstoffbombe ließ sich handlicher fertigen.

In Verbindung mit dem Leichtmetall Lithium bildet Deuterium ein kristallartiges Pulver, Lithiumdeuterid.

Unter normalen Bedingungen ist das bläulich weiße Pulver völlig harmlos. Doch von der Energie einer Atomkernspaltung angeheizt, zeigt es, was in ihm steckt.

Die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen rasen u.a. auf Lithiumatomkerne und spalten diese in einen Heliumatomkern – und einen Tritiumatomkern.

Die so entstehenden Tritiumatomkerne verschmelzen gleich wieder mit Deuteriumatomkernen unter Freisetzung von Energie, wie gehabt.

Da sich im Lithiumdeuterid ohne vorausgehende Atombombenzündung nichts abspielt, kann man theoretisch beliebige Mengen davon zusammenpacken – eine ideale Voraussetzung, um gewaltige Energiemengen freizusetzen.

Als die Amerikaner am 1. 3. 1954 ihre erste „trockene“ Wasserstoffbombe auf dem Bikiniatoll im Südpazifik zündeten, erreichten sie mit einer Sprengkraft von 15 Millionen Tonnen TNT eine zehnmal größere Sprengwirkung als alle Bomben zusammengenommen, die im 2. Weltkrieg Deutschland zertrümmerten.

Allerdings hatte man sich für diese Bombe noch etwas besonderes einfallen lassen.

Ihre Ummantelung bestand aus Uran²³⁸, dessen Atomkerne sich bekanntlich nicht spalten lassen.

Man müßte genauer sagen: von denjenigen Neutronen nicht, die bei einer Kettenreaktion im Uran entstehen.

Doch die bei der Kernverschmelzung freiwerdenden Neutronen sind mit Geschwindigkeiten von 50 000 km pro Sekunde doppelt so schnelle und energiereiche Geschosse. Und diese können sogar Uran²³⁸-Atomkerne spalten.

Damit hatte man drei Bomben in einer.

Da bei der Spaltung von Uran²³⁸-Kernen besonders stark radioaktive Trümmerkerne gebildet werden, nennt man diese Dreiphasenwaffe auch schmutzige Bombe – immerhin etwas.

Auch die Sowjetunion verfügte zu Beginn der fünfziger Jahre über Wasserstoffbomben.

Im folgenden Jahrzehnt testeten beide Länder insgesamt annähernd 500 atomare Sprengkörper; das dickste Kaliber mit über 60 Millionen Tonnen TNT-Sprengkraft zündete zu Beginn der sechziger Jahre die Sowjetunion.

Da die meisten dieser Testexplosionen überirdisch erfolgten, hat noch heute die ganze Welt etwas davon: in Form des späten radioaktiven fall-outs.

Immerhin einigten sich die beiden Staaten 1963 darüber, keine weiteren überirdischen Atomwaffentests mehr vorzunehmen.

Allerdings konnten beide Länder mittlerweile mit einer breiten Palette atomarer Sprengkörper aufwarten.

Bomben mit der 10-, 100-, ja 1000-fachen Sprengkraft der Hiroshimabombe waren ebenso dabei, wie Sprengköpfe, die bei ihrer Explosion kaum ein Zehntel der Zerstörungskraft der ersten Atomwaffe freisetzen.

Gerade diese kleineren Kaliber wurden für einen möglichen Einsatz in Europa und vor allem in der Bundesrepublik interessant.

Es geht auch handlicher – Atomwaffen für das Schlachtfeld Bundesrepublik

Nach der Gründung des Warschauer Pakts (1955) und dem Beitritt der Bundesrepublik zur NATO (1955) wurden die Bundesrepublik und die DDR zur Nahtstelle zwischen den beiden Militärblöcken. Man kann allerdings auch sagen: zur Pufferzone:

In einer Übung der NATO im Jahre 1955 wurde ein Angriff von Truppen des Warschauer Pakts auf Westeuropa angenommen, der mit Atomwaffen kleinerer Sprengkraft zurückgeschlagen werden sollte.

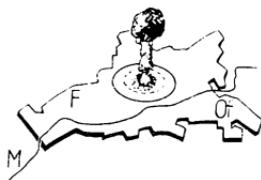
Nach den Planungen dieses Manövers hätten allein die NATO-Truppen 268 Atomwaffen auf deutschem Boden gezündet.

1,6–1,7 Millionen Tote unter der Zivilbevölkerung und fast doppelt so viele Verletzte wären das Ergebnis dieser Verteidigungsbemühungen gewesen.

Die Auswirkungen von Atomwaffenexplosionen über Frankfurt

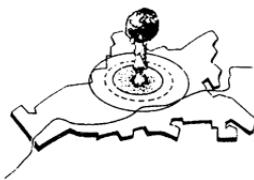
Im Laufe der fünfziger Jahre entwickelten die USA und die UdSSR Atomsprengkörper verschiedener Stärke. Hier sind im Vergleich die möglichen Zerstörungswirkungen von drei Atomsprengköpfen verschiedener Sprengkraft dargestellt.

Sprengkraft von
20 000 Tonnen TNT
(die ersten
Atomwaffen)



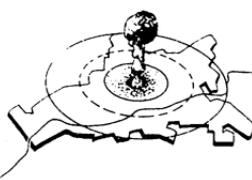
Zone 1 1 600 m
Zone 2 1 500 m
Zone 3 2 000 m

Sprengkraft von
100 000 Tonnen TNT
(schwerste Atomkern-
spaltungsbomben)



2 000 m
3 000 m
5 000 m

Sprengkraft von
1 000 000 Tonnen TNT
(mittelstarke
Wasserstoffbombe)



2 800 m
6 000 m
10 000 m

Zone 1 (schraffiert):

Bereich der tödlichen Wirkung
der Anfangsradioaktivität für
etwa die Hälfte der Menschen

Zone 2 (gestrichelte Kreislinie):

Druckwelle zerstört Häuser

Zone 3 (durchgezogene Kreislinie):

Verbrennungen dritten Grades
durch Hitzestrahlung

F = Frankfurt, Of = Offenbach, M = Main

Heute ist die Bundesrepublik vollgestopft mit atomaren Sprengkörpern verschiedener Art.

So lagern hier Atomminen mit einer Sprengkraft von 400 Tonnen TNT, die im Kriegsfall das Gelände für feindliche Truppen unwegsam machen sollen.

Von Ostfriesland bis zum Bodensee über das Ruhrgebiet und die Rhein-Main-Region zieht sich ein Raketengürtel entlang, von dem

sich Atomsprengköpfe mit Sprengkräften ab 1000 Tonnen TNT auf gegnerische Stellungen abschießen lassen.

Die Reichweite der Raketen: bis zu 130 km.

Im Nordosten der Bundesrepublik, zwischen Weser und DDR-Grenze, befinden sich mehrere Regionen, die bei einem möglichen Vorstoß von Warschauer-Pakt Truppen mit Atomwaffen unüberwindbar gemacht werden sollen.

Abgesehen davon, daß im Kriegsfall wohl auch der Gegner ähnliche Waffen einsetzen würde, wäre ein Teil der Bundesrepublik allein von den Atomwaffen der NATO zerstört.

Dadurch, so sagt man in der Militärsprache, wird die Glaubwürdigkeit des Einsatzes dieser Waffen gefährdet.

Der Gegner könnte darauf spekulieren, daß diese Atomwaffen nicht zum Einsatz kommen, weil sie zerstören würden, was sie eigentlich verteidigen sollten.

Die „logische“ Schlußfolgerung der Atomstrategen:

Man müßte eine Waffe entwickeln, die bei ihrer Explosion möglichst geringe Druck- und Hitzewirkungen hat, aber hohe Dosen an Radioaktivität freisetzt.

Feindliche Soldaten könnten damit kampfunfähig gemacht werden, ohne daß übermäßig große Zerstörungen an Wohnhäusern und Industrieanlagen in Kauf genommen werden müßten.

Seit 1958 arbeitete der amerikanische Atomphysiker Sam Cohen an der Entwicklung eines solchen „atomaren Sprengkörpers mit erhöhter Strahlen- und begrenzter Hitze- und Druckwirkung“, wie diese Waffe im militärischen Sprachgebrauch heißt.

In der Öffentlichkeit ist sie 1977 bekannt geworden unter dem Namen - *Neutronenbombe*.

Leben zerstören - Gebäude erhalten.

Die Neutronenbombe.

Über das Bauprinzip der Neutronenwaffe ist bis heute offiziell nichts bekannt.

Doch Fachleute vermuten, daß es sich bei der Neutronenwaffe um eine Mini-Wasserstoffbombe handeln müsse.

Bei einer Kernspaltbombe wird etwa 85% der freigesetzten Energie in Druckwelle und Hitzestrahlung und nur 15% in Radioaktivität umgesetzt, davon wiederum nur ein Drittel in sofort tödliche Anfangsstrahlung (γ -Strahlung und Neutronen). Bei Wasserstoffbomben ist das Verhältnis fast umgekehrt. Nur ein Fünftel der Kernverschmelzungsenergie geht in Druck und Hitze über; der größte Teil der restlichen 80% wird auf die Neutronen übertragen, die bei den Atomkernverschmelzungen entstehen.

Allerdings brauchen auch kleine Wasserstoffbomben zur Auslösung der Atomkernverschmelzungen als Zünder eine Atomspaltbombe. Wahrscheinlich ist es gelungen, eine Kettenreaktion durch eine sehr geringe kritische Masse auszulösen, so daß die unerwünschte Hitze- und Druckwirkung der Atombombe begrenzt wird.

Eine kleine Atombombe als Zünder – eine Mini-Wasserstoffbombe als Neutronenschleuder – so dürfte die Neutronenwaffe aufgebaut sein, bei der etwa 30% der insgesamt freiwerdenden Energie auf die davonsausenden Neutronen übertragen wird.

Da Neutronen im Vergleich zu den Abständen zwischen Atomen sehr klein sind, durchdringt der Neutronenschauer Wände, Kleidung, Panzerplatten.

**Wirkung der Explosion einer Neutronenwaffe
und einer Atombombe mit gleicher Sprengkraft
(1000 Tonnen TNT, Explosionshöhe: 450 m)**

Umkreis um den Bodennullpunkt	Atom- bombe	Neutronen- waffe
Zerstörung von Häusern und Industrieanlagen durch Druck und Hitze	bis 450 m	bis 250 m
tödliche Strahlenwirkung auf Panzerbesatzungen	bis 400 m	bis 800 m
tödliche Strahlenwirkung auf ungeschützte Personen im Freien für 50 % der Bestrahlten	bis 800 m	bis 1200 m

Rabiat wirkt er auf wasserstoffhaltige Materie.

Denn die Wasserstoffatomkerne, die in der Regel nur ein Proton besitzen und somit so groß sind wie die Neutronengeschosse, halten dem Neutronenhagel nicht stand.

Sie werden aus ihren chemischen Verbindungen herausgerammt. Im menschlichen Körper richtet der Neutronenschauer besonders schwere Verwüstungen an, weil sowohl die Zellflüssigkeit (Wasser) als auch sämtliche lebende Gewebe aus wasserstoffhaltigen chemischen Verbindungen besteht.

Die Moleküle der Körperzellen und des Zellwassers verlieren im Neutronenhagel ihre Wasserstoffatome.

Dabei entstehen neue, teilweise sehr reaktionsfreudige chemische Verbindungen, die chemische Reaktionen im Körper auslösen.

Die empfindlich aufeinander abgestimmten Vorgänge im gesamten Organismus geraten durcheinander, die Strahlenkrankheit setzt ein, je nach Stärke der Strahlenbelastung mit tödlicher Wirkung.

Zwar richtet auch eine Neutronenwaffe bei ihrer Explosion Zerstörungen durch Druckwelle und Hitzewirkung an, doch ist der Umkreis der tödlichen Strahlenwirkung größer als bei einer Atomspaltbombe gleicher Sprengkraft.

Neutronengewimmel unter Kontrolle - die Atomkernspaltung im Kernkraftwerk

Als Enrico Fermi im Dezember 1942 die erste kontrollierte Kettenreaktion auslöste, hatten seine Mitarbeiter und er zwar Gewaltiges zusammengehäuft:

52 Tonnen Uran und 1350 Tonnen Kohlenstoff (Graphit) waren zu einem neun Meter breiten, neuneinhalb Meter langen und sechs Meter hohen Kasten aufgetürmt.

Doch die Energieausbeute war bescheiden - sie hätte gerade gereicht, um eine Glühbirne zum Leuchten zu bringen.

Mit der gleichen Uranmenge lassen sich heute Kernkraftwerke betreiben, die eine Großstadt monatelang vollständig mit Elektrizität beliefern können.

Doch während von der Entdeckung der Kernspaltung bis zur Fertigstellung der ersten Atombombe knapp sechseinhalb Jahre vergingen, dauerte es nach dem Krieg fast noch einmal doppelt so lange, ehe das erste Mal eine Stadt mit Elektrizität aus einem Kernkraftwerk versorgt wurde: am 17. 10. 1956 ging an der Nordwestküste Englands das Kernkraftwerk Calder Hall in Betrieb und belieferte Haushalte und Industrie des Städtchens Whitehaven mit elektrischem Strom.

Aber auch bei dieser „friedlichen Nutzung“ spielten militärische Interessen eine Rolle.

Geheimniskrämerei und kühne Pläne - die Anfänge der Kernenergienutzung in Kraftwerken

In den USA bestand nach dem Zweiten Weltkrieg nur geringes Interesse an einer technischen Beherrschung der Atomkernspaltung zur kontrollierten Energiefreisetzung.

Die bereits während des Krieges in Hanford gebauten Kernkraftwerke dienten lediglich der Umwandlung von Uran238 zu Plutonium, das als Spaltstoff für Atomwaffen benötigt wurde. Die beim Reaktorbetrieb freigesetzte Energie leitete man ungenutzt an die Luft bzw. an das Kühlwasser ab.

Selbst als 1951 in den USA die erste Energieumwandlung von der Kernspaltungsenergie zum elektrischen Strom gelang, fehlte der Anreiz, die neue Technik für den Großeinsatz weiterzuentwickeln. Mit einheimischen Energievorräten wie Kohle, Öl und Wasserkraft ließen sich herkömmliche Kraftwerke billiger betreiben – die Stromerzeugung aus Kernenergie versprach, zumindest vorerst, noch kein lohnendes Geschäft.

Lediglich die amerikanische Marine drängte zur Entwicklung leistungsfähiger Reaktoren. Atomgetriebene U-Boote sollten möglichst unabhängig vom Treibstoffnachschub durch die Meere tauchen.

Etwas anders lag die Sache in Großbritannien.

Britische Forscher brachten nach dem Krieg als ehemalige Mitarbeiter im Manhattan-Projekt (vgl. S. 51) die neuesten technischen Kenntnisse über die Atomenergienutzung mit auf die Insel. Und da die einheimischen Energiequellen vergleichsweise dürftig waren, das Nordseeöl war damals noch nicht entdeckt, unterstützte die britische Regierung Forschung und Entwicklung zum Bau von Kernkraftwerken.

Doch auch dort war man nur mit halbem Herzen an der Stromerzeugung interessiert. Die britischen Reaktoren wurden so gebaut, daß beim Betrieb möglichst viel Plutonium abfiel – für die Verwirklichung eines eigenen Atomwaffenprogramms.

Gleiche Absichten verfolgte man in Frankreich. Dort baute man ähnliche Kernkraftwerke wie in Großbritannien – und verschaffte sich damit ebenfalls Spaltstoff für die angestrebte Atomrüstung.

Derart verflochten mit der Atomwaffenrüstung unterlag die Kernenergietechnik in den ersten Nachkriegsjahren strengen Geheimschriften. So durften z.B. amerikanische Firmen weder spaltbares Material besitzen noch mit ausländischen Firmen auf dem Gebiet der Atomenergienutzung zusammenarbeiten.

Zur Abwehr von „Atomspionage“ wurde hart durchgegriffen: 1950 verurteilte ein amerikanisches Gericht den ehemaligen Mitarbeiter

im Manhattan-Projekt, Klaus Fuchs, wegen Atomspionage für die Sowjetunion zu 14 Jahren Haft; 1953 wurden trotz weltweiter Proteste Julius und Ethel Rosenberg hingerichtet, weil sie angeblich amerikanische Atomwaffengeheimnisse an die Sowjetunion ver-raten hatten, ein Vorwurf, der nie aufgeklärt worden ist. Selbst Robert Oppenheimer, der „geistige Vater“ der ersten Atombombe (vgl. S. 51), mußte sich wegen angeblich kommunistischer Gesin-nung verantworten und wurde von der Mitarbeit an amerikanischen Geheimprojekten ausgeschlossen.

Die Geheimniskrämerei endete erst, als es nichts Entscheidendes mehr zu verbergen gab. Mitte der fünfziger Jahre konnten sich die USA und die UdSSR gegenseitig sowohl mit Atom- als auch mit Wasserstoffbomben bedrohen, Großbritannien verfügte seit November 1952 über eigene Atomwaffen.

So gaben diese drei führenden Atom-mächte auf der von den Vereinten Nationen organisierten *Ersten Weltkonferenz zur Atomenergie-nutzung* im August 1955 erstmals Einblick in ihre Kernenergiepläne. Unter den 73 in Genf versammelten Nationen war auch die Bundes-republik mit einer kleinen Abordnung vertreten.

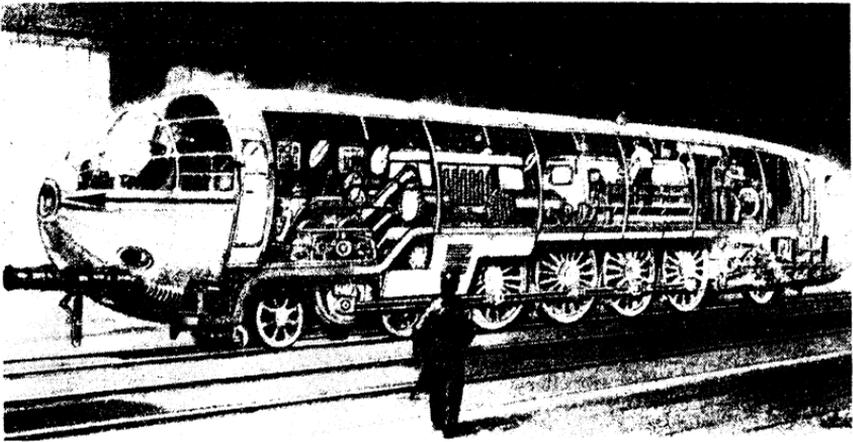
Doch, obwohl mit Otto Hahn immerhin der Entdecker der Kern-spaltung unter ihnen weilte, konnten die Vertreter der Bundes-republik nichts Interessantes bieten. Bis Mai 1955 hatten Bestim-mungen der Siegermächte des 2. Weltkriegs der Bundesrepublik die Atomforschung verboten.

Um so mehr blühte nach der Genfer Konferenz die Hoffnung, die Früchte der neuen Erkenntnisse miternten zu können.

Wie überall auf der Welt begeisterte man sich auch in der Bundes-republik an kühnen Spekulationen über die Anwendungsmöglich-keiten der neuen Energiequelle.

Mit Kernenergie sollte der Nordpol bewohnbar gemacht, Städte im Urwald klimatisiert und Meerwasser zur Bewässerung von Wüsten entsalzen werden.

In der Presse las man von sowjetischen und amerikanischen Ver-suchen mit atomgetriebenen Flugzeugen und Lokomotiven. Ameri-kanische Ingenieure schmiedeten Pläne für den Mini-Reaktor im Keller von Einfamilienhäusern. Und 1956 hielt man es für möglich, daß bereits 1960 der Elektrizitätsverbrauch der Bundesrepublik zu 80% mit Kernkraftwerken gedeckt werden könnte.



Modell einer Lok mit Kernenergieantrieb

Auch in der Sowjetunion plante man in den fünfziger Jahren den Bau von Atomloks. Mit wenigen Gramm Uran als Energieträger sollte eine solche Lok riesige Güterzüge von Moskau nach Peking schleppen können. Eine Diesellok benötigte damals dafür 360 Tonnen Treibstoff.

Solche Aussichten machten auch bei uns Staatsgelder zur Förderung der Kerntechnik locker.

Im Oktober 1955 wird ein „Bundesministerium für Atomfragen“ (erster Minister: F. J. Strauß), wenige Monate später die Deutsche Atomkommission gegründet. Dieses Gremium aus Atomphysikern und Vertretern der Elektro- und Chemieindustrie, der Banken und Energieversorgungsunternehmen sollte die Pläne für die Kernenergieentwicklung in der Bundesrepublik ausarbeiten.

Im Prinzip gibt es nämlich verschiedene Möglichkeiten, die atomare Kettenreaktion zu bändigen – nur welche wirtschaftlich erfolgreich und technisch sicher in Kernkraftwerken Anwendung finden könnte, das ließ sich damals, 1956, noch nicht vorhersagen.

Energiefreisetzung häppchenweise – die Zählung der Kettenreaktion

Während in einer Atombombe möglichst viele Atomkerne in winzigen Sekundenbruchteilen gespalten werden, um gewaltige Energiemengen plötzlich und unkontrolliert zu entfesseln, muß es im Reaktor erheblich gemächlicher zugehen.

Nach und nach, wohl dosiert, in kleinen Portionen soll die Energie aus den Atomkernen freigesetzt werden. Je nach Bedarf, mal mehr, mal weniger, und obendrein soll die Kettenreaktion auch noch abstellbar sein.

Keine leichte Aufgabe, wenn man bedenkt, daß ein großer Reaktor vor Betriebsbeginn mit etwa 3000 kg Uran²³⁵ beladen werden muß. Obwohl diese Spaltstoffmenge mehr als das Hundertfache der kritischen Masse in einer Atombombe beträgt, ist eine explosionsartig verlaufende Kettenreaktion allerdings völlig ausgeschlossen.

Kritisch, aber nicht explosiv

Bei einer Atombombenexplosion werden in weniger als einer millionstel Sekunde die Atomkerne von knapp einem Kilogramm Uran²³⁵ gespalten. Im Reaktor gehen die Atomkerne langsamer in die Brüche: je Sekunde höchstens etwa 0,05 Gramm.

Das hört sich wenig an, sind aber riesige Mengen an Atomkernen. Allein um eine kleine Taschenlampenbirne am Leuchten zu erhalten, müßte man pro Sekunde die Energie von 30 Milliarden gespaltenen Atomkerne zur Verfügung haben. In einem Kernkraftwerk finden in jeder Sekunde noch drei Milliarden mal mehr Spaltungen statt.

Pro Atomkernspaltung entstehen jeweils zwei oder drei Neutronen. Ein unvorstellbares Neutronengewimmel muß somit in Zaum gehalten werden.

Würde die Mehrzahl der Neutronen wieder auf spaltbare Atomkerne treffen, ginge der Reaktor durch wie eine Bombe.

Wenn dagegen zu wenig Neutronen Atomkerne spalten, kommt die Kettenreaktion rasch zum Erliegen.

Durch die Anordnung des Spaltstoffs im Reaktor muß der goldene Mittelweg zwischen unkontrollierter Ausdehnung und schlappem Versacken der Kettenreaktion gefunden werden:

Im Durchschnitt soll nur eines der bei jeder Spaltung frei werdenden Neutronen wieder auf einen Uran235 Atomkern treffen. Die erste Voraussetzung dafür ist die Verwendung einer geeigneten Mischung von spaltbaren und nicht spaltbaren Atomkernen.

Im Kernkraftwerk wird nicht, wie in der Atombombe, fast reines Uran235 eingelagert, sondern sogenanntes *schwach angereichertes Uran*, das nur zu etwa 3% spaltbare Uran235 Atomkerne besitzt. Die 3000 kg Uran235 verschwinden somit fast in 100000 kg nicht spaltbarem Uran238. Auf einen spaltbaren Atomkern kommen 30 nicht spaltbare.

Ohne ein wenig nachzuhelfen, könnte man bei dieser Verteilung nicht einmal die Kettenreaktion aufrechterhalten, weil die Neutronen viel zu oft auf Uran238 Kerne treffen.

Die *schnellen*, gerade aus einem gespaltenen Atomkern herausgestrauten Neutronen ($20000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$) prallen zwar von den Uran238-Kernen noch ab. Nur werden sie nach jedem Aufprall etwas langsamer.

Wenn sie nach mehreren Zusammenstößen *mittlere Geschwindigkeiten* erreicht haben (langsamer als $4000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$), kommen sie bei einem Aufprall auf Uran238-Kerne nicht mehr so leicht davon: sie werden einkassiert und der Atomkern Uran238 wandelt sich in einen Plutoniumkern um (vgl. S. 49).

Für die Spaltung von Uran235 ist das Neutron damit verloren. Die Überzahl von Uran238-Kernen macht es ziemlich aussichtslos, daß regelmäßig genügend Uran235 Atomkerne getroffen und gespalten werden können.

Aber das Neutronenschicksal läßt sich beeinflussen:

Werden die Neutronen durch Zusammenprall mit Atomkernen auf eine Geschwindigkeit von $2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ gebremst, bleiben sie vom Einfang durch Uran238-Kerne einigermaßen verschont.

Diese *langsamen* oder *thermischen Neutronen* prallen von Uran238 einfach wieder ab; treffen sie dann irgendwann auch einmal auf einen Uran235-Kern, wird dieser gespalten.

Neben dem Spaltstoff befindet sich im Reaktor daher auch eine Substanz, deren Atomkerne Neutronen bremsen.

„Neutronenbremser“ bestimmen den Reaktortyp

Als „Bremsmittel“ (*Moderator*) für Neutronen sind Stoffe mit kleinen Atomkernen besonders gut geeignet. So genügen beim Zusammenprall mit Wasserstoffatomkernen 18 Treffer, um ein Neutron von seinen atemberaubenden $20000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ auf vergleichsweise gemütlische $2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ zu bremsen. Auf die doppelt so großen Wasserstoffisotope Deuterium (vgl. S. 66) muß das schnelle Neutron schon 25 mal, auf die 12 mal größeren Kohlenstoffatomkerne sogar 125 mal knallen, ehe es entsprechend verlangsamt wird.

Als Neutronenbremser im Reaktor wäre daher Wasser gut geeignet, denn die Wassermoleküle besitzen jeweils zwei Wasserstoffatome (vgl. S. 21).

Bedauerlicherweise hat jedoch der normale Wasserstoff die Eigenschaft, hin und wieder Neutronen einzufangen.

Da das Wasserstoffisotop Deuterium diese Neigung nicht besitzt, ist Wasser, bei dem die Wasserstoffatome durch das schwere Wasserstoffisotop Deuterium ersetzt sind, ein günstigeres Bremsmittel – es läßt mehr Neutronen übrig.

Nur: das *schwere Wasser* kommt in der Natur recht selten vor, aus 1000 kg Wasser lassen sich nur 150 g Schwerwasser gewinnen. Die Schwerwasserproduktion ist deshalb eine teure Angelegenheit. Allerdings können Reaktoren mit schwerem Wasser als Moderator sogar mit nicht angereichertem Natururan betrieben werden.

Wasser als Moderator bietet somit die Auswahl zwischen zwei verschiedenen Reaktorbauweisen:

Die Verwendung von teurem angereichertem Uran als Spaltstoff und normalem billigen Wasser als Moderator führt zu *Leichtwasserreaktoren*. Mit billigem Natururan als Spaltstoff und teurem schweren Wasser als Moderator werden *Schwerwasserreaktoren* gebaut.

Und noch eine dritte Möglichkeit bietet sich für die Wahl des Moderators: Kohlenstoff.

Reaktoren mit Kohlenstoff als Moderator können ebenfalls mit Natururan arbeiten, benötigen allerdings noch ein zusätzliches Kühlmittel zur Ableitung der Wärme, die bei der Kernspaltung entsteht.

Kernkraftwerke „made in Germany“ – mit Nachhilfe aus Amerika

Als in der Bundesrepublik ab 1956 über eine geeignete Reaktorentwicklung beraten wurde, hatten sich andere Länder schon festgelegt. Um den kostspieligen und zeitraubenden Bau von Anreicherungsanlagen zu umgehen und von den Anlagen der USA unabhängig zu sein, setzte man in Frankreich, Großbritannien und Kanada auf Reaktorarten, die sich mit Natururan betreiben ließen. In Großbritannien und Frankreich wurden im Laufe der fünfziger Jahre Reaktoren mit Kohlenstoff, in Kanada mit schwerem Wasser als Moderator gebaut.

Auch in der Bundesrepublik sprach zunächst einiges dafür, daß sich dieser Reaktortyp durchsetzen würde.

Erstens strebte man auch hier eine möglichst große Unabhängigkeit von angereichertem Uran an. Zweitens hatten deutsche Physiker mit Schwerwasserreaktoren schon ein wenig Bekanntschaft gemacht: Das deutsche Uranprojekt hatte es bis zum Kriegsende immerhin zu einer Vorrichtung gebracht, die einem Schwerwasserreaktor ähnelte. Damals, im Frühjahr 1945, fehlten allerdings einige Tonnen Uran und vor allem ungestörte Arbeitsmöglichkeiten – um den Experimentierreaktor in Betrieb zu nehmen.

Außerdem hielten einige Reaktorexperthen in der Mitte der fünfziger Jahre die Leichtwasserreaktoren für nicht entwicklungsfähig und für unsicherer als andere Reaktortypen.

Trotzdem haben diese Reaktoren schließlich das Rennen gemacht – mit amerikanischer Starthilfe.

Die weltweite Hoffnung auf die billige Stromquelle Atomenergie machte den Bau von Kernkraftwerken auch für amerikanische Firmen zunehmend interessanter. Ein großer Markt versprach gute Absatzmöglichkeiten, sobald eine erprobte und verkaufsfertige Reaktorlinie entwickelt sein würde.

Zwei Gründe begünstigten in den USA den Bau von Leichtwasserreaktoren: Die militärisch genutzten Anreicherungsanlagen warfen genügend angereichertes Uran für den Einsatz in Leichtwasserkraftwerken ab. Außerdem hatte man beim Bau der atomgetriebenen U-Boote Erfahrungen mit diesem Reaktortyp gesammelt. Bereits im

Januar 1955 lief das erste Atom-U-Boot, die Nautilus, mit einem Leichtwasserreaktorantrieb vom Stapel.

Mit ihren Erfahrungen aus dem Manhattan-Projekt gelang vor allem den Konzernen Westinghouse und General Electric die schnelle Entwicklung leistungsfähiger Leichtwasserkernkraftwerke.

1957 stellte Westinghouse mit dem Shippingport Reaktor in Pennsylvania das erste Leichtwasserkraftwerk fertig, das in größerem Umfang Elektrizität in ein Stromnetz einspeiste.

Einige Jahre später waren beide Elektro-Riesen in der Lage, weltweit schlüsselfertige Kernkraftwerke anzubieten.

Die Zusammenarbeit der deutschen Firmen AEG und Siemens mit General Electric und Westinghouse verhalf dem Leichtwasserreaktor auch bei uns auf die Sprünge.

Zwar sah das 1957 verabschiedete Erste Atomprogramm noch die probeweise Entwicklung von fünf verschiedenen Reaktorlinien vor, doch die Energieversorgungsunternehmen warteten nicht auf die in ungewisser Zukunft liegenden Ergebnisse der Forschung.

Ihr Interesse richtete sich auf den Betrieb von Kernkraftwerken, die in absehbarer Zukunft eine gewinnbringende Alternative zu den Kohlekraftwerken werden könnten – die Geschäftskontakte von AEG und Siemens zu den leistungsfähigen Reaktorbauern jenseits des Großen Teichs kamen dabei gerade recht.

Schon 1958 bestellten die Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke bei der AEG das Leichtwasser-Versuchskraftwerk Kahl, 1962 das Kraftwerk Gundremmingen.

Mit den Aufträgen für den Bau der Kernkraftwerke Lingen und Obrigheim stiegen auch andere Energieversorgungsunternehmen in die Kernenergie ein (1964).

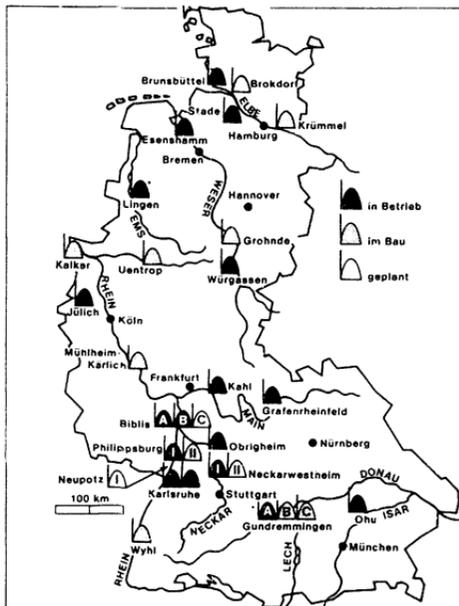
Den endgültigen Durchbruch hatten die Leichtwasserreaktoren bei uns, als mit den Aufträgen für die Kernkraftwerke Würgassen an der Weser und Stade an der Elbe 1967 Leistungsgrößen angepeilt wurden, die bisher nur große Kohlekraftwerke zu bieten hatten.

Heute beherrscht weltweit die Leichtwasserlinie den Kernkraftwerksbetrieb.

Von 254 Kernkraftwerken, die Ende 1980 auf der ganzen Erde in Betrieb waren, arbeiteten 86% mit Leichtwasserreaktoren. Unter den 15 Kernkraftwerken der Bundesrepublik Mitte 1983 waren 14 mit diesem Reaktortyp ausgestattet.

Die Entwicklung der Kernenergienutzung in der Bundesrepublik - ein kleiner Überblick

Stand der Kernenergienutzung (Juni 1983)



(nach: Radkau 1981, S. 211; erneuert nach dem Stand von Juni 1983)

* Kernkraftwerk stillgelegt.

Bei den Kernkraftwerken Kalkar und Uentrop handelt es sich um die Versuchskraftwerke Schneller Brüter und Hochtemperaturreaktor; in Jülich und Karlsruhe stehen kleinere Forschungsreaktoren.

- 1955-1958 Gründung des Atomministeriums und Erarbeitung von Plänen zum Bau verschiedener Reaktortypen.
- 1958 die AEG baut in Zusammenarbeit mit General Electric das Versuchskraftwerk *Kahl* (SWR / 15 MWe), Fertigstellung 1961.
- 1961 Siemens baut in Zusammenarbeit mit Westinghouse einen Schwerwasser-Versuchsreaktor für den Betrieb mit Natururan (50 MWe), Fertigstellung 1965 in *Karlsruhe*.
- 1962 AEG beginnt in Zusammenarbeit mit General Electric den Bau des Kraftwerks *Gundremmingen* (SWR / 250 MWe), Fertigstellung 1966.
- 1964 die Kernkraftwerke *Lingen* (SWR / 160 MWe) und *Obrigheim* (DWR / 345 MWe) werden von AEG und Siemens in eigener Regie gebaut und 1968 fertiggestellt.
- 1967 mit den Kernkraftwerken *Stade* (DWR / 660 MWe) und *Würgassen* (SWR / 670 MWe) bauen Siemens und AEG Blockgrößen, die wirtschaftlich interessant werden, Fertigstellung 1972 und 1973.
- ab 1974 werden folgende Kernkraftwerke in Betrieb genommen:
- | | | |
|---------|------------------------------|--------------------------|
| 1974 | <i>Biblis A</i> | DWR / 1200 MWe |
| 1976 | <i>Neckarwestheim 1</i> | DWR / 800 MWe |
| | <i>Brunsbüttel</i> | SWR / 800 MWe |
| 1977 | <i>Ohu</i> | SWR / 900 MWe |
| | <i>Biblis B</i> | DWR / 1300 MWe |
| 1978 | <i>Esensham</i> | DWR / 1300 MWe |
| 1979 | <i>Philippsburg 1</i> | SWR / 900 MWe |
| 1981 | <i>Grafenrheinfeld</i> | DWR / 1300 MWe |
| 1983 | <i>Krümmel</i> | SWR / 1300 MWe |
| 1983/84 | <i>Gundremmingen 2 und 3</i> | SWR / 1300 MWe (jeweils) |
| 1984 | <i>Grohnde</i> | DWR / 1300 MWe |
- ab 1985 voraussichtlich werden folgende Druckwasserreaktoren mit 1200 und 1300 MWe Leistung in Betrieb gehen:
- Mülheim-Kärlich* und *Philippsburg 2* ab 1985, *Brokdorf* (1987), *Biblis C* und *Wyhl* (1989), *Neupotz* (1990) sowie das 850 MWe Kernkraftwerk *Neckarwestheim 2* (1989)

SWR = Siedewasserreaktor

DWR = Druckwasserreaktor

Flipper mit Neutronen – die Steuerung der Kettenreaktion im Leichtwasserreaktor

Da Uranatomkerne auch in chemischen Verbindungen mit anderen Stoffen spaltbar sind, wird als Reaktorbrennstoff* Uranoxid verwendet, die chemische Verbindung von Uran mit Sauerstoff.

Uranoxid hat mit 2800 Grad C einen weitaus höheren Schmelzpunkt als Uran in reiner Form (1132°C), das bei der großen Hitze im Reaktorinneren schmelzen würde.

Im Kernkraftwerk Biblis A lagern 103 Tonnen Uran im Reaktorkern, rund 3000 kg davon sind spaltbare Atomkerne des Uran235. Das entspricht einer Anreicherung auf ca. 3%

Allerdings ist das Uran nicht als grober Klotz im Reaktor eingelagert, sondern sozusagen scheinchenweise eingepackt. Es ist aufgeteilt in zahllose kleine Portionen, sogenannte „*pellets*“ (englisch: Pille), die einen Durchmesser und eine Höhe von einem Zentimeter haben. Jeweils einige hundert dieser zylinderförmigen „Energiepillen“ stapeln sich in einer dünnen Metallröhre, dem *Brennstab*.

Diese Brennstäbe erinnern an zu lang geratene Tablettenröhrchen. Sie sind zwar nur gut einen Zentimeter breit, aber über 4 m lang und bis zu einer Höhe von 3,90 m mit den pellets gefüllt.

Ihre 0,7 mm dünnen Wände bestehen aus Zirkaloy, einer Speziallegierung aus dem sehr strapazierfähigen Metall Zirkonium und geringen Anteilen an Eisen, Chrom und Zink.

236 solcher Brennstäbe sind zu einem quadratischen, 23 x 23 cm breiten *Brennelement* gebündelt. 193 dieser fast 5 m langen Brennelemente, in Reih und Glied regelmäßig hinter- und nebeneinander aufgestellt, bilden das Gerüst, in dem die atomare Kettenreaktion in geregelten Bahnen gehalten werden kann.

Das Ganze befindet sich vollständig unter Wasser und verpackt im Reaktordruckgefäß, einem Stahlbehälter mit über 20 cm dicken Wänden (vgl. Abb. S. 88).

Von den zahllosen Neutronen, die zwischen den Brennstäben herumschwirren, wollen wir einmal 230 genauer betrachten. Das

* Zwar findet in einem Kernkraftwerk keine Verbrennung statt, doch hat sich auch in der Kerntechnik der Ausdruck „Brennstoff“ für den Energieträger Uran eingebürgert. Den Verbrauch des Urans im Reaktor bezeichnet man auch als „Abbrand“.

sind gerade soviel wie im Durchschnitt bei der Spaltung von 100 Atomkernen entstehen:

- etwa 70 Neutronen werden von Uran²³⁸-Atomkernen einkassiert
- rund 20 Neutronen bleiben an Spaltprodukten oder an den Wasserstoffatomkernen des Wassers hängen
- ungefähr 40 Neutronen sausen ohne jede Wirkung an allen Atomkernen vorbei
- 100 Neutronen treffen auf Uran²³⁵ Kerne und können diese spalten

Es entstehen wieder 230 Neutronen - das Getümmel geht von neuem los. Multipliziert man die genannten Zahlen mit einer Milliarde und dann noch einmal mit einer Milliarde, bekommt man eine Ahnung von dem Gewimmel, das sich in jeder Sekunde bei Vollbetrieb im Reaktor wiederholt und eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion ablaufen läßt.

Um die Kettenreaktion nach Bedarf zu lenken, können zwischen die Brennelemente *sogenannte Steuerstäbe* eingefahren werden. Diese rund 4 m langen, fingerdicken Metallstäbe bestehen hauptsächlich aus Cadmium, einem Weichmetall, dessen Atomkerne gute Neutronenfänger sind. Sobald die Steuerstäbe zwischen die Brennstäbe gelangen, vermindern sie die Zahl der spaltfähigen Neutronen. Die Kettenreaktion wird gezügelt. Ganz eingefahren, bringen die Cadmiumstäbe die Kettenreaktion zum Erliegen.

Werden sie wieder herausgezogen, sausen wieder genügend Neutronen ungehindert zwischen den Brennelementen umher, finden ihren Atomkern - der Reaktor kommt auf Touren.

Von der Atomkernspaltung zum elektrischen Strom - die Energieumwandlungskette

Der größte Teil der bei der Kernspaltung freiwerdenden Energie verteilt sich auf die auseinanderausenden Spaltprodukte.

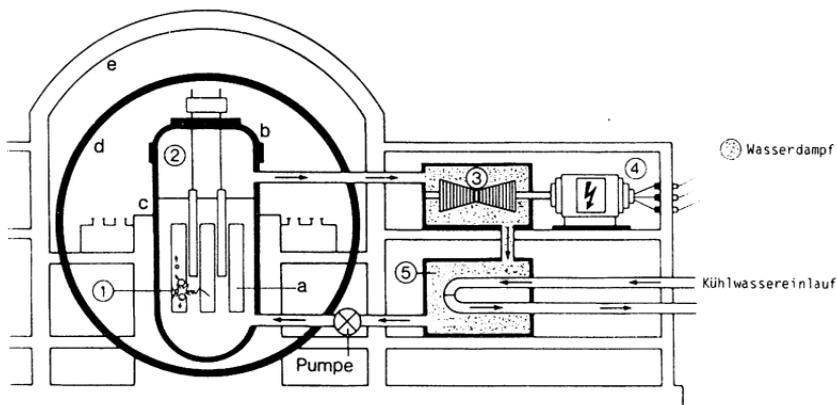
Nach kaum einem hundertstel Millimeter knallen die Atomkerntrümmer mit einer Geschwindigkeit bis zu $20000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ auf andere Atomkerne und regen diese zu Schwingungen an. Die Unruhe wird an die Nachbaratome weitergegeben; die Atomwelt gerät in Bewegung, es entsteht Hitze.

Im Inneren der Brennstäbe herrschen Temperaturen von etwa 2000°C , am Rand von einigen hundert Grad.

An den heißen Brennstäben erhitzt sich das Wasser im Reaktor-druckgefäß.

Im *Siedewasserreaktor*, wie z.B. im Kernkraftwerk Krümmel an der Elbe, ist das Reaktordruckgefäß nicht vollständig mit Wasser gefüllt. Das auf 286°C erhitzte Wasser verdampft.

Funktionsschema eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor



Energieumsetzung

- ① Spaltung von Uranatomkernen
- ② Wasser siedet zu Wasserdampf.
- ③ Wasserdampf treibt eine Turbine an.
- ④ Die Turbine treibt einen Generator an.
- ⑤ Der Wasserdampf wird gekühlt.

Abschirmung von Radioaktivität

- a Brennstabhülle
- b Reaktor-druckgefäß
- c biologisches Schild
- d Sicherheitshälter
- e Stahlbetonmantel

Stündlich strömen 55 600 Tonnen Wasser durch das Reaktordruckgefäß; davon werden 7200 Tonnen Wasserdampf erzeugt. Über eine Rohrleitung verläßt der heiße Wasserdampf das Reaktordruckgefäß, strömt über die Schaufelräder einer Turbine und bringt diese in Schwung. Die Turbine treibt einen Generator an, der schließlich, wie ein Riesendynamo, den elektrischen Strom liefert. Nachdem der Wasserdampf über die Turbine gejagt wurde, wird er von einem zweiten Kühlkreislauf abgekühlt und als flüssiges Wasser wieder in das Reaktordruckgefäß zurückgepumpt. Dort beginnt der Kreislauf von Neuem. (vgl. Abb. S. 86)

Elektrische Energie und Leistung

Die *Energie* des elektrischen Stroms wird gewöhnlich mit der Einheit *Kilowattstunde (kWh)* angegeben.

eine Kilowattstunde = 3,6 Millionen Wattsekunden
= 3,6 Millionen Joule (vgl. S. 35)

Die *elektrische Leistung* gibt an, wieviel Energie pro Zeiteinheit umgesetzt werden kann. Die Leistung wird in Watt (W) gemessen.

1 Kilowatt (kW) = 1000 W 1 Megawatt (MW)* = 1000 kW

Beispiel:

Eine Herdplatte mit der Leistung von 1,5 kW ist eine Stunde in Betrieb.
Die abgegebene Energie: 1,5 kW x 1 Stunde = 1,5 kWh

zum Vergleich:

Leistung		Energieumsatz bei einstündiger Betriebszeit
eine Glühlampe	60 W	0,06 kWh
ein Bügeleisen	500 W	0,5 kWh
ein Straßenbahntriebwagen	150 kW	150 kWh
eine Elektrolok	5000 kW	5000 kWh

* Die Leistungsgröße eines Kraftwerks wird häufig mit der Einheit MWe angegeben. Gemeint ist dann die elektrische Endleistung, die vom Kraftwerk erreicht wird.

Bei dieser Endkühlung sowie durch Aufheizung der Turbine geht der Löwenanteil der ursprünglich im Reaktorkern freigesetzten Energie verloren.

Während es die Brennelemente im Kernkraftwerk Krümmel auf eine Wärmeleistung von 3690 MW bringen (vgl. 87), beträgt die elektrische Endleistung des Generators nur noch 1316 MWe. Zieht man davon noch die 56 MWe Leistung ab, die als Eigenbedarf für den Kraftwerksbetrieb benötigt werden, bleibt ein *Wirkungsgrad* der im Reaktorkern freigesetzten Energie von 34%.

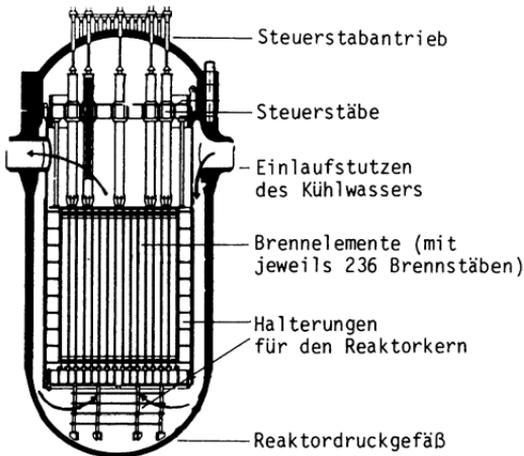
Anders ausgedrückt:

Um mit dem Kernkraftwerk Krümmel die elektrische Energie von einer Kilowattstunde (kWh) zu erzeugen, muß in Kauf genommen werden, daß die Energie von 1,9 kWh verpulvert wird, beziehungsweise Luft und das Kühlwasser der Elbe aufheizt*.

Etwas anders läuft die Reaktorkühlung in Kernkraftwerken vom Typ Biblis A am Rhein.

In diesem Kraftwerk ist das Reaktordruckgefäß völlig mit Wasser gefüllt; es kann bei Temperaturen von 310°Grad nicht sieden. Das heiße Wasser wird aus dem Druckgefäß heraus in vier *Dampferzeu-*

Reaktorkern im Kernkraftwerk Biblis A



* Kohlekraftwerke erreichen einen Wirkungsgrad von 40%.

ger geleitet, 19 m hohe und 4,75 m breite Chrom-Nickel-Stahlbehälter. Dort durchströmt dieser erste Kühlkreislauf (Primärkühlung, von lateinisch: primus - der Erste) ein Rohrsystem, das wiederum von Wasser umflossen wird. Erst dieses Wasser des zweiten Kühlkreislaufs (Sekundärkühlung, von lateinisch: secundus - der Zweite) verdampft und wird über die Turbine geleitet.

Das Wasser des Primärkühlkreislaufs wird nach der Wärmeabgabe im Dampferzeuger zurück in das Reaktordruckgefäß gepumpt und dort erneut erhitzt. Wegen des hohen Drucks von 155 bar**, der im Reaktordruckgefäß herrscht, nennt man diese Reaktorart auch *Druckwasserreaktor*.

Der Wirkungsgrad ist wegen des zusätzlichen Energieverlustes im Dampferzeuger etwas niedriger als beim Siedewasserreaktor und liegt bei 32,5%.

Siedewasserreaktoren sind außerdem etwas einfacher aufgebaut und können mit einem geringeren Betriebsdruck gefahren werden. Ein Nachteil gegenüber dem Druckwasserreaktor besteht allerdings darin, daß im Siedewasserreaktor Radioaktivität aus dem Primärkühlmittel in das Turbinenhaus gelangt und dort gegebenenfalls notwendige Arbeiten erschwert.

Doppelt hält besser - die Sicherheitstechnik

Obwohl ein Kernkraftwerk nicht wie eine Atombombe explodieren kann, hat es doch einige Risiken in sich:

[Nach einem Jahr Betriebszeit haben sich in den Brennstäben soviel radioaktive Spaltprodukte angesammelt, wie bei der Zündung von mehreren hundert Atombomben entstehen würden.]

Der Schutz der Umwelt vor den gewaltigen Strahlungen oder gar vor einem auch nur teilweisen Entweichen der Spaltprodukte ist die dringlichste Sicherheitsaufgabe im Kernkraftwerk.

Die meisten der etwa 200 verschiedenen Trümmerkerne bleiben dort, wo sie gerade entstanden sind: irgendwo zwischen dem Uranoxid in den einzelnen Brennstofftabletten.

** Das ist der Druck, der in 1580 m Wassertiefe auf jedem cm^2 Grundfläche liegt (etwa Fingernagelgröße)

Doch ein Teil von ihnen, wie die Jodisotope oder die Edelgase Xenon und Krypton, verflüchtigen sich aus dem Spaltstoff – und sammeln sich im oberen Teil des Brennstabs, in einem kleinen, dafür freigehaltenen Zwischenraum.

Durch feine Undichtigkeiten in den Brennstabhüllen gelangt ein geringer Teil der Spaltprodukte in das Kühlmittel. Da außerdem die Wasserstoffatome des Wassers durch Einfang von Neutronen radioaktiv werden, sammeln sich auch außerhalb der Brennstäbe mit der Zeit größere Mengen radioaktiver Teilchen an.

Als Barriere gegen den Austritt ihrer Strahlung wirkt die rund 20 cm dicke Stahlwand des Reaktordruckgefäßes. Auch die bei der Kernspaltung entstehende γ -Strahlung sowie nicht eingefangene Neutronen werden von den Stahlwänden zum Teil zurückgehalten (vgl. Abb. S. 86).

Das Reaktordruckgefäß ist wie mit einer dicken Röhre von einer zylinderförmigen Stahlbetonmauer umhüllt. Dieses 2 m dicke *biologische Schild* schirmt die γ - und Neutronenstrahlung endgültig ab.

Umschlossen ist das Ganze von einer kugelförmigen Stahlhülle mit 3 cm dicken Wänden. In diesem *Sicherheitsbehälter* sollen sich sämtliche radioaktive Spaltprodukte sammeln, die durch ein Leck oder während eines Störfalls aus dem Reaktordruckgefäß entweichen.

In Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor sind außer dem Reaktordruckgefäß auch noch die Dampferzeuger im Sicherheitsbehälter untergebracht. Daher ist der Sicherheitsbehälter z.B. im Kernkraftwerk Biblis mit 56 m Durchmesser erheblich größer als die Stahlhülle im Siedewasserreaktor-Kraftwerk Krümmel (30 m).

Umwölbt ist die Stahlkugel noch einmal von einer 1,5 m dicken Stahlbetonmauer, die das Reaktorinnere vor Zerstörungen durch Flugzeugabstürze, Explosionen in Kraftwerksnähe oder Erdbeben schützen soll. Allerdings kann auch eine Zerstörung von Innen her drohen – durch Ausfall des Kühlkreislaufs als Folge von Schäden an Pumpen und Ventilen oder, im schlimmsten Fall, nach einem Bruch im Rohrleitungssystem.

Selbst wenn automatisch eingefahrene Steuerstäbe die Kettenreaktion augenblicklich unterbrechen, könnte sich der Reaktorkern ohne ausreichende Kühlung doch selbständig machen.

Die radioaktiven Spaltprodukte erzeugen beim Zerfall noch eine

Wärmemenge, die etwa einem Zwanzigstel der Reaktorleistung bei Vollbetrieb entspricht.

Diese *Nachwärme* könnte ausreichen, um nach einiger Zeit die Brennstabhüllen und den Spaltstoff verschmelzen zu lassen. Große Mengen radioaktiver Stoffe kämen in das Reaktordruckgefäß. Im schlimmsten Fall würden im zusammengeschmolzenen Reaktorkern wieder Kernspaltungen stattfinden. Ein weiterer Wärmeanstieg könnte den zerstörten Reaktorkern durch den Reaktorboden schmelzen lassen – im Extremfall bis in die Erde.

Verschiedene *Sicherheitssysteme* sollen eine solche Katastrophe ausschließen.

Als *vorbeugende Maßnahmen* gegen Störfälle finden regelmäßige Kontrollen des Druckgefäßes und aller Rohrleitungen statt. Alle Einrichtungen wie Pumpen, Ventile, Regelvorrichtungen, die einen ungestörten Betriebsablauf gewährleisten sollen, sind gleich mehrfach vorhanden. Außerdem verfügt das Kernkraftwerk über zwei voneinander unabhängige Abschaltssysteme:

Die *Reaktorschnellabschaltung* läßt bei einem Störfall die Steuerstäbe automatisch in den Reaktorkern einfahren. Zudem kann die Kettenreaktion durch Einspeisung von *borhaltigem Wasser* in das Reaktordruckgefäß unterbrochen werden. Bor ist ein Halbmetall, dessen Atomkerne gute Neutronenfänger sind.

Um auch nach einem Kühlmittelverlust eine ausreichende Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern zu sichern, kann aus Wasserspeichern, die rings um das Reaktordruckgefäß eingebaut sind, Wasser in das Druckgefäß gepumpt werden (*Notkühlsystem*).

Soweit das Funktionsprinzip der heutzutage üblichen Leichtwasserreaktoren. Sogenannte fortgeschrittene Reaktortypen sollen eines Tages nicht nur Strom, sondern sogar ihren eigenen Spaltstoff erzeugen.

In Leichtwasserreaktoren wird die im Uran gespeicherte Energiereserve ziemlich dürftig genutzt. Da Energie im wesentlichen nur durch Spaltung der geringen Uran²³⁵-Anteile freigesetzt wird, findet der Löwenanteil des zu über 99% im Natururan vorkommenden Uran²³⁸ keine Verwendung. Kein Wunder, daß Energieversorgungsunternehmen und Kraftwerksbauer sich für ein Reaktorkonzept begeistern konnten, das auch die Nutzung von

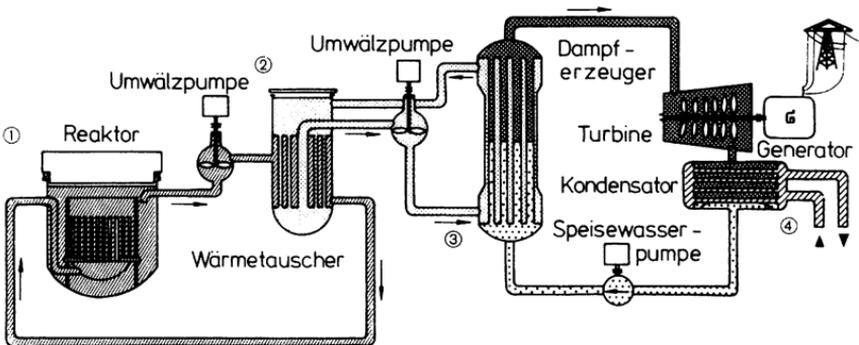
Uran238 für die Energiegewinnung ermöglicht und damit eine 60-fach bessere Nutzung des Urans bringen soll.

Wie schon 1974 in Frankreich, 1975 in Großbritannien und in der UdSSR soll auch in der Bundesrepublik ein Reaktor dieses Typs in der 300 MWe-Versuchsklasse in Betrieb gehen. Seit 1973 befindet er sich bei Kalkar am Niederrhein im Bau - der Schnelle Brüter.

Vielseitige Neutronen - die Arbeitsweise des Schnellen Brüters

Das Prinzip des Brutreaktors kam schon ganz zu Beginn der Kerntechnik zur Anwendung: die während des Manhattan-Projekts gebauten Reaktoren hatten den Zweck, aus Uran238 durch Neutroneneinfang spaltbares Plutonium239 zu gewinnen - als Spaltstoff für die Bombe. Auch in den Leichtwasserreaktoren findet diese Umwandlung von Uran238 zu spaltbarem Plutonium statt, immer dann, wenn ein Uran238-Atomkern ein Neutron einfängt (vgl. S. 79). Da die so entstehenden Plutoniumatomkerne selbst wieder gespalten werden, trägt dieser Vorgang auch in den Leichtwasserreaktoren zur Erhöhung der Energieausbeute bei. Allerdings nur in bescheidenem Maße.

Prinzip der Energieumsetzung beim natriumgekühlten Brutreaktor



- ① Kühlung des Reaktorkerns.
- ② Das heiße Natrium erhitzt einen zweiten Natriumkreislauf.
- ③ Erst die Hitze dieses Natriumkreislaufs verdampft Wasser.
- ④ Der Wasserdampf treibt eine Turbine an und wird von einem zweiten Wasser-
kreislauf gekühlt.

Um den Einfang möglichst gering zu halten, werden die Neutronen durch den Moderator ja gerade gebremst. Andernfalls wäre eine Kettenreaktion im schwach angereicherten Uran gar nicht möglich. Doch durch Weglassen des Moderators und einer besonderen Auswahl von Spaltstoff und Kühlmittel läßt sich beides zur gleichen Zeit durchführen:

- die Kernspaltung und somit Energiefreisetzung
- die Umwandlung von Uran238 zu spaltbarem Plutonium239.

Der Brüter ist somit Energielieferant und Spaltstoffherzeuger zugleich - der Goldesel der Reaktorbauer.

Ein zweigeteilter Reaktorkern

Im Brutreaktor macht man sich den Effekt nutzbar, daß bei der Spaltung von Plutoniumatomkernen im Durchschnitt ein Neutron mehr entsteht als bei der Spaltung von Uran235-Kernen - günstig, wenn die Neutronen sowohl spalten als auch brüten sollen.

Da die große Neutronenausbeute nur zu erreichen ist, wenn Plutonium durch schnelle Neutronen zertrümmert wird, besitzt der Brutreaktor keinen Moderator. Diese Arbeitsweise mit schnellen Neutronen hat dem Brüter übrigens seinen Namenszusatz „schnell“ verpaßt.

Der Reaktorkern ist beim Kalkar-Kraftwerk in zwei Zonen unterteilt: Das Innere des Reaktorkerns bildet die *Spaltzone*. Hier befindet sich, eingelagert in 95 cm kurzen und 6 mm dünnen Brennstäben, der Spaltstoff: eine Mischung aus Plutonium239 und Uran238.

Um die Kettenreaktion überhaupt in Gang bringen zu können, ist der Plutonium-Anteil in diesem Gemisch recht hoch, etwa 16%. Je 166 dieser Energieröhrchen sind zu einem der insgesamt 205 Brennelemente zusammengefaßt.

Die Spaltung von Plutonium in diesem Reaktorbereich setzt Energie frei - und erzeugt die Neutronen zum Brüten.

Umgestellt ist die Spaltzone von fast 6000 Röhrchen, jedes rund 1 m lang und 1 cm breit, in denen Uran238 abgefüllt ist. In dieser *Brutzone* werden aus den Uran238-Atomkernen Plutoniumkerne. Wenn im Reaktor mehr Plutonium erzeugt als durch Spaltung verbraucht wird, kann der erbrütete Spaltstoff entnommen und für den Einsatz in anderen Reaktoren aufbereitet werden.

Erhöhte Sicherheitsanforderungen

Die starke Bremswirkung von Wasser auf Neutronen macht es als Kühlmittel im Brüter ungeeignet. Gekühlt wird der Reaktor durch Natrium, ein sehr weiches Metall, das bereits bei rund 100°C flüssig wird. Da Natrium sowohl mit dem Sauerstoff der Luft als auch mit Wasser heftige chemische Reaktionen auslöst und zudem während des Reaktorbetriebs radioaktiv wird, erfordert der Brutreaktor zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen.

Um jeden Kontakt des radioaktiven Natriums mit Luft oder Wasser zu vermeiden, wird das auf über 500°C erhitzte Natrium aus dem Reaktorkern zunächst in drei Wärmeaustauscher geleitet. Dort strömt es durch ein Rohrsystem und gibt einen Teil seiner Wärme an einen zweiten, unabhängigen Natriumkreislauf ab. Erst dieser Natriumkreislauf führt durch einen Dampferzeuger, in dem wiederum Wasser verdampft wird, um eine Turbine anzutreiben (vgl. Abb. S. 92).

Schwieriger als im Leichtwasserreaktor wird beim Brüter auch die Kontrolle von Störfällen mit Kühlmittelverlust.

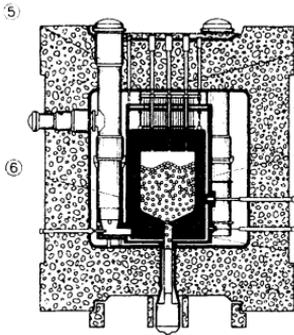
Im Leichtwasserreaktor flacht die Kettenreaktion nach einem Kühlmittelverlust ab, weil mit dem ausströmenden Wasser ja auch ein Teil des Moderators verloren geht. Tritt dagegen beim Brüter Natrium aus dem Primärkühlkreislauf aus, werden die Neutronen noch weniger gebremst und damit auch seltener von Uran-238-Kernen eingefangen. Sie können häufiger Plutoniumatomkerne spalten. Es kommt zu einem Anschwellen der Kettenreaktion, die den Reaktorkern stark beschädigen könnte.

Geeignete Abschaltvorrichtungen und Notkühlsysteme müssen eingebaut werden, um einen solchen Unfall zu verhindern oder zumindest den Unfallverlauf kontrollieren zu können. Außerdem benötigt der Brüter besondere Auffang- und Kühleinrichtungen, um das ausströmende Natrium sicher einzuschließen.

Etwas weniger heikel ist der zweite Typ der fortgeschrittenen Reaktoren, der heliumgekühlte Hochtemperaturreaktor.

Ein Haufen Kohlekugeln mit heißer Füllung - der Hochtemperaturreaktor

Seit 1972 befindet sich bei Schmehausen im Ruhrgebiet ein Reaktor im Bau, der eines Tages aus Thorium, dem dritt schwersten natürlichen Element, spaltbares Uran erbrüten soll.



Etwas ganz anderes - das Prinzip des Hochtemperaturreaktors

- ① Regelstäbe
- ② Spannbetonmantel mit einer Wandstärke von 4,45 Metern
- ③ Kugelhaufen als Reaktorkern
- ④ Kugelabzugsrohr
- ⑤ Dampferzeuger
- ⑥ Graphitmantel (Kohlenstoff) zur Abschirmung von Neutronen und γ -Strahlung

Die Atomkerne dieses Schwermetalls mit 90 Protonen und 142 Neutronen sind selber nicht spaltbar.

Aber durch Einfang von einem Neutron geht der Thoriumatomkern über zwei Zwischenstufen in einen Uran²³³ Atomkern über, ein Uranisotop mit 92 Protonen und 141 Neutronen.

Dieses in der Natur nicht vorkommende Uranisotop ist ebenfalls als Spaltstoff im Reaktor zu verwenden.

Zum Anfahren benötigt der Reaktor hochangereichertes Uran²³⁵ (93%), das allerdings im Verhältnis 1:10 mit Thorium vermischt ist. Aufgeteilt ist diese Mischung in zahllose Krümel von 0,6 mm Durchmesser. Jedes dieser Teilchen ist mit einer dreifachen Schicht aus Kohlenstoff umhüllt, die sowohl Neutronen bremsen als auch Spaltprodukte zurückhalten soll.

33000 dieser Körner befinden sich in einer porösen Kohlenstoffkugel von 6 cm Durchmesser. Insgesamt enthält eine solche Kugel 0,96 Gramm hochangereichertes Uran sowie 9,6 Gramm Thorium. 675000 dieser Kohlekugeln mit heißem Inhalt füllen ein 6 m hohes und 5,6 m breites Gefäß und bilden den Reaktorkern (vgl. Abb. oben). In diesem Kugelhaufen läßt sich eine Kettenreaktion aufrechterhalten, mit Kohlenstoff als Moderator und Uran als Spalt-

stoff. Nach und nach wandeln sich im Neutronenhagel Thoriumatomkerne zu Uran²³³-Kernen, der Reaktor produziert seinen eigenen Spaltstoff.

Gekühlt wird der Kugelhaufen von dem nicht brennbaren Edelgas Helium. Das Gas wird von oben nach unten durch den Kugelhaufen gepreßt, von 260°C auf 750°C erhitzt und dann in sechs Dampferzeuger geleitet. Dort bringt es, wie gehabt, Wasser zum Verdampfen, so daß eine Turbine angetrieben werden kann.

Neben der Möglichkeit, unspaltbares Thorium zu einem Brennstoff zu verarbeiten, bietet der Kugelhaufenreaktor noch weitere Vorteile: Die Brennelemente, d.h. die einzelnen Kohlekugeln, lassen sich bei Vollbetrieb wechseln. Aus dem nach unten trichterförmig zulaufenden Reaktorgefäß können ständig Kugeln abgezogen und somit geprüft und wenn nötig ausgetauscht werden. Außerdem eröffnen die erreichbaren Betriebstemperaturen des Heliums von etwa 1000°C zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten.

Die große Hitze kann genutzt werden, um in einer Art Ofen Wasserdampf und Kohle miteinander reagieren zu lassen und somit künstliches Erdgas herzustellen. Zudem ließe sich bei diesen Temperaturen Wasser zersetzen. Der dabei anfallende Wasserstoff ist nicht nur ein umweltfreundlicher Brennstoff, sondern auch Grundstoff für die Kunststoff-, Kraftstoff- und Düngemittelproduktion.

Das ist allerdings Zukunftsmusik aus dem leiser gewordenen Chor der früheren Befürworter des Hochtemperaturreaktors.

Wer soll das bezahlen...?

Ähnlich wie der Schnelle Brüter wurde der Hochtemperaturreaktor ursprünglich als Wunderkraftwerk gepriesen, das neben Energie auch noch Spaltstoff erzeugt.

1977 sollte der Hochtemperaturreaktor, 1980 der Schnelle Brüter in Betrieb gehen. Die ursprünglich veranschlagten Baukosten: 690 Millionen DM für den Hochtemperaturreaktor, eine Milliarde für den Brüter.

Da es sich bei beiden Reaktoren um Versuchskraftwerke handelt, mit denen die Wirtschaftlichkeit solcher Reaktortypen geprüft

werden soll, wurden die Baukosten hauptsächlich dem Steuerzahler aufgebürdet. Den Löwenanteil der Kosten trägt die Bundesregierung, beim Hochtemperaturreaktor steuert das Land Nordrhein-Westfalen noch einen Batzen Geld hinzu.

Allerdings wurden die zahlreichen Probleme mit den neuen Techniken vor Baubeginn schlecht übersehen.

Bereits 1974 kalkulierte man den Preis für den Hochtemperaturreaktor mit 885 Millionen DM, 1980 mit 2,25 Milliarden DM.

1983, sechs Jahre nach dem ursprünglich geplanten Betriebsbeginn, hieß es, der Hochtemperaturreaktor sei zu etwa 80% fertiggestellt.

Die erwarteten Kosten: 4 Milliarden DM.

Noch mehr verrechnete man sich beim Brüter: Im November 1978 hielt man die Inbetriebnahme erst 1984 für möglich, die Baukosten veranschlagte man schon auf 3,2 Milliarden DM. Ein Jahr später schlugen die vorausgesagten Kosten schon mit 5 Milliarden zu Buche. Mittlerweile, im Sommer 1983, ist der Preis auf über 7 Milliarden gekrabbelt. Vor 1990 wird der Brüter kaum betriebsbereit sein. Zwar streiten sich die Bundesregierung und die Energieversorgungsunternehmen regelmäßig über die Deckung der milliarden-schweren Fehlkalkulationen. Doch wer auch zahlen wird - die Rechnung trägt letztlich Otto Normalverbraucher. Denn während die Bundesregierung ihren Beitrag aus dem Steuersäckel holt, dürfen die Energieversorgungsunternehmen ihre Kosten auf den Strompreis abwälzen. Man kann es sich kaum verkneifen: für uns haben sich die als Goldesel angepriesenen fortgeschrittenen Reaktortypen als Pleitegeier entpuppt.

Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer Kummer

Nach einem Jahr Betriebszeit muß in den Leichtwasserreaktoren etwa ein Drittel der Brennelemente ausgewechselt werden. Ein großer Teil der Uran²³⁵-Atomkerne ist dann gespalten. In den Brennstäben haben sich einige hundert Kilogramm Spaltprodukte angesammelt. Einige dieser Spaltprodukte wirken als *Neutronengifte*, sie fangen Neutronen ein. Die Kettenreaktion droht zu versacken – kurz und gut: der Reaktor braucht eine Auffrischung.

Nach Gebrauch ein heißes Eisen: die abgebrannten Brennstäbe

Aus einem 1000 MWe Reaktor werden pro Jahr Brennelemente mit rund 30 Tonnen Uran herausgefischt.

Die Zusammensetzung dieser Masse hat sich nach einjährigem Aufenthalt im Neutronengewimmel des Reaktorkerns verändert: Ursprünglich enthielten die 30 Tonnen Uran (30000 kg) 29000 kg Uran²³⁸ und 1000 kg Uran²³⁵. Nach Gebrauch sieht die Zusammensetzung so aus:

28350 kg Uran²³⁸, 260 kg Uran²³⁵, 280 kg Plutonium und etwa 975 kg Spaltprodukte, als Reste der zertrümmerten Atomkerne.

Während die Radioaktivität der frischen Brennelemente mit einigen hundert Curie vergleichsweise niedrig ist, bringen es die abgebrannten Brennelemente auf einige Milliarden Curie (vgl. S. 30), hervorgerufen durch die stark strahlenden Spaltprodukte.

Ein Teil der strahlenden Atomkerntümmer, wie verschiedene Isotope von Strontium, Jod und Cäsium, Krypton⁸⁵ sowie das

erbrütete Plutonium müssen für hunderte, wenn nicht tausende von Jahren aus der Welt geschaffen werden.

Statt das Plutonium für Ewigkeiten mit zu verpacken, kann man allerdings auch versuchen, es zusammen mit dem noch nicht verbrauchten Uran²³⁵ aus den Brennstäben zurückzugewinnen.

Weiterverarbeitet zu neuen Brennstäben, ließe sich aus diesen Spaltstoffresten noch soviel Energie freisetzen wie bei der Verbrennung von 900000 Tonnen Steinkohle oder 630000 Tonnen Erdöl.

Mit der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennstäben wird daher versucht, die berühmten zwei Fliegen mit einer Klappe zu schlagen:

- Heraustrennung und sichere Verpackung der Spaltprodukte
- Rückgewinnung von spaltbarem Uran²³⁵ und Plutonium.

Abgebrannt heißt nicht wertlos - die Wiederaufarbeitung

Zunächst läßt sich mit den gerade aus dem Reaktor gezogenen Brennelementen gar nichts anfangen. Sie sind so stark radioaktiv, daß sie erst einmal mit Fernbedienung in ein Wasserbecken gehievt werden und dort für mindestens ein halbes Jahr untertauchen.

Nach dieser Zeit hat sich ihre Radioaktivität auf ein Dreißigstel vermindert. Dennoch strahlen die Brennelemente noch so stark, daß sie nur verpackt in einem Spezialbehälter per Bahn oder LKW die Reise zur Wiederaufarbeitungsanlage antreten können.

Dort angekommen, wandern sie zunächst wieder ins Wasserbecken. Die Radioaktivität muß noch weiter abklingen.

Frühestens nach einem weiteren halben Jahr auf Tauchstation geht's dann in die *heiße Zelle* der Wiederaufarbeitungsanlage. Hinter 2 m dicken Mauern werden die Brennelemente mit fernbedienten Werkzeugen bearbeitet:

Zuerst werden die Brennelemente in 5 cm lange Stückchen zersägt. Dabei entweichen die leichtflüchtigen Spaltprodukte Jod¹²⁹ und Krypton⁸⁵. Nach und nach gibt man die schwer rückhaltbaren Spaltstoffe an die Umgebungsluft ab; später sollen Spezialvorrichtungen die Spaltprodukte einmal zurückhalten.

Die abgesägten Brennelementstücke fallen in ein Becken mit konzentrierter Salpetersäure. Bis auf die widerstandsfähige Brennstabhülle löst die Säure alles auf. Die nicht löslichen Stücke werden herausgefiltert; übrig bleibt eine ätzende, wäßrige Brühe mit dem aufgelösten Uran, Plutonium und den Spaltprodukten. Dieses spritzige Wasserchen wird mit einer öartigen, in Wasser nicht löslichen Flüssigkeit vermenget. Nach ausgiebigem Durchmischen beider Flüssigkeiten befinden sich Uran und Plutonium hauptsächlich in der öligen Flüssigkeit, die Spaltprodukte bleiben in der wäßrigen Säurelösung.

Die Flüssigkeiten lassen sich leicht wieder entmischen; Plutonium und Uran können nach mehreren chemischen Reaktionen getrennt voneinander abgeschieden werden.

Die Säurelösung mit den Spaltprodukten ergibt den *hochaktiven Abfall* (über 10000 Curie je m^3). *Schwach- und mittelaktive Abfälle* entstehen aus dem öartigen Lösungsmittel sowie aus Reinigungsabwässern.

Zu den Abfällen der Wiederaufarbeitung gesellen sich alljährlich noch schwach- und mittelaktive Abfälle direkt aus den Kernkraftwerken: Reinigungs- und Laborflüssigkeit sowie Schutzkleidung, ausgediente Filter, Werkzeuge, Papier, Behälter und ähnliches.

Um die Abfälle platzsparend beseitigen zu können, werden die Flüssigkeiten eingedampft, die festen Abfälle gepreßt oder verbrannt. Der konzentrierte strahlende Rest wird mit Beton oder Bitumen, einer Teerart, vermischt – um die Spaltstoffe zu binden – und in 200-Liter-Fässer abgefüllt.

Der hochaktive Müll muß zunächst drei bis fünf Jahre lagern. Dann wird er ebenfalls eingedampft und in Glas eingegossen.

Derart zubereitet fallen je 1000 MWe-Kernkraftwerk jährlich knapp $300 m^3$ leicht- und mittelaktiver sowie $3 m^3$ hochaktiver Abfall an. Zu Beginn der achtziger Jahre betrug die Gesamtleistung der Kernkraftwerke der Bundesrepublik rund 10000 MWe. Bis zum Ende des Jahrzehnts soll sie sich verdoppeln, bis zum Ende des Jahrhunderts verdreifachen. Ein schöner Abfallberg, der jährlich aus der Welt geschafft werden muß.

Große Pläne für die Atommüll-Abfuhr ...

Während einige Länder (Schweiz, Niederlande, Belgien, Großbritannien) ihren schwachaktiven Atommüll im Atlantik verschwinden lassen oder in geringer Tiefe im Boden verbuddeln (Frankreich, USA), verfrachtete man in der Bundesrepublik seit 1967 Fässer mit schwach- und mittelaktiven Abfällen versuchsweise in ein Salzbergwerk in der Asse, 20 km südöstlich von Braunschweig.

Salzstöcke werden bei uns als ideales Endlager für radioaktiven Müll angesehen, da sie seit Jahrmillionen geologisch stabil sind. Außerdem kann Salz als guter Wärmeleiter die Zerfallswärme der radioaktiven Spaltprodukte gut ableiten.

Ende 1978 mußte die Müllkippe Asse, vollgestopft mit über 100 000 Fässern, schließen. Wegen seiner geringen Größe ist der Salzstock für eine weitere Nutzung als Endlager nicht geeignet. Außerdem hat der frühere Salzabbau Hohlräume hinterlassen, die die Stabilität des unterirdischen Lagers beeinträchtigen könnten.

Für die endgültige Beseitigung des hochaktiven Abfalls hält man bisher nirgendwo eine befriedigende Lösung parat.

Frühere Vorschläge reichten vom Abschluß in den Weltraum bis zum Versenken ins ewige Polareis.

Die Bundesregierung hatte sich in Zusammenarbeit mit der „Deutschen Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen“ (DWK), einer Vereinigung von 12 Energieversorgungsunternehmen, etwas Eleganteres einfallen lassen.

Anfang 1977 legte man in der Öffentlichkeit einen Plan vor, nach dem bei *Gorleben* in Niedersachsen, nahe der Grenze zur DDR, folgende Anlagen entstehen sollten:

- ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente bis 1985
- eine Wiederaufarbeitungsanlage für die jährliche Verarbeitung von 1400 Tonnen abgebrannten Urans sowie eine Brennelementfertigungsfabrik bis 1990
- eine Abfallaufbereitungsanlage bis 1991
- ein Endlager für Atommüll im unterirdischen Salzstock bis 1994.

Aber gegen diese „Entsorgung in einem Aufwasch“ regte sich Widerstand in der Bevölkerung vor Ort und in der ganzen Bundesrepublik.

Man fürchtete die Ansammlung riesiger Radioaktivitätsmengen, Unfälle in den Anlagen, die unzureichende Sicherheit des Salzstocks und die Abgabe von Radioaktivität, auch bei Normalbetrieb. Am 16. 5. 1979 erklärte der Niedersächsische Ministerpräsident, daß angesichts der zahlreichen Proteste die Pläne vorerst nicht zu verwirklichen sind.

Das Entsorgungszentrum Gorleben war vom Tisch, der Atom Müll und die jährlich aus den Kernkraftwerken gefischten Brennelemente häufen sich indes weiter.

... Entsorgung aus dem Stegreif

Bis zum Ende des Jahres 1982 wurden aus den Kernkraftwerken der Bundesrepublik insgesamt rund 1400 Tonnen abgebrannter Brennstoff entladen. Knapp ein Zehntel davon konnte in der einzigen Aufarbeitungsanlage der Bundesrepublik in Karlsruhe verarbeitet werden. Fast 300 Tonnen behandelten ausländische Firmen, vor allem die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague an der Nordwestküste Frankreichs und die Anlage in Windscale, England. Der Rest, also knapp 1000 Tonnen, befindet sich noch in den ausrangierten Brennelementen. Diese stehen in den Wasserbecken der Kernkraftwerke oder in den Aufnahmelagern der Wiederaufarbeitungsanlagen herum.

Seitdem die englische Anlage in Windscale nach einem Störfall 1973 dicht machen mußte, wird in absehbarer Zeit nur die Anlage in Frankreich in größerem Umfang Brennelemente verarbeiten können.

Zwar haben sich einige Kernkraftwerksbetreiber aus der Bundesrepublik Abnahmeverträge mit einer englischen Wiederaufarbeitungsanlage gesichert – aber diese Fabrik muß erst noch gebaut werden. Auch die Anlage in La Hague bietet keine ewige Abnahmegarantie: 1985 laufen die Verträge über die Wiederaufarbeitung bundesdeutscher Brennelemente aus.

Um langfristig die Verarbeitung der Brennelemente sicherzustellen, ging die DWK gleich nach dem Scheitern der Gorleben-Pläne auf die Suche nach geeigneten Standorten für zwei kleinere Wiederaufarbeitungsanlagen. Mit jeweils 350 Tonnen jährlicher Aufarbei-

tungsleistung könnten sie für einige Zeit den Bedarf der Bundesrepublik decken.

Aber in allen Regionen, die von den Länderregierungen in Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz als mögliche Standorte vorgeschlagen wurden, regte sich Widerstand in der Bevölkerung. Gegenwärtig (Mitte 1983) ist geplant, bei Schwandorf/Oberpfalz in Bayern und – überraschenderweise – bei Dragahn, ganz in der Nähe von Gorleben, eine Wiederaufarbeitungsanlage zu errichten.

Erfahrungen mit der Wiederaufarbeitung im Ausland rechtfertigen jedoch Zweifel, ob diese Anlagen eines Tages wirksam arbeiten werden:

In den USA hatte man mit der Aufarbeitung von Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren nur Pech. 1972 mußte die Anlage in West-Valley schließen, weil eine vorgeschriebene Sicherheitsverbesserung zu teuer gewesen wäre; 1974 machte die Anlage in Morris/Illinois dicht, nachdem beim Probelauf unvorhergesehene Störungen auftraten, deren Beseitigung ebenfalls zu viel gekostet hätte; eine dritte Anlage scheitert an Finanzierungsschwierigkeiten. Die einzige japanische Anlage blieb ab 1978 für drei Jahre außer Betrieb, weil ein Leck wegen zu hoher Strahlenbelastung nicht repariert werden konnte. Aus Frankreich werden immer wieder Betriebsstörungen gemeldet. Auch die Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe wurde im Mai 1980 nach einem Leck lahmgelegt und nahm erst im Oktober 1982 den Betrieb wieder auf.

Aber selbst wenn die geplanten Anlagen bei uns besser arbeiten werden – vor 1993 wird keine von ihnen betriebsbereit sein. Da die verbrauchten Brennelemente nicht einfach in den Reaktoren bleiben können, ist vorgesehen, in Ahaus bei Münster sowie in Gorleben sogenannte *Zwischenlager* in Betrieb zu nehmen. Dort könnten dann jeweils bis zu 1500 Tonnen abgebrannten Brennstoffs in luftgekühlten Hallen vor sich hinstrahlen.

Vorerst hilft man sich mit einer Notlösung: In den Abklingbecken der Kernkraftwerke werden die Brennelemente, verpackt in besonderen Gestellen, dichter als ursprünglich geplant zusammengedrückt. Um auszuschließen, daß es zwischen den enger stehenden Brennelementen zu einer unkontrollierten Kettenreaktion kommt, sind die Einlagerungsgestelle mit Borstahlblech ausgestattet. Umherfliegende Neutronen werden somit eingefangen (vgl. S. 85 u. 91).

Dennoch erhöht diese *Kompaktlagerung* das Betriebsrisiko eines Kernkraftwerks. Erstens muß aus dem Brennelementbecken mehr *Nachzerfallswärme* (vgl. S. 90f.) abgeführt werden; zweitens sammeln sich mit der größeren Zahl der Brennelemente mehr Spaltprodukte im Kernkraftwerk an als ursprünglich vorgesehen.

Aus diesem Grunde hat das Verwaltungsgericht in Darmstadt 1981 die Kompaktlagerung im Kernkraftwerk Biblis verboten.

Auch der Müll stapelt sich mittlerweile auf dem Gelände der Kernkraftwerke. Bis 1982 hatten sich bei den Kernkraftwerken 60000 Fässer mit schwachaktiven Abfällen angesammelt. Frühestens ab 1988 soll der schwachaktive Müll in dem ausgedienten Erzbergwerk „Konrad“ bei Salzgitter verschwinden.

Beunruhigender ist allerdings das fehlende Endlager für den hochaktiven Müll. Zu den paar Kubikmetern, die zur Zeit in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe lagern, kommt Ende des Jahrzehnts eine heiße Sendung aus Frankreich: die Verträge mit La Hague sehen vor, daß ab 1990 der hochaktive Müll zurückgenommen wird.

Zwar ist immer noch geplant, bis Mitte der neunziger Jahre im Salzstock bei Gorleben ein Endlager einzurichten. Doch so vorteilhaft wie früher immer behauptet wurde, scheint das Salzlager dort nicht zu sein. Auf einer Expertentagung im Mai 1983 hieß es, der Salzstock sei kleiner als ursprünglich erwartet. Außerdem ragt ein Teil von ihm ungeschützt in wasserführende Salzsichten hinein, so daß pro Jahr etwa 1000–10000 m³ Salz ausgelaugt werden.

Wie riskant ist „ungefährlich“ – der Streit um die Kernkraftwerke

Gegner und Befürworter der Kernenergienutzung sind sich zwar noch darüber einig, daß die unkontrollierte Freisetzung von Spaltprodukten aus einem Kernkraftwerk in der dichtbesiedelten Bundesrepublik hunderttausende von Menschen gefährden würde.

Doch an der Frage, ob man mit einem derartigen Unfall überhaupt rechnen müsse, scheiden sich die Geister.

So sieht für die Kernenergiebefürworter der größte anzunehmende Unfall (*GaU*) folgendermaßen aus:

Ein Abriß von Rohren im Primärkühlsystem setzt die Reaktorkühlung außer Betrieb. Da die Reaktorschnellabschaltung die Kettenreaktion sofort unterbricht und das Notkühlsystem augenblicklich in Betrieb geht, kommt der Störfall unter Kontrolle. Radioaktivität bleibt im Sicherheitsbehälter eingeschlossen, die Umwelt nimmt keinen Schaden.

Dagegen malen sich die Kernenergiegegner auch den *Super-Gau* aus:

Sie meinen, daß auch das Notkühlsystem ausfallen könnte. Dann wäre die Gefahr einer Verschmelzung des Reaktorkerns gegeben. Gebäudeteile könnten zerstört werden und große Radioaktivitätsmengen nach außen entweichen.

Um die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines schweren Reaktorunfalls zu ermitteln, werden sogenannte *Risikostudien* durchgeführt.

In der bisher umfangreichsten Analyse, der amerikanischen *Rasmussenstudie*, wurden mit einem Aufwand von 4 Millionen Dollar zwei Jahre lang verschiedene Unfallursachen erforscht, Gegenmaßnahmen durchgespielt und die möglichen Folgen für die Bevölkerung berechnet. Ergebnis der mathematischen Propheten: Bei einem Betrieb von 100 Atomkraftwerken droht einmal in 100 000 Reaktorbetriebsjahren ein Unfall mit 100 Toten, einmal in einer Million Jahren ein Unfall mit 1000 Toten.

Eine deutsche Risikostudie kommt zu vergleichbaren Ergebnissen. Diese Zahlen mögen beruhigen. Und damit auch jeder merkt, wie gering die Gefahr von Unfällen ist, greifen die Kernkraftwerksbefürworter gerne zu Vergleichen mit anderen Risiken im Leben: So soll die Gefahr, durch einen Reaktorunfall zu sterben, 25 mal kleiner sein als das Risiko, durch einen Blitzschlag umzukommen, und gar 15000 mal geringer sein als die Wahrscheinlichkeit, im Straßenverkehr sein Leben zu verlieren.

Selbst wenn man davon absehen würde,

- daß es nicht jedermanns Sache ist, zu den bestehenden Risiken weitere in Kauf zu nehmen,
- daß Ereignisse, die einmal in einer Million Jahre wahrscheinlich sind, auch schon morgen eintreten können,

- daß die meisten Menschen von Gefahren offenbar weniger beunruhigt sind, wenn sie glauben, durch eigenes Verhalten das Risiko mindern zu können,

so bliebe bei solchen Vergleichen doch ein dickes Fragezeichen übrig: Jahrzehntelange Erfahrungen mit Unfallhäufigkeiten im Straßenverkehr ermöglichen z.B. ziemlich sichere Vorhersagen, wieviele Unfälle in Zukunft zu erwarten sind - jede Autoversicherungsgesellschaft wäre sonst bald pleite.

Aber die Betriebserfahrungen mit Kernkraftwerken genügen nicht annähernd, um ähnlich sichere Zukunftsaussagen machen zu können. Die Risikobetrachtungen beruhen auf mehr oder weniger gut begründeten Annahmen darüber, was alles geschehen könnte.

Außerdem ist eine Ursache von Unfallmöglichkeiten bei allen Risikobetrachtungen nur schwer vorherzusehen: die große Bandbreite menschlichen Versagens.

So fiel z.B. am 28. 2. 72 im Kernkraftwerk Würzgassen die Notstromversorgung aus, weil Stromschaltungen fehlerhaft ausgelegt worden waren; zwei Jahre später wurde im Reaktor unbeabsichtigt die Kettenreaktion in Gang gesetzt, weil man die Stellung der Steuerstäbe übersehen hatte. Im Kernkraftwerk Gundremmingen liefen nach Öffnen eines falschen Ventils 20 Tonnen Wasser aus dem Brennelementbecken aus (27. 8. 69). In Neckarwestheim setzte man den Reaktor in Betrieb, ohne daß die Turbinen arbeitsbereit waren. Ein Arbeiter löste am 27. 3. 75 durch unvorsichtiges Hantieren mit einer brennenden Kerze im Kernkraftwerk Browns-Ferry, Alabama, einen Kabelbrand aus, der für Stunden sämtliche Meßinstrumente und Anzeigevorrichtungen für die Reaktorkontrolle lahmlegte.

Auch der bisher schwerste Störfall in der Geschichte der Kernenergienutzung im Kraftwerk Three-Mile-Island bei Harrisburg, USA, verlief völlig unprogrammgemäß als Zusammenspiel von menschlichem Versagen und technischen Fehlern (vgl. S. 107). Mehrere Tage lang fürchtete man im März/April 1979 die Verschmelzung des Reaktorkerns und den Austritt großer Radioaktivitätsmengen, also genau jenen Super-Gau, den man vorher nicht für möglich gehalten hatte. Zeitweilig war die Evakuierung von 600000 Menschen geplant. Rasmussen gab wenige Tage nach Störfallbeginn zu, daß die Vorgänge in diesem Kernkraftwerk Korrekturen an seinen Risiko-

Das war knapp – der Störfall in Harrisburg

Am 28. März 1979 fällt morgens um 4.00 Uhr im Druckwasser-Kernkraftwerk Three-Mile-Island II nach einer Pumpenstörung (1) bei Vollbetrieb der zweite Kühlkreislauf aus (1).

Die folgenden Ereignisse:

bis zu 15 Sekunden später

Das Wasser im Primärkühlkreislauf (2) kann im Dampferzeuger (1/2) nicht mehr genügend gekühlt werden. Der Druck im Reaktordruckgefäß steigt an. Zum Ausgleich öffnet sich ein Ventil (3) im Primärkühlkreislauf und läßt Dampf in einen dafür vorgesehenen Auffangbehälter treten (4). Die Turbine und der Reaktor schaltet sich automatisch ab.

bis zu 30 Sekunden später

Die Hilfskühlung (5) zum Ersatz des zweiten Kühlkreislaufs (1) geht in Betrieb. Soweit hätte der Reaktor unter Kontrolle bleiben können. Aber: Zwei Wochen zuvor hatten Arbeiter bei Wartungsarbeiten ein Ventil in der Hilfskühlleitung geschlossen und vergessen, es wieder zu öffnen (6). Zwar wurde die Falschstellung des Ventils im Reaktorkontrollraum angezeigt, aber ein Zettel, der über der Anzeige hing, verdeckte das Warnsignal. Die Hilfskühlung kann nicht anspringen.

bis 4.04 Uhr

Das Ventil (3) im Primärkühlkreislauf schließt sich nicht wie vorgesehen. Es tritt weiter Kühlmittel aus. Das Notkühlsystem (7) schaltet sich ein und pumpt Wasser auf den Reaktorkern (10). Ein Meßergebnis im Kontrollraum meldet Druckabfall im Reaktordruckgefäß.

bis 4.15 Uhr

Weil das Bedienungspersonal die offene Ventilstellung (3) im Primärkreislauf nicht bemerkt, weiß es nicht, daß der Druckabfall durch den Kühlmittelverlust hervorgerufen wird. Sie vermuten, der Druckabfall sei wegen ausreichender Kühlung eingetreten. Das Notkühlsystem (7) wird wieder ausgeschaltet. In der Zwischenzeit ist soviel Dampf aus dem Primärkühlkreislauf in das Auffanggefäß (4) geströmt, daß dieses platzt. Radioaktives Wasser läuft in den Sicherheitsbehälter (8).

bis 5.15 Uhr

Das geschlossene Ventil (6) in der Hilfskühlleitung wird bemerkt, noch nicht allerdings die offene Ventilstellung (3) im Primärkühlkreislauf. Als die Pumpen des Primärkühlkreislaufs (9) unregelmäßig arbeiten, werden sie ausgeschaltet, um Beschädigungen zu verhindern. Jetzt fehlt im Reaktorkern endgültig Wasser – ein Teil der Brennelemente (10) liegt frei und wird nicht mehr genügend gekühlt.

bis 7.00 Uhr

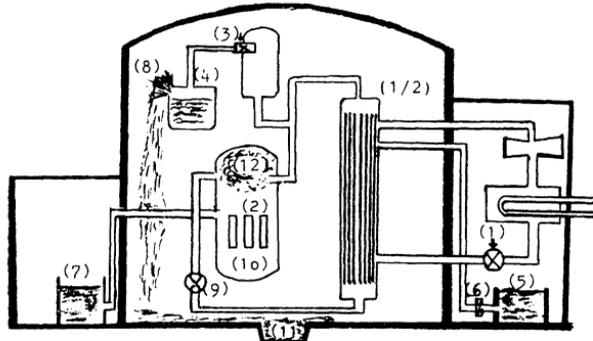
Im Sicherheitsbehälter sammelt sich immer mehr Wasser (11), in dem sich ein Teil der Spaltprodukte aus den Brennelementen befindet. Da nicht bekannt ist, daß das Wasser radioaktiv ist, wird es in ein Nebengebäude gepumpt. Dort bringt es einen Behälter zum Überlaufen. Das Nebengebäude wird überschwemmt, radioaktive Spaltprodukte treten unkontrolliert in die Umgebung.

Bei den hohen Temperaturen der Brennstäbe (10) reagiert das Hüllmaterial mit Wasserdampf. Es bildet sich Metalloxid und Wasserstoff, ein brennbares Gas, das in einer bestimmten Mischung mit Sauerstoff hochexplosiv ist.

Obwohl das Abblasventil (3) mittlerweile geschlossen ist und auch die Notkühlung (7) wieder läuft, stellt sich zunächst kein Erfolg bei der Brennelementekühlung (10) ein.

Eine Wasserstoffblase (12) hat sich im Reaktordruckgefäß angesammelt und verhindert einen ausreichenden Umlauf des Kühlmittels.

Wegen Explosionsgefahr bei Kontakt mit Sauerstoff kann die Wasserstoffblase in den folgenden Tagen nur nach und nach abgezogen werden. Erst am 2.4., also fünf Tage später, wird die Gasblase merklich kleiner. Druck und Hitze im Reaktordruckgefäß stabilisieren sich. Der Reaktor kann unter Kontrolle abgefahren werden.



(vereinfachte Skizze des Reaktors Three-Mile-Island, nach : Bundesminister des Innern 1979)

berechnungen erforderlich machen würden. Bei uns erklärte die Bundesregierung, der Störfall hätte in die Nähe von Ereignissen geführt, die man bis dahin nicht vorhergesehen hatte.

Im Kernkraftwerk selbst haben sich riesige Radioaktivitätsmengen angesammelt, die die Aufräumarbeiten jahrelang behindern werden. Hin und wieder wird Luft und Dampf aus dem Reaktor gelassen – zusammen mit radioaktiven Spaltprodukten.

Und obwohl dieses zu einer erhöhten Strahlenbelastung für die Bevölkerung führt, soll das ungefährlich sein. Die abgegebenen Radioaktivitätsmengen bleiben unterhalb gesetzlich erlaubter Höchstgrenzen.

Diese Beruhigung hört man häufig, wenn unvorhergesehenerweise Radioaktivität aus einem Kernkraftwerk entweicht.

Auch bei harmloseren Fällen:

Von 198 Störfällen, die 1980 in der Bundesrepublik gemeldet wurden, waren 17, von 142 Fällen im Jahre 1982 waren 4 mit einer Abgabe von zusätzlicher Radioaktivität verbunden.

Natürlich blieb alles in den gesetzlich geregelten Bahnen, und somit harmlos – wie die Betreiber erklären.

Nur: wieviel an Strahlenbelastung durch Kernkraftwerke in Kauf genommen werden kann, darüber gehen die Meinungen ebenfalls weit auseinander.

Strahlenangst läßt sich nicht wegrechnen

Nicht nur bei Störfällen, auch im Normalbetrieb gibt ein Kernkraftwerk ständig Radioaktivität an die Umgebung ab.

Durch feinste Undichtigkeiten in den Brennelementhüllen entweicht ein kleiner Teil der Spaltprodukte in das Kühlwasser im Reaktordruckgefäß. Mit Leckwasser an Rohr- und Pumpenverbindungen können sie in den Sicherheitsbehälter gelangen. Oder sie entweichen während der regelmäßigen Reinigung des Kühlwassers. Über Belüftungseinrichtungen werden die Spaltprodukte in eine Abgasanlage gesaugt. Dort verzögert ein Filtersystem ihren Austritt so lange, bis die Radioaktivität stark vermindert ist. Dann entweichen die Spaltprodukte über einen langen Kamin in die Umwelt.

Häufige radioaktive Isotope in Abluft und Abwasser der Kernkraftwerke

Radio-Isotop (vgl. S. 45)		Zerfallsart/Halbwertszeit (vgl. S. 29f)		
Krypton	85	γ, β	10,8 Jahre	Hauptbestandteil der Ableitungen in die Luft
Xenon	133	γ, β	5,3 Tage	
Jod	129	γ, β	15,7 Mio Jahre	Abgabe über Luft und Wasser
Jod	131	γ, β	8 Tage	
Cäsium	134	γ, β	2 Jahre	Abgabe zum Teil über Ab- luft vor allem mit Abwasser
Cäsium	137	γ, β	30 Jahre	
Strontium	90	β	28,5 Jahre	Abgabe über Abwasser
Chrom	51	γ	28 Tage	Abgabe über Luft und Abwasser
Cobald	60	γ, β	5,3 Jahre	

Radioaktives Wasser, das bei der Aufbereitung von Laborabwässern, Waschwasser und Leckwasser anfällt, wird mit dem äußeren Kühlkreislauf in den Fluß geleitet.

Auf verschiedene Weise tragen die Spaltprodukte zur Radioaktivitätsbelastung der Menschen bei.

Von außen bestrahlen sie die Haut, über Atmung und Nahrungsmittel gelangen sie in den Körper.

In tierischen Nahrungsmitteln *reichern* sie sich zum Teil erheblich *an*.

So kann die Konzentration von Jod 131 in der Kuhmilch bis zu 5000 mal größer sein als in der Luft über dem Weideland. Die Kuh frißt mit den riesigen Grasmengen auch entsprechend viel Ablagerungen, die sich mit der Zeit im Körper ansammeln. Cäsium 137 und Strontium 90 *reichern* sich bis zum 100fachen in der Kuhmilch an. Die mit Atemluft oder mit Nahrungsmitteln aufgenommenen Spaltprodukte gelangen über die Lunge bzw. über den Darm in das Blut.

Je nach ihren chemischen Eigenschaften sammeln sie sich an verschiedenen Stellen im Körper an. Strontium bleibt vorzugsweise in den Knochen, Jod in der Schilddrüse. Cäsium verteilt sich ziemlich gleichmäßig im ganzen Körper.

Besorgniserregend sollen allerdings die Ableitungen der Kernkraftwerke nicht sein. Gesetzlich bestimmte Grenzwerte legen Höchstgrenzen für die radioaktive Belastung durch den Kernkraftwerksbetrieb fest.

Demnach sollen Menschen, die während ihrer Berufstätigkeit mit Radioaktivität in Berührung kommen, 5 Rem Ganzkörperbelastung im Jahr verkraften können (vgl. S. 8). 1,5 Rem mutet man denen zu, die gelegentlich mit Radioaktivität zu tun haben, 30 Millirem(mrem) muß Otto Normalbürger in Kauf nehmen. Da durch die Ablagerungen von Jod und Strontium Schilddrüse und Knochen höher belastet sind, müssen diese Körperteile von Rechts wegen auch mehr aushalten: 90 mrem im Jahr gilt als Höchstwert für die Strahlenbelastung der Schilddrüse, 180 mrem für die Knochen.

Im Normalfall werden diese Werte allerdings erheblich unterschritten. Mit durchschnittlich einem Millirem Ganzkörperbelastung im Jahr erreicht die Radioaktivität nur einen Bruchteil der natürlichen Strahlenbelastung (vgl. S. 9).

Auswirkungen wie Krebs oder Leukämie, die sicher erst bei rund 50 Rem auf Strahlung zurückzuführen sind, lassen sich nicht nachweisen.

Das ist es, was Gegner und Befürworter gegeneinander aufbringt. Während die Befürworter der Kernenergienutzung mit Hinweis auf die natürliche Strahlung die Geringfügigkeit der Zusatzbelastung hervorheben, warnen die Gegner vor Gefahren, die in heute noch nicht erforschten Zusammenhängen stecken können:

Die weltweite Anreicherung mit radioaktiven Spaltprodukten könnte zukünftigen Generationen schwer zusetzen. Außerdem sei das Zusammenwirken radioaktiver Spaltstoffe mit anderen Umweltgiften noch zu wenig erforscht.

Mediziner, Physiker und Biologen aus beiden Lagern streiten sich über die gesundheitlichen Risiken und kommen natürlich immer zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Noch zu Beginn der sechziger Jahre meinte man, daß Strahlung unterhalb einer bestimmten Grenze überhaupt keine Wirkung für den Körper haben würde. Heute geht man davon aus, daß jede Strahlung Krebs, Leukämie oder Erbschäden verursachen kann. Bei sehr kleinen Strahlendosen ist nur die Wahrscheinlichkeit geringer, mit der diese Schäden eintreten.

Man kann Gegnern der Kernenergienutzung kaum verdenken, wenn sie übervorsichtig werden, gerade weil sich ein Zusammenhang zwischen Strahlenbelastung und Auswirkung so schwer nachweisen läßt.

Sicher: Kernkraftwerke sind weder hochexplosive Pulverfässer noch radioaktive Giftspritzen.

Dennoch ist ihr Betrieb für viele Menschen mit Unsicherheiten behaftet, hinter denen sie zu große Risiken fürchten.

Letztlich kann die Entscheidung für oder gegen die Kernenergienutzung allerdings nicht allein von der Antwort auf die Frage abhängig gemacht werden, wie groß das damit verbundene Risiko ist. Man wird auch fragen müssen: lohnt sich das Risiko überhaupt, und ist man bereit, es zu tragen.

Die Antwort auf diese Fragen setzt Informationen voraus, nicht nur über Zahlenvergleiche, die ein fertiges Risikobild abgeben oder über die vielfältigen Sicherheitsmaßnahmen, sondern auch über die Kehrseite: wann und wie ist es zu Störungen in Kernkraftwerken gekommen? Gibt es andere Möglichkeiten, die Energieversorgung zu sichern?

Halbwahrheiten verunsichern ganz

Als am 18. 6. 1978 gegen 20.30 Uhr im Kernkraftwerk Brunsbüttel an einer zunächst unbekanntem Stelle Dampf austritt, wird die automatische Reaktorschnellabschaltung durch einen verbotenen Eingriff in die Stromleitungen verhindert.

Wenige Tage zuvor hatte schon einmal eine Reaktorschnellabschaltung stattgefunden, bei der zusätzliche Radioaktivität an die Umgebung abgegeben wurde. Eine erneute Schnellabschaltung hätte zur Überschreitung der jährlich erlaubten Höchstwerte für Radioaktivität führen können und somit eine Stilllegung des Kernkraftwerks bis zum Jahresende erforderlich gemacht.

Statt wie vorgeschrieben, sofort die Aufsichtsbehörde in Kiel vom Störfall zu informieren, erfolgt die Meldung erst zwei Stunden später. Dabei wird die falsche Information gegeben, der ausgeströmte Dampf sei nicht radioaktiv gewesen. Das war Wunschenken, wie sich später herausstellt, denn untersucht war der Dampf bis zu

diesem Zeitpunkt noch nicht. Erst nach siebeneinhalb Stunden steht fest: es sind ungefähr 100 Tonnen radioaktiver Dampf an die Umwelt geleitet worden. Wiederum erst sieben Stunden später wird die Meldung an die Behörde weitergegeben – in der Zwischenzeit hatte ein anonymer Anrufer die Presse über den Vorfall im Kernkraftwerk verständigt.

Auch woanders hätten Kernkraftwerksbetreiber Pannen offenbar gerne unbemerkt gelassen:

Den schon angeführten Störfall im Kernkraftwerk Neckarwestheim am 21. 9. 77 (vgl. S. 106) meldete die Presse erst zwei Monate später – nach Informationen eines anonymen Anrufers. Von einer Panne beim Schnellen Brüter in Marcoule, Frankreich, im August 1977 erfuhr die Presse erst sechs Wochen später, ebenfalls durch einen anonymen Informanten. Im Mai und Juli unterrichtete die Kernkraftwerksleitung in Fessenheim, Frankreich, die Öffentlichkeit über eine Turbinenpanne und Radioaktivitätsaustritt jeweils erst nach einigen Tagen. Auch Pannen mit z.T. erheblichem Radioaktivitätsaustritt wie in Japan (Kernkraftwerk Tsuruga, 8. 3. 1981) und England (Windscale, 10. 10. 1976) wurden wochen-, ja monatelang geheimgehalten.

Es ist möglicherweise voreilig zu unterstellen, daß Heimlichtuerei bei Störfällen zum Geschäft der Kernkraftwerksbetreiber gehöre.

Nur: Die Tatsache, daß so etwas überhaupt geschehen kann und ausgenutzt wird, trägt nicht gerade zur Beruhigung besorgter Menschen bei, die die Risiken der Kernenergienutzung für schwer durchschaubar halten.

Und daß tatsächliche oder selbsternannte Experten mit Informationsmängeln in der Bevölkerung vorzüglich Stimmung für die Kernenergie machen können, zeigt die Verwendung von Berechnungen des zukünftigen Energieverbrauchs.

Vorhersage oder Herbeigerede? – die Energielücke

Seit 1973 legt die Bundesregierung Energieprogramme vor, in denen versucht wird, den zukünftigen Energiebedarf abzuschätzen. Auf dieser Grundlage werden Maßnahmen vorgeschlagen, z.B. der Bau

neuer Kraftwerke für die Elektrizitätsversorgung, mit denen der Energiebedarf der Zukunft gedeckt werden soll.

Ein Blick auf die Vorhersagen in den vier bisherigen Energieprogrammen zeigt, daß mit ziemlich schrägem Augenmaß in die Energiezukunft geguckt wurde.

Vorhergesagter Energiebedarf für 1985**

	erwarteter Gesamtenergie- bedarf (in Tonnen Steinkohleeinheiten)*	geplanter Anteil der Kernenergie (in Prozent)	elektrische Gesamtleistung der benötigten Kernkraftwerke (in Megawatt)
Vorhersage im Oktober 1973	610 Millionen	rund 15	45 000
Vorhersage im Oktober 1974	555 Millionen	rund 11	40 000
Vorhersage im Dezember 1977	470–483 Millionen	rund 10	24 000
Vorhersage im November 1981	416–433 Millionen	rund 8	17 000

* eine Tonne Steinkohleeinheit ist die Energiemenge, die bei der Verbrennung von einer Tonne (1000 kg) Steinkohle freigesetzt wird.

Es gilt: eine Tonne Steinkohleeinheit = 8140 Kilowattstunden = 29,3 Milliarden Joule.

** zusammengestellt nach den Energieprogrammen der Bundesregierung.

Innerhalb von acht Jahren ist der erwartete Energiebedarf für 1985 um 30% gefallen. Der Anteil der Kernenergie hat noch stärker abgenommen. Um die Schätzungen des Jahres 1973 zu erfüllen, hätten 1985 in der Bundesrepublik 38 Kernkraftwerke von der Größe der Kraftwerke Biblis A oder Krümmel betriebsbereit sein müssen. Nach den Vorhersagen von 1981 sind es nur noch 14.

Kurz und schlecht: die Prognosen für den Energiebedarf liegen ganz schön schief.

Man kann aber den Energiepropheten kaum vorwerfen, daß sie immer wieder danebengetippt haben.

Gerade die Energieprognosen hängen von zahlreichen Entwicklungen ab, die nicht genau vorherzusehen sind. Dazu gehören das Wirtschaftswachstum, veränderte Verbrauchergewohnheiten, technische Verbesserungen bei der Energienutzung, neue Einsparmöglichkeiten.

Nur: Das wissen auch diejenigen, die solche Vorhersagen erarbeiten und vor allem auch jene, die damit Politik machen.

Trotzdem wurde immer wieder so getan, als seien diese Schätzungen für bare Münze zu nehmen – und eine drohende Lücke in der Energieversorgung sei nur durch den Bau von Kernkraftwerken zu stopfen.

Schon 1956 konnte man in der gerade gegründeten Zeitschrift „Atomwirtschaft“ die Warnung lesen, ohne Kernkraftwerke würde in den sechziger Jahren der Strom knapp werden.

Nun, es gab in den sechziger Jahren weder Strom aus Kernkraftwerken in nennenswertem Umfang noch Strommangel. Aber die Art der Beschwörung wurde immer wieder neu aufgekocht.

Zu Beginn der siebziger Jahre hielt das Energieversorgungsunternehmen „Nordwestdeutsche Kraftwerke“ ab 1975/76 Zwangseinsparungen bei der Haushaltsstromlieferung für möglich; der damalige Ministerpräsident von Baden-Württemberg, Filbinger, warnte 1977, daß ab 1980 die Lichter ausgehen könnten. Und der Vorsitzende der „Kerntechnischen Gesellschaft“, Levi, meinte 1977, ein Baustopp für Kernkraftwerke würde die Energieversorgung gefährden.

Stattdessen ließ sich mit den vorhandenen Kraftwerken der Elektrizitätsbedarf bisher mühelos decken. Von 90000 MW elektrischer Gesamtleistung der bundesdeutschen Kraftwerke waren 1982 nur 50000 MWe in Betrieb. Zwischen 1975 und 1980 wurde nur die Hälfte der Stromerzeugungsmöglichkeit genutzt. Auch ohne ein einziges Kernkraftwerk wäre es bei uns wohl weder dunkel noch kalt geworden.

Dennoch besteht kein Anlaß, die Hände in den warmen Schoß zu legen. Der hohe Anteil des Erdöls bei der Deckung unseres Energiebedarfs muß vermindert werden. Öl könnte in einigen Jahrzehnten knapp werden, ist bereits heute schon teuer und trägt bei der Verbrennung – wie auch Kohle – zur Umweltverschmutzung bei. Weg vom Öl – darauf muß man sich wohl besinnen.

Ob aber ausgerechnet Kernkraftwerke bei dieser Wende dienlich sein können, ist eher fraglich. Kernkraftwerke produzieren nur Strom, aber nur ein Zwanzigstel des verwendeten Erdöls wird gegenwärtig in Wärmekraftwerken verheizt. Der Löwenanteil geht für die Beheizung von Wohn- und Arbeitsräumen, die Warmwasseraufbereitung, als Kraftstoff sowie in der chemischen Industrie als Grundstoff drauf.

Man könnte natürlich Ölheizungen und Warmwasserbereitung auf Strom umrüsten.

Aber Verluste bei der Energieumwandlung (vgl. S. 88), beim Umspannen und Leiten der Elektrizität sowie im Gerät des Endverbrauchers machen das Heizen mit Strom zu einer Energievergeudung ohnegleichen. Nur ein Viertel bis ein Drittel der ursprünglich im Kraftwerk freigesetzten Energie kann auf diese Weise genutzt werden.

Statt ein Kraftwerk nach dem anderen aus dem Boden zu stampfen, um mit Elektrizität Öl zu ersetzen, gibt es natürlich auch die Möglichkeit, durch kluge Verwendung Öl einzusparen.

Zwischen 1973 und 1980 fiel der Anteil des Erdöls an der Energieversorgung in der Bundesrepublik von 55,2% auf 48% – obwohl in diesem Zeitraum ein Wirtschaftswachstum von 17,5% erzielt wurde. Daß Energiesparen nicht zurück in die Steinzeit führt, zeigt auch ein Vergleich zwischen Schweden und den USA, zwei Ländern mit etwa gleichem Lebensstandard. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch liegt in Schweden um zwei Drittel niedriger als in den USA, vor allem, weil die Schweden durch gute Wärmeisolation Heizenergie sparen.

Ein von der Bundesregierung geförderter Versuch mit einem „Energiesparhaus“ machte deutlich, wie bei entsprechender Bauweise über die Hälfte der Heizenergie gespart werden könnte – die in einem *gut* isolierten Haus benötigt wird.

Auch die vom Deutschen Bundestag 1979 eingesetzte Kommission „Zukünftige Kernenergiepolitik“ hält viel vom Energiesparen. Sie empfiehlt die Entwicklung kraftstoffsparender Motoren, den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs, die Nutzung der Industrieabwärme für Fernheizung, eine Verbesserung der Wärmeisolation in Gebäuden und nicht zuletzt: gezielte Forschungen über Ersatzmöglichkeiten für Erdölprodukte, z.B. durch Verwertung land- und forstwirtschaftlicher Abfälle (Biogas).

Natürlich: aus dem Hut zaubern, von heute auf morgen, läßt sich das alles nicht. Es muß Zeit und Geld aufgebracht werden, um die vielfältigen Möglichkeiten zu erforschen.

Doch bislang hat die Kernenergie den größten Batzen der öffentlichen Mittel für die Energieforschung abgesahnt. Zwischen 1973 und 1981 flossen von 13,2 Milliarden DM, die von der Bundesregierung an Forschungsgeldern für die Energieversorgung ausgegeben wurden, 9,3 Milliarden in die Entwicklung der Kernenergie (70%); vergleichsweise bescheidene 550 Millionen DM (4,2%) wurden für die Erforschung sogenannter „sanfter Energiequellen“ wie Sonnen-, Windenergie und Energie aus Biomasse aufgebracht. Im Jahre 1972 steckte die Bundesregierung in die Kernenergieforschung fast 80 mal mehr Geld hinein als in die Entwicklung anderer Energieträger. Insgesamt sind für die Kernenergie seit 1955 etwa 20 Milliarden DM an Steuergeldern ausgegeben worden.

Nach dem Motto: die Energielücke beschwören – die Kernenergie als Retter anpreisen, haben Kernenergiebefürworter jahrelang versucht, den „Strom aus dem Atom“ als unverzichtbar hinzustellen. Großartige Versprechungen und düstere Warnungen hatten dabei häufig eines gemeinsam: sie erwiesen sich als übertrieben.

Über die Anwendungsmöglichkeiten des Schnellen Brüters, des Hochtemperaturreaktors und die Entwicklung eines ausgereiften Entsorgungsplans wurde immer große Zuversicht verbreitet – die Wirklichkeit sieht etwas trüber aus.

Doch die Vorhersagen über die Energieversorgung waren finster – die Wirklichkeit sieht freundlicher aus.

Selbstverständlich müssen auch Fachleute nicht unfehlbar sein, aber die Art, wie sie sich täuschen, läßt einem schon ein Licht aufgehen: Mit der Sorge vor der Dunkelheit lassen sich wohl auch glänzende Geschäfte machen – jedenfalls solange Expertenmeinungen für bare Münze genommen werden.

Büchertips und Anschriften

Unter folgenden Adressen kann man zum Teil **kostenlos** Broschüren und Informationsblätter zum Thema Kernenergie bekommen:

aus der Sicht der Kernkraftwerksbetreiber:

Deutsches Atomforum
Heussallee 10
5300 Bonn 1

Informationszentrale
der Elektrizitätswirtschaft
Kölnstraße 480
5300 Bonn 1

Zum Teil wird auf Hochglanzpapier mit bunten Bilderchen für die „heile Welt mit Kernkraftwerken“ geworben. Manchmal bekommt man auch sachlich aufbereitetes Material mit der anschaulichen Darstellung technischer Abläufe.

aus der Sicht der Kernenergiegegner:

Öko-Institut Freiburg
Schönauer Straße 3
7800 Freiburg

Bundesverband Bürgerinitiative
Umweltschutz (BBU)
Friedrich-Ebert-Straße 120
5300 Bonn 1

Das Öko-Institut macht vor allem Gegenrechnungen zu den Wirtschaftlichkeitsargumenten für die Kernenergie auf. Beim BBU kann man eventuell auch Anschriften von Bürgerinitiativen am eigenen Wohnort erfahren. Weil beide Vereine nicht so reich sind, wird man manchmal das Informationsmaterial bezahlen müssen. Nicht alles ist ansprechend und übersichtlich zusammengestellt.

von Ministerien der Bundesregierung:

Bundesminister des Innern
Pressereferat
Graurheindorfer Straße 18
5300 Bonn 1

Bundesministerium für Wirtschaft
Pressereferat
Villemombler Straße 76
5300 Bonn 1

Bundesminister für Forschung und Technologie

Pressereferat

Heinemannstraße 2

5300 Bonn 1

Es empfiehlt sich, bei speziellen Fragen anzugeben, was man wissen will. Manchmal gibt es dann extra Materialien. Das Wirtschaftsministerium verschickt Informationen zur Energiepolitik; beim Innenminister gibt es vor allem Material über Genehmigung von Kernkraftwerken, radioaktive Belastung, Sicherheitsbestimmungen. Das Forschungsministerium verbreitet vor allem allgemeine Informationen zum Entwicklungsstand der Kernenergienutzung.

Und jetzt ein paar Buchtips:

Zur Kernenergienutzung in Kraftwerken:

Jürgen Belgrad

Flott geschriebene Grundlageninformation über Probleme der Energieversorgung und verschiedene Möglichkeiten der Energiebereitstellung. Abbildungen veranschaulichen den Text. Für die Kernenergienutzung kann sich der Autor gar nicht erwärmen; sein ausführlich begründeter Tip: Energiesparen bringt's.

Wann tappen wir im Dunkeln?

Ein Energieleitfaden

Beltz Verlag 1982

ca. 120 Seiten.

Bundesminister für
Forschung und Technologie

Etwas für Spezialisten und solche, die es werden wollen. Als Ganzes ein unverdaulicher Schinken, aber als Nachschlagewerk eine wahre Fundgrube zu allen Problemen der Kernenergienutzung: Energieversorgung / Alternative Energiequellen / Kernreaktoren/ Entsorgung / Strahlenschutz / Sicherheitstechnik / Kostenfragen.

Zur friedlichen Nutzung der
Kernenergie

Bonn 1983

ca. 450 Seiten.

Daten sind z. T. veraltet; pro Kernenergie.

Holger Strohm

Die „Bibel“ der Kernenergiegegner. Von Arbeitsplätzen und Atomenergie bis Zuwachsraten an Krebs werden alle denkbaren Argumente gegen die Kernenergienutzung ausführlich dargestellt. Mir persönlich ist einiges zu überspitzt, aber das Buch ist voll mit Informationen über Risiken, Geschäfte und Machenschaften, die man von Befürwortern und Ministerien nicht bekommt. Weil dick und teuer zum Ausleihen und Durchblättern empfohlen.

Friedlich in die Katastrophe
Verlag Zweitausendeins 1981

ca. 1300 Seiten.

Lutz Mez (Hrsg.)

Der Atomkonflikt
Rowohlt Verlag 1981
ca. 370 Seiten.

Zur Atomwaffenentwicklung:

Jost Herbig

Kettenreaktion. Das Drama
der Atomphysiker.
Deutscher Taschenbuch
Verlag 1979, ca. 500 Seiten.

Robert Jungk

Heller als tausend Sonnen.
Das Schicksal der Atom-
forscher.
Rowohlt 1982
ca. 340 Seiten.

Anton Andreas Guha

Der Tod in der Grauzone.
Ist Europa noch zu
verteidigen?
Fischer Verlag 1981
ca. 235 Seiten.

Wilhelm Bittorf

Nachrüstung.
Der Atomkrieg rückt näher
Rowohlt Verlag 1981
ca. 220 Seiten.

Zahlreiche Berichte (je 15–20 Seiten) über die Kernenergienutzung in anderen Ländern, über die Politik der Kernenergiebefürworter und -gegner. Der Blick über die Grenzen macht deutlich, daß es bei der Kernenergienutzung auch um's Geldverdienen geht und daß immer dieselben Konzerne weltweit das Geschäft in der Hand haben.

Spannend wie in einem Roman schildern beide Bücher die Entwicklung von der Atomforschung der Zwanziger-Jahre bis zur Atom- und Wasserstoffbombe. Ausführliche zeitgeschichtliche Hintergrundinformationen machen deutlich, daß die Entwicklung der modernen Atomphysik nicht allein Sache der Atomphysiker gewesen ist. Herbig's Buch hat mehr technische Informationen eingebaut und schildert etwas ausführlicher die Nachkriegssituation. Jungk's Buch liest sich etwas flotter. Nach beiden Büchern kommt man ins Grübeln: was hätte anders laufen müssen, um die damalige Entwicklung von der Kernspaltung zur Atombombe zu verhindern?

Atomwaffenrüstung unter aktueller Fragestellung: pershing II, cruise missile, SS 20; Nato-Nachrüstungsbeschluß, Hintergründe; Wirkung von Atomwaffen. Das Buch setzt sich mit dem Abschreckungsgedanken auseinander und versucht nachzuweisen, daß die Nachrüstung eine Vorrüstung ist. Nicht leicht zu lesen.

Das Buch zeigt, wie Deutschland zum möglichen Schlachtfeld zwischen den Supermächten geworden ist und warum der Frieden mit der Nachrüstung wackeliger werden könnte. Man bekommt den Eindruck, daß unsere Nachrüstungsverfechter mit falschen Informationen arbeiten.

Die UNO-Studie:

Kernwaffen

C. H. Beck Verlag 1982
ca. 250 Seiten.

Bericht einer Expertengruppe der Vereinten Nationen über Stand der Atomrüstung, Wirkungsweise von Atomwaffen. Behandelt werden nicht nur die Atomsprengköpfe, sondern auch die Atomwaffenträger wie U-Boote, Interkontinentalraketen, Mittelstreckenraketen. Nüchterne Darstellung. Wer sich in der heutigen Friedensdiskussion von Fachausdrücken irritiert fühlt, sollte mal ins Buch gucken. Es am Stück zu lesen, ist wegen umfangreichen Zahlenmaterials und der trockenen Sprache recht ermüdend.

Keiji Nakazawa

Barfuß durch Hiroshima.
Eine Bildergeschichte gegen
den Krieg
Rowohlt Verlag 1982
ca. 285 Seiten.

Eine Bildergeschichte über den Alltag einer japanischen Familie im II. Weltkrieg. Das Buch beschreibt nicht nur den Schrecken der Hiroshimabombe, sondern auch das Elend sogenannter „kleiner Leute“ während des Krieges, die an Hunger und unter politischer Unterdrückung gelitten haben. Gezeichnet und geschrieben ist das Buch von einem Japaner, der als Siebenjähriger Hiroshima überlebt hat. Mich hat es erschüttert.

Verzeichnis der Abbildungen

S. 16: Inter Nations: Wilhelm Conrad Röntgen 1845–1923. Bonn-Bad Godesberg 1973, S. 34 (Deutsches Röntgen-Institut, Remscheid-Lennep).

S. 20: Segré, Emilio: Die großen Physiker und ihre Entdeckungen. München 1981, S. XII.

S. 42 + 56: Blumentritt, Gerhard/Schwaar, Lothar: Kerntechnik im Blickpunkt. Leipzig 1979, S. 133 + S. 225.

S. 44, 50 + 77: Varchmin, Jochim/Radkau, Joachim: Kraft, Energie und Arbeit. Reinbek bei Hamburg 1981, S. 175, S. 181 + S. 194 (Deutsches Museum München).

S. 88: Nach Angaben des Bundesministers für Forschung und Technologie: Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Bonn 1978, S. 89.

S. 92 + 95: Nach: Münch, Erwin: Tatsachen über Kernenergie. Essen 1980, S. 120 + S. 136.

S. 70: Zeichnung: Horst Bachmann.

S. 21, 24, 27, 29, 34, 40, 41, 47, 66, 86, 88 + 107: Zeichnungen des Autors.