480

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

HEINZ MAIER-LEIBNITZ

Die Rolle der Wissenschaft bei den Anfängen der Kerntechnik

FESTREDE

MÜNCHEN 1957
VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

DIE ROLLE DER WISSENSCHAFT BEI DEN ANFÄNGEN DER KERNTECHNIK

FESTREDE

gehalten in der öffentlichen Sitzung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München am 1. Dezember 1956

von

HEINZ MAIER-LEIBNITZ

o. Mitglied der mathematisch- naturwissenschaftlichen Klasse

MÜNCHEN 1957

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Die Bayerische Akademie der Wissenschaften strebt die Förderung von Wissenschaft und Technik an. Sie tut das, indem sie vor allem die Wissenschaft fördert. Daß damit auch der Technik genutzt wird, ist eine Behauptung, die durch die jüngste Entwicklung auf dem Gebiet unseres heutigen Themas in einem ganz unerwarteten Maß bestätigt worden ist. Berühmte Wissenschaftler sind zugleich Träger großer technischer Entwicklungen geworden. Der Beruf des Physikers hat sich dahingehend ausgeweitet, daß er außer der Forschung auch alle diejenigen technischen Gebiete mit einschließt, bei denen den Ingenieuren noch nicht geläufige Erkenntnisse verwendet werden.

Die Technik hat sich zunächst aus ihren eigenen Gesetzen heraus entwickelt. Bei der Herstellung von Maschinen, Brücken, Autos ist die Konstruktion primär aus solchen Erfahrungen entstanden, die aus dem täglichen Leben stammen. Die Wissenschaft ist höchstens ein Hilfsmittel zur Verbesserung der Konstruktion: eine mit Hilfe der Mathematik und auf Grund von Werkstoffuntersuchungen gebaute Brücke ist leichter und billiger als eine andere; eine Maschine, bei deren Herstellung genaue Meßmethoden, wie wir sie aus der Wissenschaft kennen, verwendet wurden, arbeitet besser und hat eine längere Lebensdauer.

Der erste sehr große Einbruch der Wissenschaft in das Gebiet der Technik hat wohl bei der Chemie stattgefunden: Namen wie Wöhler und Liebig stehen unsichtbar über den größten Werken der chemischen Industrie. Bei der Physik hat dieser Einbruch mit den unsichtbaren Erscheinungen begonnen. Von der Entdeckung des elektrischen Stromes durch Galvani, des Induktionsgesetzes durch Faraday, der elektrischen Wellen durch Hertz, des Elektrons durch J. J. Thomson führt ein gerader, wenngleich langer Weg zu den modernen Kraftwerken und Rundfunkstationen.

Im ersten Teil dieses Jahrhunderts sind wissenschaftliche Erkenntnisse der Physik mehr und mehr und immer schneller in die Technik eingebaut worden. Unser heutiges Thema, die Entwicklung von der Entdeckung des Atomkerns bis zur technischen

Atomkernenergie, ist dafür nur ein Beispiel, wenngleich das gewaltigste, und zwar gleicherweise für die reine Wissenschaft wie für die Anwendung.

Man ist versucht, die Geschichte der Atomforschung mit der Entdeckung der Röntgenstrahlung zu beginnen. Das ist zwar nicht ganz richtig, denn Röntgens Entdeckung bezog sich nicht auf Atomkerne, sie zeigte nur die Existenz und einige Eigenschaften von Licht besonders kurzer Wellenlängen auf. Aber es ist wahrscheinlich gerecht, mit Röntgen zu beginnen, denn Röntgens zufällige Beobachtung des Aufleuchtens einiger Kristalle nahe einer Entladungsröhre hat ganz unerwartet das Tor zu einem neuen Feld der Erkenntnisse aufgestoßen. Sie hat deshalb bei der Fachwelt ebensoviel Aufsehen erregt wie beim Publikum, das durch das Durchdringen von Körpern durch diese Strahlen beeindruckt war. Die Entdeckung von Bequerel ist sicher in einem gewissen Zusammenhang mit der von Röntgen entstanden und zunächst auch so aufgefaßt worden. Bequerel fand, daß von gewissen Uransalzen Strahlen ausgehen, die ähnlich durchdringend sind wie die Röntgenstrahlen. Zum Beweis machte er die erste, wie wir heute sagen würden, radiographische Aufnahme einer Münze. Diese Entdeckung hat eine viel größere Tragweite als die Röntgensche; denn es erhob sich sofort die Frage nach der Energiequelle für diese Strahlen. Ein Uransalz, in Blei eingeschlossen und völlig allen Einflüssen seiner Umgebung entzogen, soll dieselben Strahlen erzeugen wie eine für die damalige Zeit gewaltige Röntgenanlage. Die Atomkernenergie tritt als ein großes neues Rätsel in die Welt, und nach einer zweijährigen ungläubigen Pause wird seine Lösung zur Aufgabe eines großen neuen Forschungsgebietes.

Man kann nicht sagen, daß die Natur die Lösung dieses Rätsels leicht gemacht hätte. Die Erscheinungen erwiesen sich als überaus kompliziert, und es bedurfte unendlicher Kleinarbeit, bis schließlich die verschiedenen strahlenden Elemente, zum Beispiel das Radium, und die Natur der Strahlenarten, der α-, β-, γ-Strahlen erkannt waren. Als Ergebnis zeigte sich: Die radioaktiven Elemente verwandeln sich beim Zerfall in neue, und zwar erhöht sich bei der Aussendung der β-Strahlen die chemische

Ordnungszahl um eins, bei der Aussendung der α-Strahlen erniedrigt sie sich um zwei. Die Umwandlung der Elemente, das alte Ziel der Alchimisten, geht also bei den radioaktiven Elementen von selbst vor sich, ganz unbeeinflußt von äußeren Maßnahmen. Und bei dieser Umwandlung wird beträchtliche Energie in Form von radioaktiven Strahlen frei.

In diese Zeit fällt auch die Entdeckung des Atomkerns durch Rutherford. Die Beobachtung von Umwandlungsteilchen beim radioaktiven Zerfall hatte auch die letzten Zweifler von der Existenz der Atome als kleinster Einheiten der Elemente überzeugt. Seit Lenards Versuchen mit seinen Kathodenstrahlen wußte man ferner, daß der von Materie erfüllte Raum sehr weitgehend leer ist. Bei der Untersuchung des Durchgangs der α-Strahlen durch Materie fand Rutherford, daß diese Strahlen, die meistens fast geradlinig durch alle Substanzen gehen, manchmal plötzliche Richtungsänderungen um große Winkel erfahren, also von irgendwelchen Zentren gestreut werden. Quantitativ ergab sich, daß sich die Zentren bei schweren Atomen wie Punktladungen verhielten, deren Ladung proportional der Ordnungszahl war mit einer Masse etwa gleich der ganzen Atommasse. Damit war der Atomkern entdeckt, und es war auch gleich offenbar, daß die Erscheinungen des radioaktiven Zerfalls von ihm ausgehen mußten, daß er also die Quelle der geheimnisvollen Energie war.

Der Erforschung des Atomkerns hat sich vor allem Rutherford gleich mit ungeheurer Tatkraft verschrieben, und die α-Strahlen waren dabei das wichtigste Hilfsmittel. Bald zeigte sich, daß bei leichten Elementen die α-Strahlen dem Kern schon so nahe kamen, daß er keine Punktladung mehr war, und daraus ergab sich eine Angabe über den Kernradius, der etwa 10000mal kleiner ist als der des Atoms. Und schließlich fand Rutherford wieder etwas grundlegend Neues: aus mit α-Strahlen beschossenem Stickstoff traten Strahlen aus, die sicher keine α-Strahlen, sondern Wasserstoffkerne waren. Aus dem Stickstoff mußte dabei ein anderes Element geworden sein. Die künstliche Umwandlung der Elemente war entdeckt. Bei der künstlichen Umwandlung zeigte sich wieder, daß mehr Energie frei wurde, als die α-Strahlen vorher hatten. Kernumwandlungen waren also als Energiequelle schon von Anfang an erkannt, aber die Treffwahrscheinlichkeit der α-Strahlen war viel zu klein, um sie auszunützen. Die nächsten

Jahre vergingen mit der Verfeinerung der gewonnenen Erkenntnisse, und mit der inzwischen entwickelten Quantentheorie ergaben sich mehr und mehr nachprüfbare Vorhersagen der Theoretiker. Der nächste Schritt in Neuland kam 1929: Aus einer zunächst ganz rätselhaften Beobachtung von Bothe und Becker ergab sich schließlich, daß der Atomkern auch ungeladene Teilchen, Neutronen, aussenden kann. Die Entdeckung des Neutrons selbst machte Chadwick bei Rutherford. Daß die Entdeckung in Rutherfords Laboratorium geschah, war wohl kein Zufall, denn die mögliche Existenz ungeladener Elementarteilchen war eine alte Lieblingsidee von Rutherford; er hatte schon 10 Jahre vorher nach ihnen gesucht.

Die Neutronen, deren Eigenschaften wenig später Fermi untersuchte, haben eine einzigartige Eigenschaft: sie führen am Ende ihres Lebens immer zu einer Kernumwandlung; im Gegensatz zu geladenen Teilchen können sie, auch wenn sie ganz langsam sind, in jeden Kern eindringen. Sie wurden deshalb bald zur Umwandlung der schweren Elemente benützt, die auch in den seit Cockcroft und Walton und Lawrence verwendeten Anlagen mit künstlich beschleunigten geladenen Teilchen nicht umgewandelt werden konnten.

Nach der Entdeckung der Neutronen gelang Heisenberg und seinen Schülern eine Beschreibung des Kernaufbaus unter der Annahme, daß der Kern aus Wasserstoffkernen und Neutronen besteht. Viele quantitative Erkenntnisse, vor allem die genauen Massenwerte und damit Energieinhalte der Atomkerne, wurden bei dieser Beschreibung verwendet. Die Kernumwandlungen wurden systematisch untersucht und es entstand allmählich das, was man in Anlehnung an die Atomhüllenphysik als Kernspektroskopie bezeichnet: die Kenntnis von den Energiezuständen der Atomkerne und der Übergänge zwischen solchen. Der α- und β-Zerfall zum Beispiel sind Übergänge weniger stabiler Kerne in stabile. Energiegewinn oder Energieverlust bei vielen Umwandlungen konnten jetzt schon vorhergesagt werden. In einem Buch von v. Weizsäcker stand der Satz, daß sehr viel Energie frei werden muß, wenn ein ganz schwerer Kern in zwei leichtere geteilt wird. Doch dachte niemand daran, daß das möglich wäre.

Die Entdeckung der Spaltung verdankt man dem Streben, die Grenzen des bekannten periodischen Systems der Elemente zu

erweitern. Elemente jenseits von Uran können mit Hilfe von Neutroneneinfang hergestellt werden. Eine Anzahl solcher Transurane wurde in verschiedenen Laboratorien beschrieben; aber es gab experimentell noch Unklarheiten und Widersprüche. Bei dem Versuch einer Aufklärung fanden Hahn und Straßmann als Umwandlungsprodukt des Urans ein mittelschweres Element, das Barium. Meitner und Frisch, gleichzeitig mit anderen, erklärten diesen Befund im Sinne Weizsäckers und zeigten, daß die Spaltbruchstücke mit großer Energie auseinanderflogen. Ein Prozeß war entdeckt, bei dem etwa 50mal mehr Energie frei wurde als bei den gewöhnlichen Kernumwandlungen. Und der Prozeß wurde mit Neutronen eingeleitet, von denen jedes einer Umwandlung fähig ist.

Die entscheidende letzte Entdeckung kam sehr schnell (Joliot und gleichzeitig Szilard): bei der Spaltung werden auch Neutronen frei, und zwar im Mittel mehr als eines. Es kann also ein Neutron im Uran spalten, weitere Neutronen freimachen, die wieder spalten und mehr und mehr Neutronen erzeugen und mehr und mehr Energie frei machen: plötzlich wird ein Weg sichtbar, Atomenergie praktisch zu gewinnen. Innerhalb allerkürzester Zeit ist die Kernphysik aus einer reinen Wissenschaft ein Gebiet der Anwendung geworden.

Wir wollen hier nicht von der entsetzlichen Kriegsanwendung sprechen, die die neue Energiequelle gefunden hat, sondern nur von der Verwirklichung des Ziels, eine kontrollierte Freigabe von Energie im Kernreaktor zu erreichen. Dieses Ziel war im Krieg ein Schritt auf dem Weg zur Bombe, aber heute bauen wir darauf die Hoffnung auf eine dringend notwendige Ergänzung der Energiequellen unserer Erde.

Die beispiellos schnelle Entwicklung der Atomenergie im Kriege ist bekannt. Neben dem nur in solchen Zeiten möglichen Einsatz größter Mittel war dabei wohl die Tatsache entscheidend, daß dieselben Wissenschaftler, die bisher für die Fortschritte der reinen Forschung verantwortlich waren, jetzt bei der Anwendung ebenso verantwortlich mitarbeiten. Diese Entwicklung hat sich bis heute fortgesetzt. Es gibt offenbar reine Physiker bis hinauf zu Nobelpreisträgern, denen die Beschäftigung mit technischen Problemen Freude macht und die zum Teil die wichtigsten Beiträge zu einer technischen Entwicklung geleistet haben. Es wäre

eine dogmatische Engstirnigkeit, wollte man dem nicht dadurch Rechnung tragen, daß man die Berufsbezeichnung „Physiker" erweitert auf solche, die den Ingenieuren noch nicht geläufige physikalische Erkenntnisse in die Technik umsetzen. Man darf dabei nur nicht den Fehler machen, eine neue Klasse schaffen zu wollen, die man als angewandte Physik abstempelt; denn gerade die Beiträge der in der reinen Forschung groß gewordenen Physiker sind in vielen Fällen besonders wichtig gewesen. Diese Entwicklung gibt auch eine Begründung dafür, daß jetzt sehr viel mehr Physiker ausgebildet werden als früher. Der Physiker wird an vielen Stellen neben den Ingenieur treten. Andererseits werden die Ingenieure laufend Gebiete, die sie beherrschen gelernt haben, den Physikern wieder abnehmen.

Bei Kriegsbeginn war auf dem Weg zum Reaktor noch eine Anzahl von physikalischen Fragen offen, die das Gelingen des Vorhabens noch lange in Frage stellten.

Als einfachste Lösung hätte sich angeboten, einen großen Klotz von reinem Uran zu bauen, bei dem fast jedes erzeugte Neutron wieder im Uran zur Wirkung kommen sollte. Aber es zeigte sich bald, daß das nicht ging: die Neutronen verlieren im Uran Energie, indem sie Strahlung anregen, und dann sind sie nicht mehr fähig, den häufigsten Bestandteil des Urans, das Isotop 238, zu spalten. Es ist dann notwendig, die Neutronen erst ganz langsam zu machen, indem man sie mehrmals mit sehr leichten Kernen, etwa Wasserstoff oder Kohlenstoff, stoßen läßt. Dann können die meisten von ihnen das seltenere Isotop 235 spalten.

Aber es ist wiederum nicht möglich, das Uran und die verlangsamende Substanz, den Moderator, einfach zu mischen. Denn bei der allmählichen Verlangsamung durchlaufen die Neutronen einen Energiebereich, das sogenannte Resonanzgebiet, in dem sie besonders stark in dem häufigen Uranisotop 238 eingefangen werden, ohne Spaltung zu erzeugen. Die Zahl der Spaltungen im Uran 235 ist dann zu gering, um die Kettenreaktion aufrechtzuerhalten.

Erst eine Aufteilung des Reaktors in Zellen mit separaten Uran- und Moderatorelementen erlaubt es, den Resonanzeinfang auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Und auch dann

noch scheidet der an sich wirksamste und billigste Moderator, nämlich Wasser, aus, weil gewöhnlicher Wasserstoff etwas zu häufig Neutronen einfängt. Nur schweres Wasser oder reiner Graphit sind verwendbar. Mit ersterem wurde in Deutschland der Bau des Reaktors versucht, mit letzterem gelang er in den USA schon 1942. Das ist eine ungeheure Leistung, wenn man bedenkt, daß nicht nur die oben skizzierten Überlegungen und dazugehörigen Versuche, sondern auch fast alle notwendigen physikalischen Grunddaten erst erarbeitet werden mußten.

Wir dürfen nun einen Sprung in die Gegenwart machen und festzustellen versuchen, wo wir heute stehen. Neben den zahllosen Anwendungen der radioaktiven Isotope und Strahlungen, neben einer enormen Ausdehnung der kernphysikalischen Forschung hat sich das Interesse in der ganzen Welt vor allem der Energiegewinnung aus Atomkernen zugewandt. Von allen drei Arbeitsrichtungen dürfen wir viel, aber doch keine Wunder erwarten. Die Anwendung unserer Arbeitsmethoden in anderen Zweigen der Wissenschaft und Technik wird, wie wir hoffen, an vielen Stellen befruchtend und anregend wirken und der so dringend nötigen Förderung aller Wissenschaftszweige neuen Auftrieb geben. Der Fortschritt wird dabei stets aus den Wissenschaftsgebieten selbst kommen; das Atom ist hier immer nur als ein Hilfsmittel, der Kernphysiker als ein Helfer zu betrachten. – In der reinen Kernphysik ist, wenigstens bei nicht zu hohen Energien, die Zeit der grundlegenden Fortschritte der Art, wie wir sie heute besprochen haben, vorbei. Die Forschung dient jetzt der Verbreiterung und Vertiefung unserer Kenntnisse; mit Hilfe eines großen Erfahrungsmaterials dürfen wir hoffen, die sehr komplizierten Erscheinungen, die durch die Zusammensetzung der Atomkerne aus vielen Einzelteilchen bedingt sind, besser und besser zu verstehen. Bei den Arbeiten mit sehr hoch beschleunigten Teilchen, wie sie etwa in Genf durchgeführt werden sollen, betreten wir allerdings wieder Neuland und dürfen grundlegende Fortschritte erwarten.

Die Sammlung von Erfahrungsmaterial in der Kernphysik dient heute bereits weitgehend der Vorbereitung von Anwendungen. Bei vielen Kernphysikern ist eine Aufspaltung ihrer Interessen nach der Forschung und nach der Anwendung hin zu beobachten. Auch die Hinwendung zu Nachbargebieten, etwa zur Festkörperphysik, ist häufig.

Der Frage der Energieversorgung wollen wir uns nun etwas ausführlicher zuwenden. Auf Grund der Kriegentwicklungen stand etwa folgendes als Basis zur Verfügung:

1. Die Möglichkeit des Reaktorbaues mit natürlichem Uran war bewiesen. Große Reaktoren dieses Typs waren gebaut worden, allerdings nicht, um Energie zu gewinnen, sondern um das leicht spaltbare Plutonium zu produzieren.

2. Die mit großem Aufwand errichteten Isotopentrennanlagen in den USA liefern heute regelmäßig bedeutende Mengen des spaltbaren Uran 235 in jeder gewünschten Konzentration.

3. Das als Moderator nützliche schwere Wasser wird, vor allem wieder in USA, in genügender Menge hergestellt, um auch für große Reaktoren in Betracht gezogen zu werden.

4. Für die Aufbereitung des in Reaktoren verwendeten Urans sind Verfahren entwickelt worden, die die Gefahren der ungeheuer starken Radioaktivität der Spaltprodukte vermeiden. Sie erlauben, sowohl das Uran zurückzugewinnen als das spaltbare Plutonium in reiner Form abzutrennen. Dieses kann im Prinzip ähnlich wie Uran 235 verwendet werden, muß aber vorsichtiger gehandhabt werden, weil es selbst radioaktiv ist.

5. Vielleicht als wichtigste Folge der Kriegsentwicklung war eine große Zahl von Fachkräften mit speziellen Kenntnissen auf dem neuen Gebiet herangewachsen. Ihr Vorhandensein allein war einer der stärksten Antriebe, die bisher gemachten großen Anstrengungen nunmehr für die Energiegewinnung einzusetzen.

Gegenüber den vorhandenen, schon sehr großen Reaktoren für Plutoniumgewinnung stellt die Entwicklung von Kraftwerksreaktoren eine Anzahl neuer Probleme. Die im Reaktor in Form von Wärme erzeugte Energie soll bei möglichst hoher Temperatur des Kühlmittels abgeführt werden, um Wärmekraftmaschinen rationell betreiben zu können. Dies bedeutet eine zusätzliche Beanspruchung aller Reaktormaterialien, bei Wasserkühlung außerdem die Notwendigkeit hoher Drucke im Reaktor. Ferner tritt jetzt ein neuer Gesichtspunkt als entscheidend wichtig auf: Kraftwerksreaktoren sollen ökonomisch arbeiten, das heißt, der mit ihnen erzeugte Strom soll nicht wesentlich teurer sein als der am gleichen Standort mit Kohle erzeugte. Das Problem des ökonomischen Reaktors für einigermaßen normale Bedingungen ist bis heute noch nicht gelöst. Es

gibt bisher nur große Versuchsanlagen, die relativ teuer arbeiten. Die Frage nach dem besten Reaktor ist heute mindestens so offen wie im Jahre 1942.

Die Möglichkeiten des Reaktorbaues sind, seit angereichertes Uran oder Plutonium zur Verfügung steht, unendlich mannigfaltig geworden. Bei den Reaktorentwicklungen in der Welt zeichnen sich folgende Wege ab:

Reaktoren, die nur natürliches Uran verwenden, sind nach wie vor attraktiv in Ländern, die keine großen Isotopentrennanlagen besitzen. Sie können entweder mit Graphit als Moderator gebaut werden und werden dann meist mit Gas unter hohem Druck gekühlt. Ferner kann schweres Wasser als Moderator und Kühlmittel verwendet werden. Möglicherweise hat letzteres Verfahren für Reaktoren hoher Leistung trotz des hohen Preises des schweren Wassers Vorteile. Bei allen Natururanreaktoren ist wegen des geringen Neutronenüberschusses im Spaltungskreislauf sehr wenig Spielraum für Variationen; insbesondere muß sorgfältig vermieden werden, neutronenabsorbierende Werkstoffe im Reaktor zu verwenden; das bedingt eine große Beschränkung in der Wahl der Werkstoffe und ihrer Dimensionierung.

Mit angereichertem Brennstoff fallen fast alle Beschränkungen, die für Natururan gelten. Es ist zum Beispiel nicht mehr notwendig, Uran und Moderator zu trennen; es kann ein homogener Reaktor gebaut werden. Ferner kommt normales Wasser als Moderator und Kühlmittel in Frage. Die Kühlung kann auch mit flüssigen Metallen, wie Natrium, erfolgen. Bei den konventionellen Reaktorkonstruktionen können bessere Werkstoffe verwendet werden, auch wenn sie einen Teil der Neutronen absorbieren. Die Wärmeabfuhr und damit die Leistung eines Reaktors gegebener Größe kann sehr erhöht werden, indem man statt der bisher üblichen stabförmigen Brennstoffelemente, bei denen das Verhältnis der kühlbaren Oberfläche zum Volumen besonders ungünstig ist, solche mit größerer Oberfläche verwendet. Sehr wichtig kann werden, daß man nun an Stelle des wenig temperaturbeständigen Uranmetalls Uranoxyd oder Urankarbid verwenden kann und hoffen darf, so höhere Kühlmitteltemperaturen zu erreichen.

Einen ganz prinzipiellen Fortschritt hat die Entwicklung des Brutreaktors gebracht. Während beim normalen Reaktor nur das

sogenannte spaltbare Material (Uran 235 oder Plutonium) und daneben ein kleiner Teil des Haupturanisotops 238 verbrannt wird, bringt der Brutreaktor folgendes zustande: Die bei einem einzelnen Spaltprozeß erzeugten Neutronen (im Mittel etwa 2,5 pro Spaltung) werden so rationell ausgenutzt, daß eines eine weitere Spaltung erzeugt, also die Reaktion aufrechterhält, und mehr als ein weiteres im Uran 238 eingefangen wird und neues spaltbares Material erzeugt. Die Menge des spaltbaren Materials im Brutreaktor erhöht sich also während des Betriebs anstatt sich zu vermindern, das spaltbare Material wird ausgebrütet. Mit solchen Reaktoren ist es im Prinzip möglich, das ganze Uran 238 spaltbar zu machen und damit die ganze in ihm enthaltene Energie auszunützen. Bei den konventionellen Reaktoren dagegen kann nur etwa ein Fünfzigstel dieser Energie gewonnen werden. Mit Brutreaktoren kann auch Thorium ausgenützt werden, indem durch Anlagerung von Neutronen das spaltbare Uranisotop 233 gewonnen wird. Damit erhöhen sich die verwendbaren Vorräte an Atomenergie beträchtlich. Uran 233 ist zudem zum Betrieb von Brutreaktoren ganz besonders gut geeignet. Es ist durchaus möglich, daß im Endstadium einer längeren Entwicklung der größte Teil der Atomenergie aus Thoriumbrütern gewonnen werden wird.

In Brutreaktoren wird allerdings immer relativ hoch angereichertes Material verwendet werden müssen. Mit Ausnahme möglicherweise des Thoriumbrüters werden sie solche Reaktoren sein, bei denen auf die Anwendung eines Moderators überhaupt verzichtet wird. In solchen sogenannten schnellen Reaktoren werden die Neutronen nur wenig verlangsamt. Die Entwicklung dieses Typs ist noch nicht abgeschlossen; die vorhandenen Versuchsreaktoren erlauben jedoch eine optimistische Prognose. Wenn in fernerer Zukunft die Energieerzeugung im wesentlichen mit solchen Reaktoren erfolgen sollte, dann werden die bisherigen Reaktortypen nur als eine Vorstufe für die Brutreaktoren verwendet werden. Natürliches Uran wird zur Ausnützung des in ihm vorhandenen Urans 235 in diesen Reaktoren verwendet werden, ehe es in die Brutreaktoren zur Ausnützung des Hauptisotops 238 kommt. Die Leistung der konventionellen Reaktoren insgesamt müßte dann etwa 50mal kleiner sein als die Leistung der Brutreaktoren.

Abgesehen von der Entwicklung von Reaktoren zum Ziel der Wärmeerzeugung zeigen sich Bestrebungen, mehr als nur die Wärme dieser Reaktoren auszunützen. Die Energie der Spaltung wird zunächst in einer, wenn man so sagen darf, hochwertigen Form frei, nämlich als sehr große kinetische Energie einzelner Teilchen. Die Wärme entsteht schließlich durch die Verteilung dieser Energie auf die Umgebung. Es ist aber möglich, auch andere als nur Wärmewirkungen hervorzubringen. zum Beispiel können die Spaltprodukte Wasser zersetzen oder chemische Reaktionen bewirken. Es ist möglich, daß man in Reaktoren zusätzlich zur Wärmeerzeugung auch chemische Verbindungen wird produzieren können und daß man so zu ökonomischeren Reaktortypen kommen kann.

Über die mit Reaktoren erschließbaren Möglichkeiten der Energiegewinnung hinaus kann im Prinzip Energie auch durch Zusammenfügen leichter Kerne, durch Fusion, hergestellt werden. In mehreren Ländern sind wissenschaftliche Vorarbeiten zu praktischen Lösungen dieses Problems im Gange. Zur Zeit behindern Geheimhaltungsbestimmungen noch den Austausch der Erfahrungen. Wahrscheinlich wird noch eine lange Entwicklung bis zum Ergebnis notwendig sein. An solchen Vorarbeiten kann sich die Wissenschaft und später die Technik auch bei uns beteiligen. Dabei gewonnene Ergebnisse werden sicher auch für andere technische Entwicklungen von Bedeutung sein. Auch die Atomenergieentwicklung mit Reaktoren hat keineswegs nur für diese eine Bedeutung. Jede wissenschaftliche oder technische Erkenntnis kann sich auf den verschiedensten Gebieten oft ganz unerwartet auswirken.

Seit etwa einem Jahr ist auch in Deutschland die Frage der Entwicklung von Atomenergieanlagen lebhaft in Gang gekommen. Die Situation bei uns ist ähnlich der der meisten europäischen Länder. Das Auftreten einer Energielücke, zu deren Schließung die Atomenergie dringend benötigt wird, braucht bei uns nicht vor mindestens 10 Jahren erwartet zu werden. Ein Atomenergieprogramm kann also ohne Überstürzung vorbereitet werden. Das bedeutet allerdings nicht, daß es nicht sehr notwendig ist, schon heute Schritte zu unternehmen. Der Vorsprung anderer

Länder an praktischen Erfahrungen und an ausgebildeten Fachleuten aller benötigten Richtungen ist sehr groß. Er kann nicht durch Ausbildung einzelner Fachleute im Ausland aufgeholt werden, sondern nur dadurch, daß an Projekten bei uns gearbeitet wird und dabei Erfahrungen gesammelt werden und Fachkräfte entstehen.

Das größte Problem stellt heute das Programm dar, nach dem eine Atomenergie-Entwicklung bei uns ausgerichtet werden soll. Es ist zur Zeit noch nirgends entschieden, welche Reaktortypen sich als besonders ökonomisch und zuverlässig durchsetzen werden. Insbesondere kann die entscheidende Frage noch nicht eindeutig beantwortet werden, ob es besser ist, zunächst Natururanreaktoren zu bauen oder eine große Isotopentrennanlage zu errichten und Reaktoren mit angereichertem Material zu entwickeln. Diese Entscheidung hat auch viele politische Hintergründe. Vor allem wird sich ein Land nicht leicht darauf einlassen, Atomenergieanlagen zu bauen, die auf die Dauer auf im Ausland gekauftes Uran 235 oder angereichertes Material angewiesen sind. Einer der Vorschläge, die zur Zeit bei uns und in anderen europäischen Ländern diskutiert werden, läßt sich etwa folgendermaßen beschreiben:

Ein mit Natururan betriebener Reaktor ist erwünscht, weil das benötigte Uran aus verschiedenen Quellen, nötigenfalls auch in Deutschland, beschafft werden kann. Es ist aber sehr wahrscheinlich, daß die durch den geringen Gehalt an spaltbarem Material bedingten Einschränkungen die Entwicklung so behindern werden, daß dieser Reaktortyp nicht sehr ökonomisch sein wird. Es ist möglich, daß eine ganz geringe Erhöhung des Gehalts an spaltbarem Material diese Einschränkung so vermindern wird, daß sehr viel bessere Reaktoren gebaut werden können. Die Verwendung so geringer zusätzlicher Anreicherung hat einen entscheidenden Vorteil: die anfänglich zugegebene Anreicherungsmenge ist kleiner als die Menge des während des Betriebs gebildeten Plutoniums. Nach Erschöpfung der Brennstoffstäbe kann deshalb folgendes Verfahren zur Erneuerung der Brennstoffladung verwendet werden: Die alten Stäbe werden chemisch aufgearbeitet und das entstandene Plutonium wird abgetrennt. Ein Teil dieses Plutoniums wird dann zusammen mit neuen Stäben aus natürlichem Uran wieder im Reaktor verwendet. Damit braucht dieser

Reaktor nur bei seiner ersten Inbetriebnahme fremdes angereichertes Material. Dieses Material kann aus Natururanreaktoren stammen oder vom Ausland bezogen werden. Die nach Herstellung der zweiten Brennstoffladung überschüssige Plutoniummenge kann zur Anfangsanreicherung weiterer neu zu bauender Reaktoren verwendet werden. Man kann ein Programm ausrechnen, bei dem mit diesem Verfahren unter nur einmaliger Verwendung angereicherten Materials in zum Beispiel 15 Jahren eine Verzehnfachung der installierten Reaktorleistung möglich ist. Nach etwa dieser Zeit ist dann genügend überschüssiges Plutonium vorhanden, um zum Betrieb von Brutreaktoren überzugehen.

Ein solches Programm kann heute nur einer von verschiedenen möglichen Vorschlägen sein. Es muß gegen andere Vorschläge abgewogen werden, insbesondere gegen solche, die längere Zeit mit Natururanreaktoren arbeiten wollen oder bei denen als erstes die Errichtung einer Isotopentrennanlage vorgesehen wird. Für die Beurteilung werden dabei am Ende ökonomische Gesichtspunkte ausschlaggebend sein. Vorher aber wird eine ausführliche technische Diskussion stattfinden müssen. Bei dieser Diskussion werden auch die Wissenschaftler sich beteiligen. Da diese Probleme in vielen Ländern gemeinsam sind, wird es außerordentlich nützlich sein, auch solche Diskussionen zum Teil gemeinsam durchzuführen. Dies geschieht schon in sehr erfreulicher Weise im Rahmen der Europäischen Kernenergie-Gesellschaft, die viele Fachleute verschiedener Länder zusammenzubringen bemüht ist.

Bei den gemeinsam zu diskutierenden Problemen wird auch eine Frage sehr im Vordergrund stehen, auf die wir heute nicht eingegangen sind, nämlich die der Sicherheit. Ich darf hier der Überzeugung Ausdruck geben, daß die Atomenergieentwicklung zu keiner irgendwie gearteten Strahlengefährdung der Menschheit zu führen braucht. Im Gegensatz zu den Atombombenversuchen, bei denen die gesamten entstandenen Spaltprodukte in der Atmosphäre frei werden und irgendwann und irgendwo auf die Erde zurückkommen, braucht bei einem Atomkraftwerk von diesen Spaltprodukten nichts in die Atmosphäre zu gelangen. Wir dürfen glauben, daß alle Anstrengungen gemacht werden, um diesen wünschenswerten Zustand auch wirklich zu erreichen. Es stehen keinerlei unüberwindliche technische Schwierigkeiten

dagegen. Die Wissenschaft von den Strahlenwirkungen besteht schon seit den ersten Anwendungen der Röntgen- und Radiumstrahlen. Seit der Entdeckung der künstlich radioaktiven Isotope wird auch ihr Verhalten im menschlichen und tierischen Körper sowie in Pflanzen sehr ausführlich untersucht. Es gibt noch eine Anzahl von wissenschaftlichen Problemen, die geklärt werden müssen. Bis dahin wird es aber möglich sein, durch verschärfte Vorschriften des Strahlenschutzes allen möglichen Gefahren zu begegnen.

Wir erleben zur Zeit bei uns eine sehr verstärkte Förderung der Wissenschaft im Hinblick auf die Entwicklung von Atomenergieanlagen und im Hinblick auf die Anwendung der radioaktiven Strahlungen in vielen Gebieten. Wir nehmen diese Förderung dankbar an, weil wir hoffen, daß sie nicht umsonst sein wird. Die zahllosen jungen Wissenschaftler und Techniker, die sich auf Grund dieser Förderung jetzt den neuen Gebieten zuwenden, werden zweifellos dafür sorgen, daß wir nicht nur auf dem engeren Gebiet der Kernenergie, sondern in der Wissenschaft und ihrer Anwendung überhaupt weiterkommen werden. Die Anstrengung, die wir alle unternehmen, ist von uns aus freiwillig. Sie ist deshalb freiwillig, und wir haben deshalb die Verantwortung dafür übernommen, viele junge Menschen von anderen Gebieten in das der Atomenergie zu ziehen, weil wir hoffen dürfen, daß in unserem Land diese ganze Entwicklung nur unter friedlichen Aspekten betrieben werden wird. Eine Umlenkung der Entwicklung etwa in der Richtung auf eine Atomwaffenherstellung müßten wir persönlich als einen Mißbrauch des Vertrauens betrachten, mit dem wir an der Ausweitung unseres Gebietes mitarbeiten. Die Verantwortung des Wissenschaftlers für die Anwendung der von ihm mitgewonnenen Erkenntnisse ist eine schwere Last. Sie kann und darf ihm nicht ganz von anderen abgenommen werden. Wir sind glücklich, glauben zu dürfen, daß unsere Regierungen ebenso wie wir nur eine friedliche Entwicklung der Atomenergie fördern wollen.