

Zeitschrift: Prisma : illustrierte Monatsschrift für Natur, Forschung und Technik
Band: 7 (1952)
Heft: 4

Artikel: Das Atom und die Energie des Atomkernes
Autor: Lalive d'Epinay, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-653797>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

DAS ATOM UND DIE ENERGIE DES ATOMKERNES

Von J. Lalive d'Epinau, Ennetbaden

DK 620.93:539.15:621.385.822

In den letzten Jahren ist sehr viel über Atomwaffen oder, leider viel seltener, über die Verwendung der Energie des Atomkernes zu friedlichen Zwecken veröffentlicht worden, und doch scheint eine klare Beurteilung der heutigen Lage schwierig. Es liegen wohl Meldungen vor, daß in England Kernenergie zur Heizung von Laboratorien herangezogen wird und daß in den Vereinigten Staaten eine kleine Dampfturbine mit Hilfe von Atombrennstoff betrieben wurde. Diese Ereignisse haben aber eine eher historische als wirtschaftliche Bedeutung.

Die Sorge um unsere Stellung auf dem Gebiet der energieumsetzenden Maschinen hatte schon vor sechs Jahren Brown Boveri dazu bewogen, eine Gruppe von jungen Physikern zu bilden, die in engem Kontakt mit den Hochschulen ihre Arbeit aufnahmen. Ihre anfänglich auf die Grundlagenforschung beschränkte Tätigkeit wurde durch die Mitarbeit von Ingenieuren wesentlich erweitert. Obwohl die Sicherheitsmaßnahmen des Auslandes nur spärliche Informationen durchlassen und die Forschungsmittel der Schweiz im Vergleich zu denjenigen der Groß-Staaten sehr bescheiden sind, hatte diese Studiengruppe die Aufgabe übernommen, die Möglichkeiten einer industriellen Verwertung der Kernenergie zu prüfen.

Wir wollen in diesem Aufsatz versuchen, ein möglichst anschauliches und leicht verständliches Bild des Atoms, des Reaktors (Uranofen) und der beim Spaltvorgang frei werdenden Energiemengen zu entwerfen und anschließend über das Ergebnis unserer Untersuchungen kurz zu berichten.

Das Atom

Vor 2000 Jahren haben die Griechen für die Ur-Teilchen, aus denen die Stoffe zusammengebaut sind, das Wort Atom = unteilbar gebraucht. Was wir heute Atom nennen, verdient diesen Namen nicht mehr, denn es ist nicht unteilbar. Die Spaltung ist gelungen.

Das Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern, der eine Anzahl Teilchen und praktisch die ganze Masse enthält, und aus einer Anzahl negativ geladener Elektronen, die sehr leicht

sind und sich wie eine Hülle um den Kern legen oder um ihn kreisen wie die Planeten um die Sonne. Dieser Vergleich mit dem Sonnensystem ist sehr sinnfällig, doch darf er nicht allzu buchstäblich für wahr gehalten werden. Schwieriger ist es, sich die Größe des Atoms vorzustellen. Um eine Kette von Atomen zu bilden, braucht es für jeden Meter 10 Milliarden dicht aneinander stoßender Atome. Die Elektronenhülle ist im Durchmesser 10.000mal größer als der Kern. Hätte also der Kern die Größe eines Einrappenstückes (16 mm), so wäre der Durchmesser der Hülle 160 m. Wenn man sich das Atom so vergrößert denkt, daß es eine Werkhalle füllt, so wäre der Kern kaum größer als ein Stecknadelkopf. Man begreift also, daß es schwierig ist, den Kern zu treffen und zu spalten.

Dieser Kern ist aus einer Anzahl Teilchen gebildet: aus den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen Neutronen. Man kann sich den Kern nach Abb. 1 als eine gefüllte Kugel vorstellen, die eine für jedes Element bestimmte Anzahl Teilchen enthält. Er ist unvorstellbar dicht. Wäre es möglich, einen Würfel von 1 mm Kantenlänge aus lauter Kernen zu bilden, so würde sein Gewicht 10.000 t betragen, d. h. soviel wie etwa 100 elektrische Lokomotiven. Es tönt unglaublich, erleichtert aber die Vorstellung der enormen Energiemengen, die im Atomkern konzentriert sind.

Die Elektronen sind hingegen sehr leicht und auch ihre Bindungsenergie ist sehr gering. Chemische Reaktionen spielen sich nur in der Elektronenhülle ab, können folglich nur relativ kleine Energiebeträge liefern. So beträgt die bei der Verbrennung von 1 g Kohle entstehende Wärme, in elektrischen Einheiten ausgedrückt, nur rund 10 Wattstunden. Wenn aber die vollständige Umwandlung dieser Masse von 1 g in nutzbare Energie gelänge, könnten nach der von Einstein aufgestellten Beziehung zwischen Masse und Energie 25 Millionen Kilowattstunden oder gleich viel Wärme erzeugt werden wie bei der Verbrennung von 2500 t Kohle. Durch Kernspaltung kann jedoch nur eine wesentlich kleinere Energiemenge entstehen, denn nur ein Bruchteil, etwa ein Tausendstel der Masse, kann in Energie umgewandelt werden.

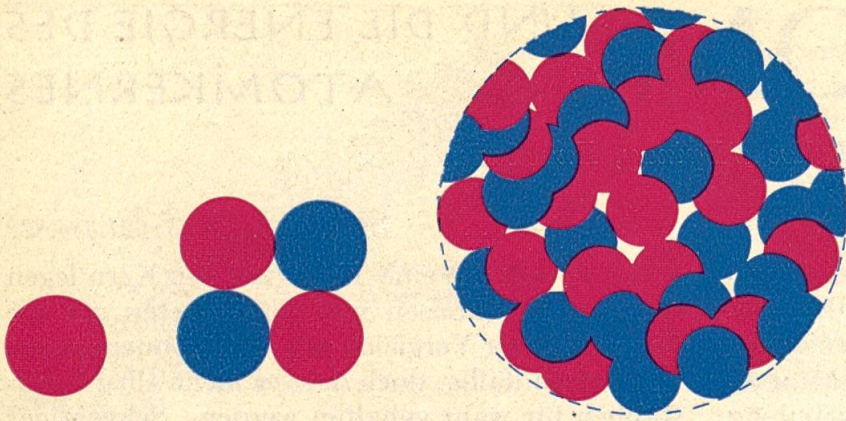


Abb. 1. Atomkerne

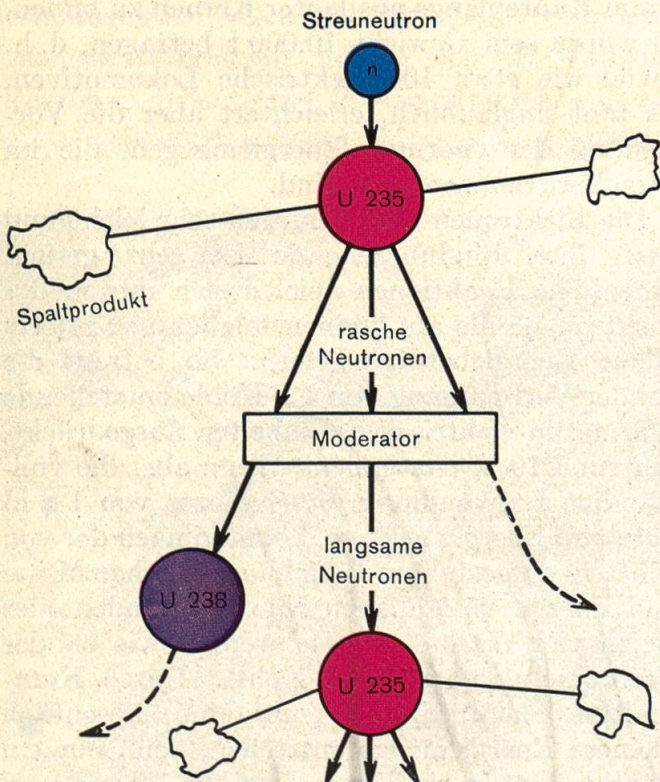
Wasserstoff	Helium	Uran 238	
1	2	92	Protonen
—	2	146	Neutronen

Wir möchten diese Einleitung mit einem Hinweis auf die Isotopen abschließen. Im periodischen System der in der Natur vorkommenden Elemente steht an erster Stelle das leichteste: das Wasserstoffatom, mit einem Proton und einem Elektron, an letzter Stelle das schwerste: Uran, mit je 92 Protonen und Elektronen und 146 Neutronen. Die dazwischenliegenden Elemente sind bis auf einige wenige bekannt. Die Zahl der Protonen und Elektronen hat für jedes Element einen die chemischen Eigenschaften bestimmenden Wert. Die Zahl der Neutronen hingegen kann verschieden sein,

so daß ein Element verschiedene Massen haben und sich folglich kernphysikalisch wesentlich anders verhalten kann. Man nennt diese etwas anders gearteten Atome eines Elementes Isotopen. Uns interessieren in erster Linie die Wasserstoff- und Uranisotopen. So unterscheidet sich das Deuterium oder der schwere Wasserstoff vom gewöhnlichen Wasserstoff dadurch, daß in seinem Kern außer einem Proton noch ein Neutron vorhanden ist. Das so oft genannte schwere Wasser ist eine chemische Verbindung von Deuterium und Sauerstoff; es ist im Verhältnis 1 : 5000 im gewöhnlichen Wasser vorhanden. Das in

der Natur vorkommende Uran besteht aus einer Mischung von drei Isotopen: U 234 in Spuren (0,006%), U 235 mit 0,7% und U 238.

Vor 32 Jahren gelang die erste Kernspaltung, die erste Umwandlung eines Elementes. Der Traum des Alchimisten war Wirklichkeit geworden, aber der Aufwand blieb viel größer als der Erfolg. Wie schon erwähnt, ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Geschöß den Kern trifft, außerordentlich klein. Man vergleicht sie mit der Treffsicherheit des Mannes, der in einem verdunkelten Raume, mit Taschenlampe und Pistole bewaffnet, auf eine Fliege zielt. Bei der ersten Spaltung des Urans im Jahre 1939 entstand wohl Wärme, aber auch da blieb die Ausbeute in keinem Verhältnis zum Aufwand, genau so, wie wenn man durch Abbrennen einzelner Streichhölzer einen Kessel voll Wasser zum Sieden bringen wollte. Im Dezember 1942 kam in Chicago die erste Kettenreaktion mit Uran, das erste sich selbst erhaltende Feuer mit Atombrennstoff zustande, drei Jahre später explodierte die erste Atombombe.



Die Kettenreaktion

Die Vorgänge, die sich bei der Kernspaltung abspielen, wollen wir an Hand des Schemas (Abb. 2) verfolgen. Ein Streuneutron, aus irgendeiner Quelle (aus dem Weltall oder aus einem Neutronengenerator) kommend, trifft den Kern eines U-235-Atomes. Dieser Kern explodiert, zerfällt in zwei Teile und sendet dabei zwei bis drei „rasche“ Neutronen aus, die, um nicht restlos von U 238 eingefangen zu werden, von einem Moderator gebremst werden müssen, bevor sie den nächsten U-235-Kern treffen. Eine Kettenreaktion findet statt, sie

Abb. 2. Schema der Kettenreaktion mit Moderator

wird divergent (nach Schneeballsystem ausbreitend), wenn mehr Neutronen entstehen als eingefangen werden.

Die Spaltprodukte bleiben im Uranstab stecken. Ihre kinetische Energie wird dort in Wärme umgesetzt, so daß der Reaktor (Uranofen) gekühlt werden muß.

Die Masse der Spaltprodukte ist um ein Tausendstel kleiner als diejenige des Urans, und es ist nur diese Massendifferenz, die in Energie umgewandelt wird. Reaktionen mit größerer Ausbeute (2 bis 3%) sind bekannt, aber es bleibt zum Glück beim Tausendstel! Jedenfalls ist die oft geäußerte Befürchtung unbegründet, die Kettenreaktion könnte weitergehen und den Zauberlehrling mit der ganzen Erde vernichten.

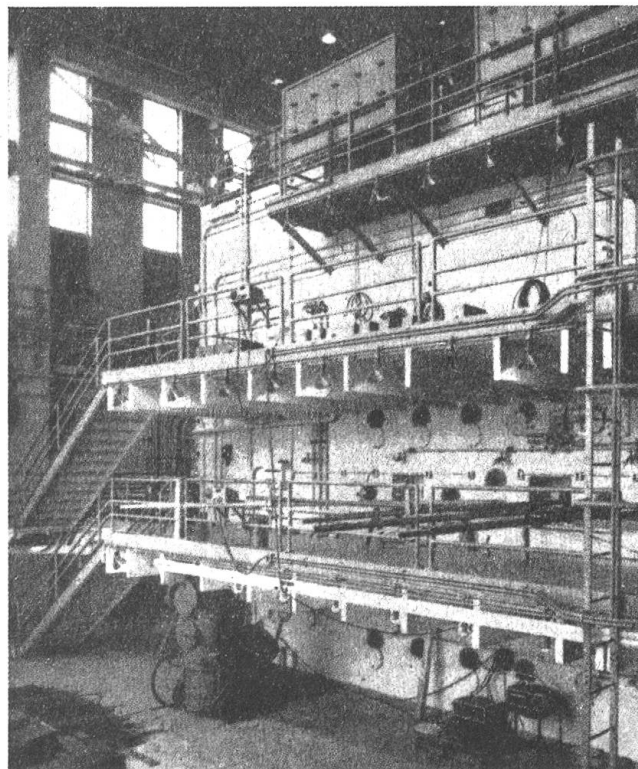
Damit nun nicht zu viele Neutronen verlorengehen, muß genügend spaltbares Material, genügend und zweckmäßig verteilter Moderatorstoff vorhanden sein. Das heißt, daß die Anlage eine bestimmte Größe nicht unterschreiten darf. Diese kritische Größe ist von verschiedenen Faktoren abhängig: zunächst vom Verhältnis U 235 zu U 238, denn U 235 ist das einzige heute bekannte natürliche Element, das zu einer Kettenreaktion führen kann. Beide Isotopen lassen sich trennen, im natürlichen Uran kann U 235 „angereichert“ und es kann sogar reines Uran 235 hergestellt werden. Dieser Weg führt zur Atombombe, zum kleinsten Reaktor.

Man weiß ferner, daß schweres Wasser (D_2O) oder Graphit, die bis heute als Moderator gebrauchten Stoffe, verschiedene kritische Größen ergeben. Ein Graphitreaktor braucht etwa zehnmal mehr natürliches Uran als ein D_2O -Reaktor, um überkritisch zu werden. Wichtig ist ferner die Reinheit der verwendeten Baustoffe oder deren Absorptionsvermögen für die Neutronen. Wir werden später darauf zurückkommen, möchten jedoch hier schon die Rolle der „neutronenfressenden“ Elemente erwähnen. Es ist klar, daß, sobald die Reaktion divergent ist, d. h. sobald der Reaktor die kritische Größe überschreitet und der Vermehrungsfaktor größer als Eins wird, die Leistung kontrolliert werden muß. Sonst würde die Anlage durchbrennen. Am einfachsten geschieht die Regelung durch Einführung von Cadmium- oder Borstäben in den aktiven Teil. Die kleinste Menge dieser Elemente genügt, um die Reaktion zu bremsen oder zum Stillstand zu bringen.

Abb. 3. Ein Uran-Graphit-Reaktor in USA. (Nach „Physics today“)

Übersicht über die wichtigsten ausgeführten Anlagen

Wie sieht nun ein Uran-Graphit-Reaktor aus? Abb. 3 stellt eine der amerikanischen Anlagen dar (Brookhaven, USA.). Mit ihrer dreistöckigen Bedienungsbühne sieht sie auf den ersten Blick einem gewöhnlichen Heizkessel sehr ähnlich. Wie aus Abb. 4 ersichtlich ist, sieht das Innere eines solchen Reaktors wesentlich anders aus. Die Uran- oder Uranoxydstäbe sind in einem Gitter *a* aus Graphitblöcken eingebettet, das zum Schutz des Personals gegen schädliche Strahlen von einem dicken Betonmantel *b* umgeben ist. Man erkennt die Regulier- und Schnellschlußstäbe *c* und *d* mit ihren Antriebsmechanismen sowie die verschiedenen Öffnungen *f* zur Einführung von Probenmaterialien. Eine Ionisationskammer *e* dient zur Messung des Neutronenflusses. Dieser Reaktor enthält zirka 32 t Uran, 500 t Graphit und ist damit nur sehr wenig überkritisch. Er ist luftgekühlt, wobei der Druck im Innern unter dem Atmosphärendruck liegt, um das Entweichen radioaktiver Luft in den Prüfraum zu verhindern. Die Luft wird abgesogen und durch einen hohen Kamin ins Freie geführt. England besitzt in Harwell einen zweiten, wesentlich stärkeren Reaktor, der bis auf eine Temperatur von 200° C betrieben werden kann. Er dient ebenfalls der Forschung und der Erzeugung radioaktiver Isotopen. Im Winter



wird die entstehende Wärme teilweise zur Heizung der Laboratorien benutzt. Die französischen Forscher verfügen über zwei Schwerwasserreaktoren in der Nähe von Paris. Der

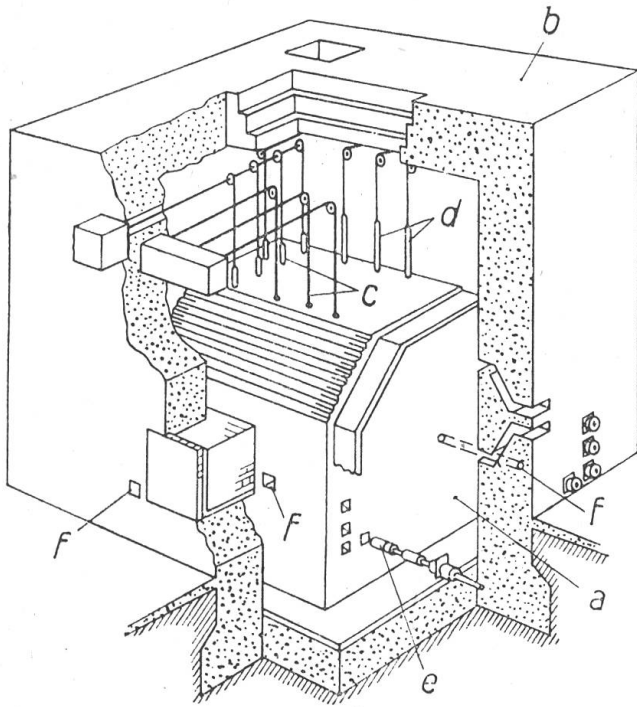


Abb. 4. Schematische Darstellung eines heterogenen Reaktors (Gleep) in Harwell (aus „Nucleonics“, 8, 4, 1951)

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a Uranstäbe und Graphit | d „Schnellschluß“-Stäbe |
| b Beton | e Ionisationskammer |
| c Kontrollstäbe | f Versuchsöffnungen |

eine steht seit Ende 1948 in Betrieb und kann innerhalb 24 Stunden bis auf etwa 100 kWh belastet werden. Der zweite Reaktor soll künstlich gekühlt werden und eine wesentlich höhere Leistung abgeben. Norwegen besitzt ebenfalls einen D_2O -Reaktor, der heute fertiggestellt ist. Abb. 5 zeigt einen der beiden kanadischen Schwerwasserreaktoren von Chalk River in vollem Betrieb. Etwa 400 Physiker und Techniker sind in dieser Anlage beschäftigt, die letztes Jahr noch die stärkste ihrer Art war. Sie dient in erster Linie zur Prüfung von Materialien unter starker und langdauernder Neutronenbestrahlung. In den USA. liegen die meisten kernphysikalischen Forschungsanstalten im östlichen Teil des Landes. So unter anderem in Argonne, Brookhaven, Oak Ridge. Alle Anlagen sind nationalisiert und stehen unter der Kontrolle der Atomic Energy Commission, die ihren Sitz beim Pentagon in Washington hat. Im Westen stehen die großen Hanford-Werke zur Plutoniumherstellung, die Laboratorien von Los Alamos, die eigentliche Waffenfabrik, und

die Universität von Kalifornien. Auf dem Gebiete der Kernphysik arbeiten Industrie und Hochschulen im Dienste des Staates zusammen. Im Nordosten und auch im Nordwesten sind große Reaktorenversuchsanlagen im Bau oder in Betrieb. Die General Electric betreibt die Knolls Laboratorien und die Plutoniumwerke von Hanford. Um einen Begriff vom enormen Aufwand zu geben, sei erwähnt, daß in diesen Werken 30.000 Leute, Techniker und Physiker, d. h. etwa 15% des Personals der General Electric beschäftigt sein sollen.

Die Grundlagenforschung ist selbstverständlich auch Aufgabe der Universitäten, aber alle Anstrengungen scheinen auf die Herstellung von Atomwaffen gerichtet zu sein. Einige zur Produktion elektrischer Energie geplante Anlagen wurden möglicherweise ihrem ursprünglichen Zweck entfremdet. Der Leiter des auf Abb. 3 gezeigten Laboratoriums hat im April 1948 geschrieben, er hoffe binnen zwei Jahren zeigen zu können, daß die Erzeugung elektrischer Energie aus einem solchen Reaktor möglich sei. Wir wissen heute nicht, ob der Versuch gelungen ist oder ob die Anlage heute einem anderen Zweck dient. Eine mit Atom Brennstoff betriebene Zentrale (Atomkraftwerk) dürfte von einem modernen Kohlenkraftwerk nicht sehr verschieden sein (Abb. 6), denn die direkte Erzeugung elektrischer Energie ist heute nicht möglich, ein thermisches Kraftwerk muß zwischengeschaltet werden. Turbinen und Hilfsbetriebe sind in beiden Anlagen gleich, das eigentliche Kesselhaus ähnlich. Der hier gezeichnete Reaktor hätte wohl Platz im Kesselhaus, aber ein hoher Kamin wäre jedenfalls auch nötig. Der Raum muß belüftet werden, und es ist dafür zu sorgen, daß die radioaktive Luft genügend verdünnt und für Menschen und Tiere unschädlich gemacht wird.

Die Lage in der Schweiz

Wie steht es nun in unserem Lande? Wir können keine Photographien von Reaktoren zeigen, denn die Schweiz besitzt weder Uran noch Graphit, noch schweres Wasser. Wir sind jedoch sowohl auf dem Gebiet der Kernphysik wie in der Prüfung technischer Möglichkeiten nicht untätig geblieben.

Wir hatten im Jahre 1948 alle sich beim Studium der industriellen Anwendung der Kernenergie stellenden Fragen schematisch (Abb. 7) zusammengefaßt, um mit aller Deutlichkeit zu zeigen, daß wir uns damals nur mit den drei umrandeten Feldern: Grundlagen-

forschung, Meßtechnik und Geräte, Kraftwerk abgeben könnten. Wir wollten auch gewisse allzu optimistische Vorstellungen zerstreuen. Als sehr krasses Beispiel sei das Auto genannt: wer damals glaubte, seinen Wagen mit konzentriertem Atombrennstoff über Tausende von Kilometern betreiben zu können, übersah die Materialfragen und die Notwendigkeit, etwa 20 t totes Gewicht als Abschirmung gegen gesundheitsschädliche Strahlen mitzuschleppen! Man kam langsam zur Einsicht, daß die Erzeugung elektrischer Energie nicht unmittelbar bevorsteht.

Die wichtigsten Probleme sind in Feldern eingeordnet: **S p a l t b a r e s M a t e r i a l.** U 235 ist das einzige in der Natur vorhandene Element, das eine Kettenreaktion auslösen kann. — **M o d e r a t o r.** Schweres Wasser, Beryllium oder Graphit bremsen durch elastischen Stoß die raschen Neutronen auf das sogenannte thermische Energieniveau. — **W ä r m e t r ä g e r:** Einige Gase, Wasser oder schweres Wasser, flüssige Metalle. — **A b s c h i r m s t o f f e:** Blei, Cadmium, Beton usw. absorbieren die schädlichen Strahlen. — **Ü b r i g e B a u s t o f f e:** Wesentlich bei der Auswahl dieser Stoffe sind ihre kernphysikalischen Eigenschaften, die Stabilität ihres Gefüges unter der intensiven Bestrahlung und ihre mechanische Festigkeit. Es ist eine Ironie der Natur, daß die heute gebräuchlichen Baustoffe mit genügender Festigkeit kernphysikalisch unbrauchbar sind und daß andererseits Materialien, die die Neutronen wenig absorbieren, wie Aluminium, vorderhand keine genügende Festigkeit haben.

Der im Reaktor erhitzte W ä r m e t r ä g e r wird so radioaktiv, daß er nicht direkt zur Turbine geführt werden kann. Er muß in dem eigentlichen Kessel seine Wärme einem Hilfskreislauf, Gas oder Wasser, abgeben.

Das Problem der radioaktiven Zerfallprodukte ist nicht gelöst. Nur der kleinere Teil läßt sich verwerten, der andere muß unschädlich gemacht werden.

Links unter dem Feld Reaktor liegt das Feld der industriellen Produktion von „T r a c e r“. Man bezeichnet damit die radioaktiven Isotopen von Elementen, wie etwa Jod, Phosphor, Schwefel, Eisen, die ihre Anwesenheit durch ihre Radioaktivität offenbaren. Da sie die gleichen chemischen Eigenschaften haben wie das Grundelement, machen sie alle seine Prozesse, auch die metallurgischen oder biologischen, mit. Ihre Verwendung im Naturwissenschaft und Technik nimmt immer noch zu und öffnet früher ungeahnte Möglichkeiten. Es seien hier zwei Möglichkeiten genannt: In der Metallurgie kann durch Beigabe von radioaktivem Schwefel der Schwefelgehalt der Schmelze jederzeit ohne chemische Analyse geprüft werden. Ein Zählrohr zeigt sofort an, ob die Probe noch schwefelhaltig und auch wieviel Schwefel darin enthalten ist. In der Pflanzenkunde kann der Stoffwechsel beobachtet werden, indem man dem Dünger radioaktives Phosphor beimischt. Radioisotopen als Ersatz oder Ergänzung der Röntgenuntersuchung leisten in der Materialprüfung hervorragende Dienste. Dieses Gebiet fällt jedoch aus dem Rahmen dieses Artikels.

Wir sind sehr früh zur Einsicht gekommen, daß eine Kraftwerkstudie den Reaktor mit erfassen muß, daß der Ingenieur den Physiker und auch der Physiker den Ingenieur braucht. Die Wärme muß aus dem Reaktor heraus, andererseits aber darf der Wärmeträger den Spaltprozeß nicht stören. Diese Wechselwirkungen zeigen, daß die Probleme nur in enger Zusammenarbeit aller Beteiligten gelöst werden können. Auch der Physiko-Chemiker ist ein wesentliches Mitglied der Mannschaft.

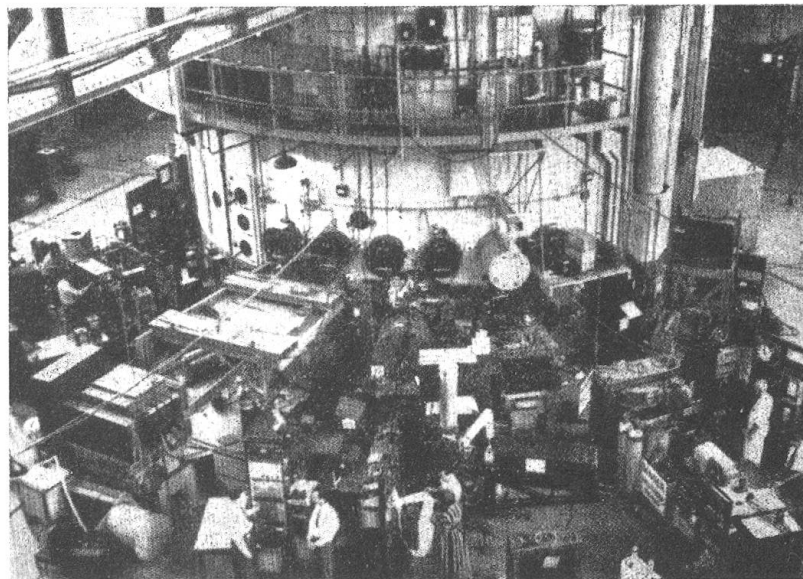


Abb. 5. Einer der kanadischen Schwerwasserreaktoren in Chalk River. (Nach „Nucleonics“)

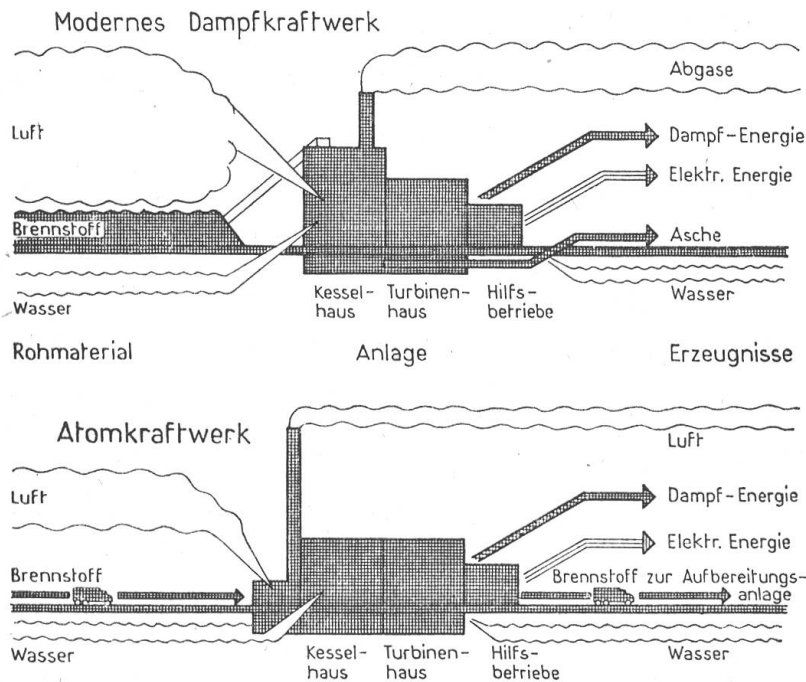


Abb. 6. Vergleichende Darstellung eines Dampf- und eines Atomkraftwerkes (Nach „Goodman“)

Vom Feld „Reaktor“ führt links eine Linie zurück zum Feld der spaltbaren Materialien, weil unter gewissen Bedingungen solche Materialien im Reaktor selbst entstehen oder „ausgebrütet“ werden. Darum steht hier „breeding“ oder in freier Übersetzung „im Ofen gezüchtet“.

Unter spaltbarem Material muß das Plutonium erwähnt werden, ein künstliches Element, das bei dem Beschießen von U 238 mit Neutronen entsteht. Plutonium spielt in der

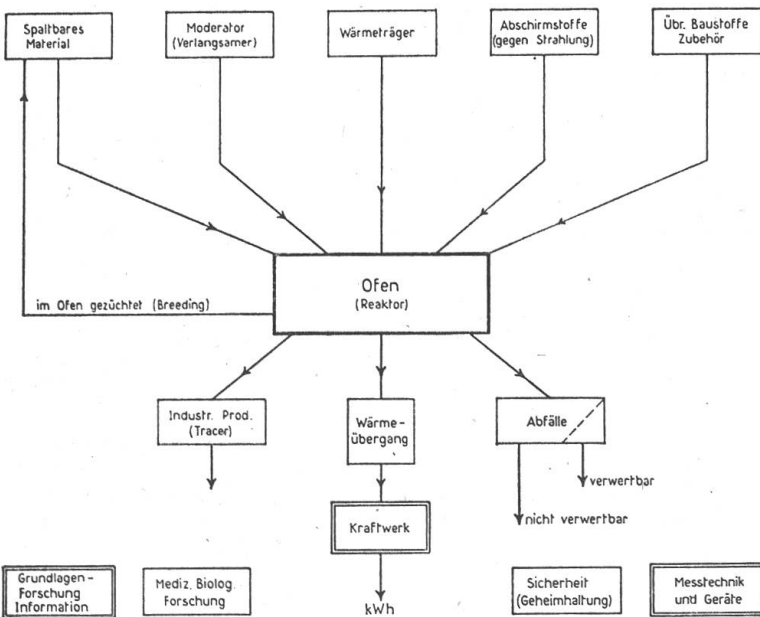


Abb. 7. Schema zur industriellen Anwendung der Kernenergie

Waffenherstellung eine noch wichtigere Rolle als U 235. Darum sind in den Vereinigten Staaten einige „Breeder-Reaktoren“ im Bau.

Nach der Spaltung von Uran 235 werden rasche Neutronen vom Uran 238 eingefangen (Abb. 8). Es bilden sich durch Zerfall über das Uranisotop U 239 sogenannte Transurane, d. h. noch schwerere Elemente: das Neptunium und schließlich das fast stabile Pu 239. Auch Thorium kann durch einen ähnlichen Prozeß Spaltmaterial liefern: das Uranisotop U 233.

Wenn „breeding“ gelingt, d. h. wenn mehr Plutonium erzeugt werden kann als U 235 verbraucht, so könnte nach und nach das gesamte natürliche Uran des Reaktors verbrannt werden. Diese künstliche Herstellung von spaltbarem Material ist wahrscheinlich der einzige wirtschaftliche Weg zur Energieerzeugung.

Bei dieser möglichst ausführlichen Zusammenfassung aller Probleme wurde festgestellt, daß die wichtigsten Fragen nicht beantwortet werden konnten. Wir mußten also beim Studium eines ersten Projektes für einen Uran-Graphit-Reaktor viele Annahmen treffen.

Die Uranstäbe im Reaktor sind durch eine Aluminiumhülle gegen Korrosion geschützt (Abb. 9). Diese Umhüllung soll auch verhindern, daß die radioaktiven Spaltprodukte vom Wärmeträger mitgenommen werden. Wir stoßen jetzt schon auf eine der schwierigsten Aufgaben: Die Hülle muß sehr dünn sein (1 bis 3 mm), denn Aluminium absorbiert Neutronen, aber wenn sie dünn ist, besteht Gefahr, daß sie dem Druck der im Innern entstehenden Gase nachgibt.

Wir wollten einen energieabgebenden Reaktor bauen und brauchten dafür hohe Temperaturen. Aber Aluminium schmilzt bei 650° C und hat schon bei 200° C eine stark verminderte Festigkeit. Es blieb uns also nichts anderes übrig, als die Lösung des Problems der Hülle hinauszuschieben.

Wenn Gitteranordnung und Abmessungen des Reaktors bestimmt sind, können die zu übertragende Wärmemenge und die für die Zir-

kulation des Wärmeträgers erforderliche Leistung berechnet werden. Die Wärme entsteht zu 97% im Uranstab selbst, so daß praktisch nur die Staboberfläche am Wärmeübergang teilnimmt. Die Rechnung zeigt, daß bei gleichem Leistungsbedarf eine Flüssigkeit zirka 300mal mehr Wärme übertragen kann als ein Gas unter atmosphärischem Druck. Zur wirksamen Kühlung des Reaktors muß also das Gas verdichtet und der Reaktor druckfest gebaut werden, aber bei 25 ata bleibt ein Gas etwa zehnmal ungünstiger als eine Flüssigkeit. Bei der Verwendung einer Flüssigkeit als Wärmeträger, gleich ob Wasser oder flüssiges Metall, dürften andererseits die auftretenden Auftriebskräfte wesentliche Schwierigkeiten bieten.

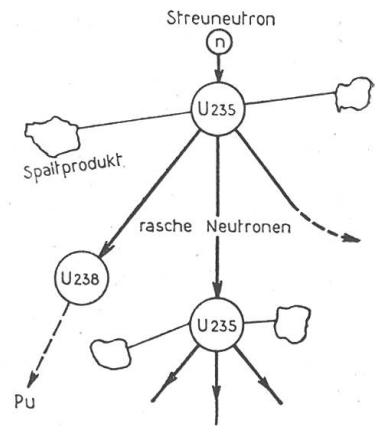
Ein ausgearbeitetes Projekt

Mit unseren damals sehr spärlichen Kenntnissen, aber dafür mit genügender Phantasie, ist im Jahre 1948 das Projekt einer 50.000-kW-Anlage entstanden, die im Uetliberg oder in den Lägern eingebaut werden könnte. Die Dampfturbinenanlage ist normal, sie sollte 300 m über dem Dampfkessel stehen, damit keine Kesselspeisepumpe im gefährdeten Teil aufgestellt werden muß. Wir kümmerten uns wenig um den Reaktor. Wir nahmen zur Kühlung flüssiges Metall, das aus wärmetechnischen Gründen im Reaktor umgewälzt wurde und von dem nur etwa 10% zum Dampfkessel geleitet worden wären.

Im Bestreben, uns über die Zahl der ungelösten Probleme Rechenschaft zu geben und um uns über die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung elektrischer Energie durch Kernreaktion eigene Unterlagen zu verschaffen, hatten wir das Projekt einer Uran-Schwerwasser-Anlage mit Kostenvoranschlag ausgearbeitet. Der theoretische Physiker hat die Pile-Theorie aufgestellt und bei seinen Berechnungen die Messungen und Untersuchungen des Experimentalphysiker benutzt. Wir konnten vor einem Jahr unsere Studien vorläufig abschließen. Kurz darauf wurde ausländisches Material über den Bau verschiedener Versuchsreaktoren kleiner Leistung freigegeben. Hätten wir gewartet, so wäre uns viel Zeit und Mühe erspart geblieben, aber wir durften nicht warten. Wir haben zunächst mit gemischten Gefühlen, dann aber doch mit Befriedigung festgestellt, daß das Ergebnis unserer Studie mit den freigegebenen Unterlagen recht gut übereinstimmt.

Abb. 11 zeigt das Schema des geplanten Kraftwerkes. Da heute noch keine Anhalts-

Abb. 8. Schema der Kettenreaktion mit „breeding“



punkte vorliegen, die darauf schließen lassen, daß Kernenergie in anderer Weise als über ein thermisches Kraftwerk nutzbar gemacht werden kann, war zuerst abzuklären, wie die im Kernreaktor 1 entstehende Wärme abgeführt und der thermischen Zentrale zugeführt werden kann. Es ist bekannt, daß eine sich selbst erhaltende Kernreaktion im natürlichen Uran nur in Anwesenheit eines Moderators möglich ist und daß Graphit oder schweres Wasser diese Aufgabe erfüllen. Es schien zweckdienlich, durch Verwendung von schwerem Wasser Moderator und Wärmeträger in ein und demselben Medium zu vereinigen, das die Wärme vom Reaktor zum Austausch 2 überträgt. Das Speisewasser des vom Reaktor örtlich getrennten Dampfkraftwerkes strömt durch den Wärmeaustauscher 3, der die Rolle des Dampferzeugers übernimmt, zum Überhitzer 4 und zur Turbine 5. Es wäre denkbar, den im Wärmeaustauscher erzeugten Sattdampf unmittelbar zu entspannen, es ist jedoch wesentlich vorteilhafter, ihn vorher in einem vom Reaktor getrennten und mit üblichen

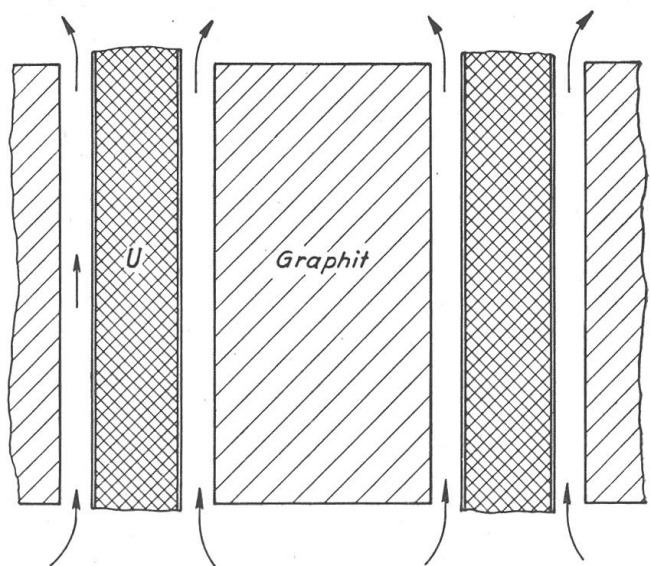


Abb. 9. Uranstab im Graphitreaktor

Brennstoffen beheizten Überhitzer auf die wirtschaftliche Temperatur zu bringen. Es läßt sich leicht nachweisen, daß die dadurch zu-

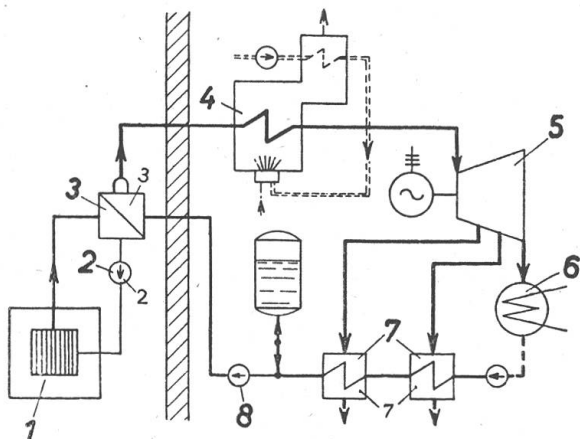


Abb. 10. Schema eines Schwerwasserreaktors mit Dampfkraftwerk

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 Reaktor | 3a Schwerwasserbehälter |
| 1a Graphitreflektor | 4 Dampfüberhitzer |
| 1b Beton | 5 Turbine und Generator |
| 2 Schwerwasser-Umwälzpumpe | 6 Kondensator |
| 3 Wärmeaustauscher | 7 Speisewasservorwärmung |
| | 8 Kesselspeisepumpe |

sätzlich zugeführte Energie den Wirkungsgrad wesentlich erhöht. Ferner bietet der getrennte Überhitzer den Vorteil, daß er an einem von den schädigenden Ausstrahlungen des Reaktors vollkommen geschützten Ort aufgestellt werden kann.

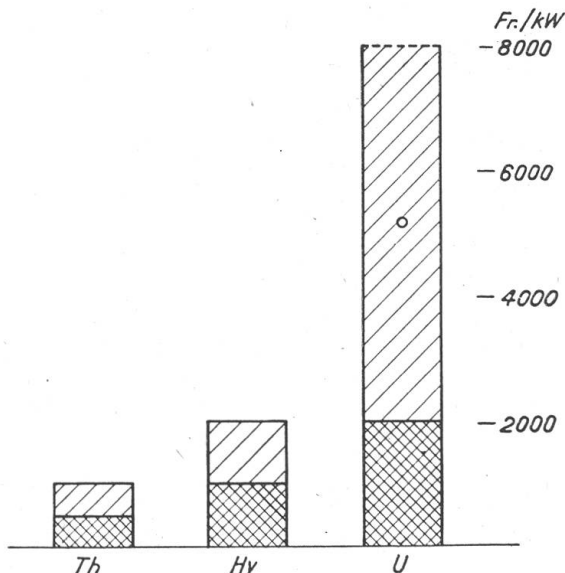


Abb. 11. Vergleich der Anlagekosten. Doppelt schraffiert: Minimalwert. Einfach schraffiert: Streuung
 Th = Thermisches Kraftwerk
 Hy = Hydraulisches Kraftwerk
 U = Uran-Kraftwerk

Der aktive Teil des Reaktors besteht aus dem im Graphit eingebetteten Schwerwasserbehälter, der die erforderliche Anzahl Uranstäbe enthält. Der Graphit wirkt hier als Reflektor. Der bei einer Temperatur von 250° C vorhandene Druck wird von der kugelförmigen eisernen Umhüllung aufgenommen. Zum Schutze gegen schädigende Strahlen muß das Ganze von einer dicken Betonschicht umgeben werden.

Obwohl die Zahl der ungelösten physikalischen und technischen Probleme sehr groß blieb, konnten doch über die mutmaßlichen Kosten einer solchen Anlage einige wertvolle Unterlagen gewonnen werden.

Die Kosten eines Atomkraftwerkes (Berechnet für eine Leistung von 2500 kW)

Reaktor Uran	Fr.	800.000.—
Schweres Wasser	„	7,500.000.—
Graphit	„	700.000.—
Übrige Baustoffe	„	500.000.—
	Fr.	<u>9,500.000.—</u>
Wärmeaustauscher	Fr.	500.000.—
Regulierung und Instrumente	„	500.000.—
Kraftwerk	„	1,000.000.—
Gebäude	„	500.000.—
Montage und Unvorhergesehenes	„	1,000.000.—
	Fr.	<u>13,000.000.—</u>

Auffallend ist der Anteil der den aktiven Teil bildenden Stoffe: Uran, schweres Wasser und Graphit, die allein 70% der Gesamtkosten ausmachen. Wollte man für den Moderator das kostspielige schwere Wasser durch Graphit ersetzen, so würden dadurch die Materialkosten kaum vermindert, denn die erforderliche Menge Uran müßte ein Vielfaches sein.

In der Annahme, daß eine Leistung von 2500 kW an den Generatorklemmen abgegeben wird und ferner daß die Anlage ohne Materialersatz während 30 Jahren dauernd voll belastet werden kann und nach dieser Zeit abgeschrieben ist, läßt sich der Preis der Kilowattstunde zu zirka 0,10 Franken berechnen. Es ist aber sehr gewagt, über die Gestehungskosten etwas auszusagen, wenn noch keine energieabgebende Anlage gebaut und einige Zeit in Betrieb gewesen ist.

Wir haben versucht, die Anlagekosten in Franken pro installiertes kW für thermische, hydraulische und Urankraftwerke nebeneinander zu stellen (Abb. 13). Beim Urankraftwerk wurde keine Grenze nach oben gezeichnet, denn da streuen die Ansichten im Verhältnis von etwa

1 : 10. Im Jahre 1946 wurden in den Vereinigten Staaten Zahlen veröffentlicht, die von einem bewundernswerten Optimismus zeugten. Der Vergleich zwischen Kohle- und Plutoniumkraftwerk für 100.000 kW fiel zugunsten des Plutoniumreaktors aus. Bei gleichen Brennstoffkosten war die kWh im Plutoniumreaktor 10% billiger. Man glaubte damals, mit kleineren Anlage- und Betriebskosten rechnen zu dürfen. Heute ist man vorsichtiger geworden. Mit 5200 Fr./kW liegt der von uns ermittelte Wert wahrscheinlich zu tief. Es ist also begreiflich, daß man über die Gesteungskosten der kWh in einem solchen Kraftwerk heute noch nichts aussagen darf. Es sieht jedenfalls nicht so aus, als ob man es sich heute ernsthaft überlegen sollte, ob weitere thermische oder hydroelektrische Kraftwerke gebaut werden dürfen.

Ausblick

Man kann sich aus Neugier die Frage stellen, ob es möglich wäre, den Bedarf unseres Landes an elektrischer Energie durch Kernspaltung zu decken. Nehmen wir einen Bedarf von 10 Milliarden kWh an. Wir haben einleitend gesagt, daß 1 g Materie, vollständig in Energie umgesetzt, 25 Millionen kWh abgibt, danach genügten 400 g für 10 Milliarden kWh. Da aber der Massendefekt bei der Spaltung von U 235 nur 1% beträgt, wären 400 kg statt 400 g notwendig. Wir wissen, daß das natürliche Uran 0,7% U 235 enthält. Wenn statt dessen durch „breeding“ und Verwendung des entstehenden Plutoniums 1% des Urans verbraucht wird, so gibt diese einfache Rechnung 40.000 kg natürliches Uran. Mit einem thermischen Wirkungsgrad von 25% steigt die jährlich be-

nötigte Uranmenge auf 160 t. Das verbrauchte Uran, das durch chemische Prozesse von den Spaltprodukten befreit und teilweise wieder verwendet werden kann, ist jedoch nur ein Bruchteil der Gesamtmenge, die in den Reaktoren eingebaut werden muß, um die kritische Größe zu überschreiten. Gelingt das „breeding“, so würde eine Gesamtmenge von 5000 t für einen 30jährigen Betrieb wahrscheinlich ausreichen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß die heute bekannte abbauwürdige Uranmenge nur 50.000 bis 100.000 t beträgt. Seien wir also froh um den dauerhaften, wenn auch schwankenden Ertrag unserer **Wasserkraft**! Wir dürfen jedoch nicht vergessen, daß unser gesamter Energiebedarf viermal größer ist als die Lieferung unserer hydroelektrischen Werke und daß wir auch vom einheimischen Holz und von der Lieferung von Kohle und Öl abhängig sind.

Dies ist aber nicht der einzige Grund unseres Interesses an den Problemen der Kernphysik. Auf dem Gebiete der Wissenschaft ist der Begriff des **Absoluten** fragwürdig geworden. Es scheint, als ob nichts mehr absolut unmöglich wäre. Das früher für unteilbar gehaltene Atom ist im Jahre 1919 gespalten worden. 1939 gelang die erste Uranspaltung mit Wärmeentwicklung, 1942 die erste Kettenreaktion und 1945 explodierte die erste Atombombe. Man hat nicht nur Protone und Neutronen, sondern auch andere Teilchen, wie Neutrinos, Mesonen entdeckt. Man forscht nach anderen Energie abgebenden Reaktionen. Wir müssen versuchen, auf irgendeinem Gebiete der Kernforschung oder ihrer technischen Anwendungen irgend etwas Besonderes zu leisten.

Neues Härteprüfkleingerät

DK 620.178.15

Die Härtmessung dient zur Ermittlung der Zugfestigkeit von Stählen, in besonderen Fällen auch zur Vorausbestimmung der Bearbeitbarkeit metallischer Werkstoffe oder zur Beurteilung vorausgegangener Operationen, wie z. B. einer Kaltverformung, Wärme- oder Warmbehandlung. Die bekannten Härteprüfverfahren arbeiten mit verhältnismäßig großen Prüflasten und verlangen daher kräftig dimensionierte Prüfmaschinen, da jede Nachgiebigkeit des Meßgerätes Fehler der Härtmessung zur Folge hat. Härteprüfungen an fertigen Maschinenteilen, deren Oberfläche nicht nennenswert beschädigt werden darf, oder von sperrigen Werkstücken, die nicht unter eine ortsfeste Prüfmaschine genommen werden können,

sind nur dann durchführbar, wenn ein handliches Kleingerät zur Verfügung steht, das schnelle und in bestimmten Grenzen zuverlässige Härtmessungen ermöglicht. In Frankreich wurde unter dem Namen „Ernst“ ein von einem Schweizer erfundener Hand-Härteprüfer herausgebracht, der für viele Zwecke der Werkstatt schnelle und genügend zuverlässige Härtmessungen gestattet. Es handelt sich um ein tragbares Kleingerät, das mit einer Höhe von 80 mm und einem Durchmesser der Kreisskala von 64 mm weniger als 1 kg wiegt und mit einer geeichten Last von 7 kg arbeitet. Das Gerät ist sehr empfindlich und zeigt vor allem Homogenitätsfehler an, die bei Prüfungen mit großer Last nicht immer zum Vorschein kommen.