Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 45 (1954)

Heft: 25

Artikel: Wirtschaftliche Betrachtungen über die Nutzung der Kernumwandlung zur Erzeugung elektrischer Energie

Autor: Winiger, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061216

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: 08.08.2025

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

von U^{235} und U^{238} spielt die Neutronenanlagerung an das Isotop U^{238} nur eine geringe Rolle.

Damit nun die so eingeleitete Kettenreaktion nicht abbricht, sondern sich weiter fortpflanzt, ist dafür zu sorgen, dass die *Neutronenbilanz* erhalten bleibt. In erster Linie muss der Reaktor die kritische Grösse haben, um die Verluste an Neutronen durch die Oberfläche klein zu halten. Aber auch aus anderen Gründen können Neutronen wieder verloren gehen. Ein Teil davon wird von Verunreinigungen im Uran oder im Moderator weggefangen, ein anderer Teil erfährt nur ungenügende Verlangsamung und reagiert dann mit dem U^{238}. Die Verluste durch die Oberfläche lassen sich erheblich vermindern, indem man den Reaktor mit einem Neutronenreflektor umgibt, der aus einer der üblichen Moderatorsubstanzen besteht. Bei richtiger Konstruktion der Maschine ist es möglich, eine positive Neutronenbilanz zu erzielen, d. h. jedes Neutron im Reaktor muss im Mittel mindestens wieder ein neues Neutron erzeugen [$k > 1$ (k Reaktivität)]. Die Neutronendichte und die damit verbundene Wärmeentwicklung steigen dann immer mehr an.

Der Reaktor würde schliesslich zerstört werden, wenn man nicht durch Eintauchen von Bor- oder Cadmiumstäben die Kettenreaktion regulieren könnte. Die Regulierwirkung beruht darauf, dass Bor und Cadmium äusserst grosse Einfangquerschnitte für langsame Neutronen besitzen. Je tiefer man die Stäbe in den Reaktor eintaucht, um so mehr langsame Neutronen werden absorbiert, bis schliesslich die Bilanz ausgeglichen ist und die Maschine stationär läuft.

Der Reaktor, der mit natürlichem Uran und Moderator arbeitet und den wir etwas eingehender betrachtet haben, stellt nur einen bestimmten Typ einer Atommaschine dar. Es existieren ausserdem zahlreiche andere Maschinen, deren Bau und Arbeitsweise voneinander zum Teil erheblich abweichen, und die im folgenden noch kurz erwähnt seien. Man unterscheidet je nach Art des Moderators, des «Brennstoffs» und der Konstruktion: Graphit-Pile, D_2O-Pile, Reaktoren mit natürlichem oder mit angereichertem Uran (U^{235}-Gehalt grösser als 0,7 %), homogene oder inhomogene Pile. Allen diesen Maschinen ist gemeinsam, dass die Atomenergie als *Wärme* gewonnen wird, also in einer für die technische Anwendung ungünstigen Energieform. Es ist zur Zeit kein Weg sichtbar, der gestatten würde, die Energie direkt in Form elektrischer Energie mit einem einigermassen in Betracht fallenden Wirkungsgrad zu erhalten.

Die Atommaschinen, die heute gebaut werden, sind natürlich als erste tastende Versuche zu betrachten. Wir können nicht beurteilen, welche Wege die Technik in Zukunft einschlagen wird. Wichtig ist, dass die Schweiz mit dem Bau eines Reaktors nicht länger zuwartet, sondern an diesen Problemen tatkräftig mitarbeitet.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *P. Scherrer*, Vorstand des Physikalischen Instituts der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.

Nachwort der Redaktion:

In der anschliessenden Diskussion erwähnte der Referent die kürzlich erfolgte Gründung einer *Europäischen Gesellschaft für Atomenergie.* Zur Zeit gehören dieser Organisation sieben Staaten an; auch die Schweiz ist Mitglied. Die Gesellschaft fördert einen regen Gedanken- und Erfahrungsaustausch zwischen allen beteiligten Partnern und leistet so einen wichtigen Beitrag für eine erfolgreiche Zusammenarbeit auf europäischer Grundlage. Diese Gesellschaft wird auch das Organ sein, das beim Zustandekommen des von Präsident Eisenhower vorgeschlagenen internationalen Atompools als Verhandlungspartner für Europa aufzutreten in der Lage ist.

Wirtschaftliche Betrachtungen über die Nutzung der Kernumwandlung zur Erzeugung elektrischer Energie

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1954 in Zürich,

von *A. Winiger*, Zürich

621.311.25 : 621.039.4

Für bestimmte Kernreaktoren-Typen sind die technischen Probleme so weit geklärt, dass der Bau je eines Atomkraftwerkes in Amerika und England in Angriff genommen werden konnte. Über die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie liegen noch keine zuverlässigen Daten vor. Einige Zahlenwerte werden angegeben. Auf Grund des bisherigen Entwicklungstempos kann angenommen werden, dass im Zeitpunkt des Vollausbaues der schweizerischen Wasserkräfte Atomkraftwerke mit klassischen Dampfkraftwerken in Wettbewerb treten können. Sie werden praktisch nur als Grundlastwerke arbeiten, wodurch unsere Akkumulieranlagen, die zur Deckung der Leistungsspitzen unentbehrlich sind, noch an Wert und Bedeutung gewinnen.

Pour certains types de réacteurs nucléaires, les questions techniques sont suffisamment élucidées pour que la construction d'une usine atomique ait pu être entreprise aussi bien en Angleterre qu'en Amérique. Quant au coût de l'énergie nucléaire, nous ne disposons pas encore de données sûres. Quelques exemples numériques sont fournis à ce propos. Le développement a été si rapide jusqu'ici que nous pouvons admettre qu'au moment où l'aménagement de nos forces hydrauliques sera achevé, les usines atomiques pourront concurrencer les centrales thermiques classiques. Les usines atomiques ne produiront en principe que de l'énergie de base, de sorte que nos usines à accumulation, indispensables pour couvrir les besoins en énergie de pointe, gagneront encore en importance et en valeur.

A. Einleitung

Die friedliche Erschliessung der neuen Energiequelle, die in der Umwandlung des Atomkerns liegt, ist heute in vollem Fluss. Technisch ist ein bedeutender Teil der zu überwindenden Schwierigkeiten bereits gelöst; dagegen lassen sich über die wirtschaftlichen Verhältnisse zukünftiger Energieerzeugungsanlagen nur Vermutungen anstellen. Wie weit die Meinungen noch auseinandergehen, wird am besten durch zwei Berichte illustriert, die kürzlich

in der «Neuen Zürcher Zeitung» auszugsweise veröffentlicht wurden.

Die Schwedische Atomenergie A.-G. hat letzthin ihren ersten Versuchsreaktor in Betrieb genommen. In ungefähr 5 Jahren soll ein weiterer Versuchsreaktor grösserer Leistung fertiggestellt sein, der die Grundlagen zu liefern hätte für den Bau von Atomkraftwerken, die in der schwedischen Energieversorgung eingesetzt werden könnten. Von den Leitern der Schwedischen Atomenergie A.-G. wird betont, dass die wirtschaftlichen Schwierigkeiten solcher Atomkraftwerke nach den derzeitigen Verhältnissen viel grösser seien als die technischen. Die Anlagekosten erreichten so hohe Beträge, dass die Atomenergie wohl erst *nach* dem Versiegen der heutigen Energiequellen in grossem Maßstab zum Einsatz gelangen könne.

Demgegenüber wird im letzten Tätigkeitsbericht der Atomenergiekommission der USA ausgeführt, dass sie ein auf 5 Jahre berechnetes Reaktorprogramm durchführe, um die Preise der Atomenergie so weit zu reduzieren, dass sie mit Kohle, Erdöl und Wasserkraft in Wettbewerb treten könne. Die Kosten für die zum Bau der Reaktoren notwendigen Rohmaterialien und den Brennstoff seien schon beträchtlich gesenkt worden, so dass die Kosten der Kernenergie in absehbarer Zeit konkurrenzfähig werden sollten.

Auch wenn man zugeben muss, dass die Amerikaner bestimmt über grössere Erfahrungen im Bau und Betrieb von Kernreaktoren verfügen als die Schweden, so geht doch aus diesen Meinungsäusserungen hervor, dass, von Sonderfällen abgesehen, das Problem der Wirtschaftlichkeit von Kernreaktoren in thermischen Anlagen noch *nicht* gelöst ist und dass man noch nicht über alle notwendigen Unterlagen verfügt, um den Gestehungspreis von Atomenergie mit einiger Genauigkeit berechnen zu können. In besonderem Mass trifft das zu für Länder wie die Schweiz, die sich bis jetzt *nicht* auf Grund *eigener* Erfahrungen eine Meinung zu bilden vermochten. Wir kennen weder den Marktpreis für den Kernbrennstoff, noch die Anlagekosten, und über den laufenden Aufwand eines im Dauerbetrieb arbeitenden Atomkraftwerkes lässt sich schon gar nichts aussagen. Nach den uns zur Verfügung stehenden Unterlagen und Informationen scheint es wenig wahrscheinlich, dass es gelingen wird, vor Ablauf der Ausbauperiode unserer Wasserkräfte für schweizerische Verhältnisse geeignete Atomkraftwerke zu erstellen, deren Energiegestehungskosten vergleichbar sind mit denjenigen der Energie unabgeschriebener hydraulischer Anlagen. Um so weniger werden ganz oder teilweise *amortisierte* Wasserkraftwerke von der Konkurrenz zukünftiger Atomenergieanlagen bedroht. Im übrigen darf noch einmal mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass wir alle Ursache haben, unsere einzige Energiequelle nicht brach liegen zu lassen. Die Ausnützung des fallenden Wassers schmälert die Energiereserven unserer Erde in keiner Weise, solange der «Kernreaktor Sonne» für die Einhaltung des Kreislaufes der Verdampfung und Kondensation des Wassers der Meere und Seen sorgt.

B. Wirtschaftliche Aspekte von Atomkraftwerken

1. Allgemeines

Nach diesen einleitenden Bemerkungen möchte ich nun dazu übergehen, Ihnen einige Aspekte über Atomkraftwerke vor Augen zu führen, die in direktem Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit stehen und die Grenzen erahnen lassen, innerhalb welcher sich der Kampf um die Verbilligung der Kernenergie abspielen wird. Ich beschränke mich auf die im Vordergrund stehende Ausnützung der Spaltungsenergien der schweren Elemente Uranium und Thorium und der aus ihnen abgeleiteten Transurane mit noch höherem Atomgewicht. Ob es einmal gelingen wird, die nur bei sehr hohen Temperaturen vor sich gehende Fusion von leichten Wasserstoffatomen zu Helium mit ihrer riesigen Energieentwicklung für friedliche Zwecke auszunützen, ist heute noch nicht abzusehen. Als Brennstoff für einen industriellen Kernreaktor kommen heute praktisch in Frage:

das zu 0,7 % im Uranmetall enthaltene Isotop U 235,
das aus Thorium herstellbare Uranisotop U 233,
das aus Uranium U 238 durch Neutronenbeschuss erzeugbare Plutonium Pu 239.

Von diesen Brennstoffen ist einzig das Uranisotop U 235 in der Natur vorhanden; es kann nur durch ausserordentlich kostspielige physikalische Operationen vom Isotop U 238 getrennt werden.

Die Energieerzeugung durch Kernumwandlung folgt dem bekannten Einsteinschen Äquivalenzgesetz

$$W = c^2 m$$

das heisst, die in Form von Wärme und Strahlung produzierte Energie ist proportional dem Massenverlust, der beim Zerfall des Atomkerns eintritt. Die vollständige Zerstrahlung von einem Gramm Masse würde somit dem Freiwerden von rund 25 GWh [1]) Energie entsprechen. Bei den Kernspaltungen im Reaktor verschwindet jedoch nur ungefähr ein Tausendstel der Masse der spaltbaren Kerne, während 999 Tausendstel in die Spaltprodukte übergehen, die als «Asche» zu betrachten sind. Ein Massendefizit von einem Gramm, entsprechend einer Energiemenge von 25 GWh, bedingt daher den Verbrauch von einem Kilogramm spaltbaren Materials.

Trotz dieser schlechten Ausbeute sind aber die anfallenden Energiemengen im Verhältnis zum Gewicht des Brennstoffes immer noch *millionenfach höher* als beispielsweise bei der Verbrennung von Kohle, von der ein Kilogramm nur 8,1 kWh Rohenergie ergibt. Die im Kernreaktor erzeugte thermische Energie muss auf ein flüssiges oder gasförmiges Kühlmedium übertragen werden, das sie direkt oder indirekt einer Primärmaschine, sei es einer Gas- oder Dampfturbine, zuführt, die ihrerseits in gewohnter Weise elektrische Generatoren antreibt, welche die elektrische Energie liefern können.

Nach den Grundgesetzen der Thermodynamik ist der thermische Wirkungsgrad einer Dampf- oder

[1]) 1 GWh (Gigawattstunde) = 10^9 Wh = 10^6 kWh (1 Million kWh).

Gasturbinenanlage um so günstiger, je höher die Temperatur des Wärmeträgers ist, mit der die Primärmaschine gespeist wird. Es ist aber ausserordentlich schwierig, Werkstoffe zu finden, die sowohl der im Innern des Reaktors auftretenden hohen Temperatur, als auch dem intensiven Neutronenbeschuss gewachsen sind. Nach den bis jetzt vorliegenden Erfahrungen dürfte es schwer halten, die Temperaturgrenze von rund 500 °C zu überschreiten. Die im Bau befindlichen Reaktoren für die Energieversorgung arbeiten meines Wissens alle mit niedrigeren Temperaturen in der Grössenordnung von 300 °C. Dementsprechend darf wohl bei den ersten Anlagen kaum mit einem höheren Gesamtwirkungsgrad als 0,25 gerechnet werden, während bei modernen Dampfkraftwerken Gesamtwirkungsgrade von 0,35...0,4 erreichbar sind.

2. Brennstoffkosten und Kapitaldienst

Wie bei den klassischen thermischen Anlagen, hängt auch die Wirtschaftlichkeit des Atomkraftwerkes im wesentlichen von den zwei Faktoren *Brennstoffkosten* und *Kapitaldienst* ab, die im folgenden etwas näher beleuchtet werden sollen. Beim Kernreaktor ist das Verhältnis der beiden Kostenelemente unter anderem abhängig vom gewählten Typ. Arbeitet man mit Natururan, das durch U 235 oder Pu angereichert ist, so verringern sich im allgemeinen die Grösse und damit die Investitionskosten des Reaktors, während die Brennstoffkosten an Bedeutung zunehmen. Umgekehrt bedingt die Wahl eines Reaktortyps, der mit verhältnismässig billigem Natururan beschickt werden kann, teurere Reaktoren und damit einen höheren Aufwand für Verzinsung und Amortisation des investierten Kapitals. Innerhalb gewisser Grenzen kompensieren sich diese Faktoren, so dass der Gestehungspreis der erzeugten Wärmeenergie, sofern sie mit gleicher Temperatur zur Verfügung steht, ungefähr der gleiche ist, ob das Natururan durch Zusatz von spaltbarem Material etwas angereichert werde oder nicht.

In erster Linie soll nun die Frage der *Brennstoffkosten* einer näheren Betrachtung unterzogen werden durch Vergleich mit den Kohlenkosten eines Dampfkraftwerkes. Aus den bis jetzt durchgesickerten Angaben darf geschlossen werden, dass aus mittelgradigen Erzen gewonnenes reines Uran, das nur 0,7 % spaltbares Isotop U 235 enthält, zu einem Preis von *330* Fr./kg [2]) hergestellt werden kann, während die Kosten von reinem U 235 oder Plutonium auf rund *85 000* Fr./kg geschätzt werden. Beim Spaltvorgang tritt der bereits erwähnte Massenverlust von rund 1 ‰ auf, das heisst beim Zerfall von 1 kg U 235 oder Pu ist die Summe der Zerfallprodukte um 1 g leichter als das Ausgangsmaterial. Nach dem Einsteinschen Äquivalenzgesetz entspricht diesem Massenverlust eine in Form von Wärme und Strahlung frei werdende Energie von rund 25 GWh. Bei Verwendung von 1 kg Natururan ergäbe sich dem geringen Gehalt an spaltbarem U 235 entsprechend nur ein Massenverlust von 0,007 g, der einer Energieerzeugung von 175 000 kWh entspräche.

Die theoretischen Brennstoffkosten einer kWh Rohenergie, bei vollständiger Ausnützung der in der Reaktorbeschickung enthaltenen spaltbaren Masse, würden sich somit unter Zugrundelegung der erwähnten Preise auf

0,34 Rp./kWh stellen bei Verwendung von nur spaltbarem Material wie U 235 oder Plutonium, und

0,19 Rp./kWh bei Verwendung von Natururan.

Demgegenüber würde die Verbrennung von Kohle mit einem Heizwert von 7000 WE/kg bei einem für unsere Verhältnisse geltenden Preis von 75 Fr./t verzollt loko Schweizergrenze die Rohenergie zu *0,92* Rp./kWh liefern.

Nun ist aber zu berücksichtigen, dass in einem modernen Dampfkraftwerk mit Kohlenfeuerung praktisch die gesamte Kohle verbrannt wird, während in einem nicht regenerativen Kernreaktor mit einer Beschickung von U 235 oder Plutonium nach dem heutigen Entwicklungsstand nur rund 50 % der spaltbaren Masse ausgenützt werden können.

Bei einem Konverterreaktor wird infolge teilweiser Umwandlung von U 238 in spaltbares Plutonium rund 1 % der Beschickung mit Natururan dem Spaltvorgang unterworfen (0,7 % U 235 + 0,3 % Pu). Berücksichtigen wir ferner, dass die Rohenergie der Kohle in einem modernen Dampfkraftwerk mit einem Gesamtwirkungsgrad von 0,35 in nutzbare elektrische Energie umgewandelt werden kann, während bei den heute im Bau befindlichen Grossreaktoren höchstens mit 0,25 gerechnet werden darf, so ergibt sich als Brennstoffanteil pro kWh nutzbar erzeugter Energie ein Wert von

2,63 Rp./kWh für das kohlenbefeuerte Dampfkraftwerk,

2,73 Rp./kWh für das mit nur spaltbarem Material arbeitende Atomkraftwerk, und

0,525 Rp./kWh für das mit Natururan beschickte Kraftwerk mit Kernreaktor.

Arbeitet man mit durch Zusatz von U 235 oder Plutonium leicht angereichertem Natururan, so kann der Preis des Brennstoffes mit erhöhtem Gehalt an spaltbarem Material nach einer von *W. E. Abbott* [3]) angegebenen Methode berechnet werden. Diese ergibt für je 0,1 % Anreicherung Mehrkosten von 100 Fr./kg Brennstoff, so dass beispielsweise bei einer Uranbeschickung, die zu 1 % aus U 235 und 99 % U 238 bestände, mit einem Preis von 630 Fr./kg Brennstoff zu rechnen wäre.

Da der mit reinem spaltbarem Material beschickte, nicht regenerative Reaktor für die allgemeine Energieversorgung a priori nicht in Frage kommt, führen die vorstehenden Überlegungen zum Schluss, dass unter den getroffenen Annahmen die Brennstoffkosten der bei der heutigen Entwicklungsstufe ausführbaren Grossreaktoren rund *4...5*

[2]) *P. Ailleret* (Revue Française de l'Energie, Nr. 51, März 1954) rechnet mit einem Preis für Natururan, der rund 4000 mal höher wäre als der Preis von Kohle. Das entspräche bei einem Kohlenpreis von 80 Fr./t einem Wert von 320 Fr./kg Uran. *B. Goldschmidt* erwähnte bei seinem Vortrag anlässlich der Generalversammlung der Schweizerischen Gesellschaft für chemische Industrie am 2. September 1954 in St. Moritz einen Preis für reines Natururan von 250 bis 300 Fr./kg.

[3]) *W. E. Abbott*, Chemical Engineering Progress, May 1954.

mal geringer sind als bei dem mit Kohle betriebenen Kraftwerk.

Diese Zahlen rufen folgendem Kommentar:

Bei niedrigen Kohlenpreisen, wie sie z. B. in den USA üblich sind, tritt eine entsprechende Verminderung der Kohlenkosten ein, und zwar bei einem Ansatz von 7 \$/t auf 1,05 Rp./kWh. In den allermodernsten Kraftwerken mit einem Dampfdruck von 300 kg/cm² und Dampftemperaturen von 650 °C hofft man auf einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 40 % zu kommen, so dass sich der Anteil der Brennkosten weiter auf

$$1{,}05 \frac{0{,}35}{0{,}40} = 0{,}93 \text{ Rp./kWh}$$

oder rund *1* Rp./kWh ermässigen würde. Dieser Wert darf wohl unter den heutigen Verhältnissen als Grenzwert angesehen werden; er zeigt aber, dass in Ländern mit relativ hohen Kohlenpreisen, die wie bei uns noch zusätzlich durch Transportspesen belastet sind, die Atomenergie rascher konkurrenzfähig werden wird als in Ländern mit tiefliegenden Preisen für die fossilen Brennstoffe.

Was den Kernbrennstoff betrifft, so ist es heute noch völlig ungewiss, ob wir ihn zu dem angenommenen Preis beschaffen können. Einerseits werden heute bereits so arme Uranerze abgebaut, dass die Kosten des reinen Uranmetalls auf das Dreifache des zugrunde gelegten Mittelpreises ansteigen; anderseits ist mit einer Verbesserung der Extraktionsverfahren zu rechnen, die sich in einer Verbilligung des Metalls auswirken würde. In den letzten Jahren sind auf allen Kontinenten so viele neue Erzstätten festgestellt und zum Teil bereits der Ausbeutung erschlossen worden, dass man für friedliche Zwecke über genügend Material verfügen wird, um mit dem Bau von Kernreaktoren einigermassen Schritt halten zu können. B. Goldschmidt schätzt die heutige Erzeugung von Natururan auf 20 000... 60 000 t/Jahr, während 200 t genügen würden, um den Jahresbedarf der Schweiz an elektrischer Energie zu decken.

Es ist wahrscheinlich, dass in den nächsten Jahren eine Art internationaler Pool unter Regierungsaufsicht geschaffen wird, der die Preise für spaltbares Material festsetzen und die Kontrolle über seine Verwendung ausüben wird. Ob dieser Preis so bestimmt wird, dass mit ihm auch ein Teil der Entwicklungskosten gedeckt werden kann, bleibt abzuwarten. Ein wichtiger Faktor für die Senkung der auf eine nutzbar erzeugte Kilowattstunde entfallenden Kosten für den Kernbrennstoff liegt aber in der Verbesserung der Ausnützung des spaltbaren Materials. Gelänge es, den Grossbreeder zu verwirklichen, der im Betrieb mindestens so viel spaltbares Material frisch erzeugt, als er verbraucht, so liesse sich der Brennstoffanteil an den Energiegestehungskosten sehr stark herabsetzen. Verteuernd wirkt anderseits der Umstand, dass beim Dampfkraftwerk ein Kohlenvorrat von 3 Monaten genügt, um einen geregelten Betrieb aufrecht zu erhalten, während der Kernreaktor ein Brennstoffinventar erfordert, das in die Jahre geht und entsprechende zusätzliche Kapitalbelastungen bedingt. Beim heutigen Stand der Dinge scheint es vernünftig, für schweizerische Verhältnisse anzunehmen, dass die nutzbare Kilowattstunde eines mit einem Kernreaktor arbeitenden Grosskraftwerkes einen *4...5mal* kleineren Aufwand an Brennmaterial erfordert als die Kilowattstunde einer mit Kohle beschickten Anlage. Ob die Schweiz in der Lage sein wird, sich mit der Zeit die notwendige Versorgung mit Kernbrennstoff zu sichern, ist eine offene Frage. Seine Verwendung hätte den für uns besonders grossen Vorteil, dass er im Gegensatz zu Kohle und Öl sehr geringe bauliche Aufwendungen für die Lagerhaltung beanspruchen würde.

Als weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Ausnützung des Kernbrennstoffes sei die Verbindung von Kraftwerk und Wärmezentrale erwähnt, die der Fernheizung einen ganz bedeutenden Auftrieb geben könnte. Sie setzt voraus, dass es gelingt, betriebssichere Grossreaktoren zu bauen, die unbedenklich auch in dichtbesiedelten Wohngebieten stehen dürfen.

Während sich die Entwicklung der Brennstoffkosten des Kernreaktors auf Grund der bisher bekannt gewordenen Publikationen noch mit einiger Sicherheit überblicken lässt, ist es ungleich schwerer, sich über die Anlagekosten ein einigermassen zutreffendes Bild zu machen. Wenn wir uns über die Grössenordnung der voraussichtlichen Baukosten eines Kraftwerkes mit Kernreaktor orientieren wollen, so können wir uns nur auf Veröffentlichungen von Schätzungen stützen, die von einer Seite kommen, von der wir annehmen dürfen, dass sie auf Grund ihrer Erfahrungen ein einigermassen zutreffendes Urteil abzugeben vermag.

Über langjährige Betriebserfahrungen mit Grossreaktoren verfügt man heute erst in den USA bei den Grossanlagen, wie zum Beispiel derjenigen von Hanford, die zur Erzeugung des militärisch wichtigen Plutoniums dient. Es liegt deshalb nahe, in erster Linie auf Angaben derjenigen Firmen und Fachleute abzustellen, die diese Anlagen gebaut und betrieben haben und die Projekte für den Bau von Atomkraftwerken bearbeiten, deren Kernreaktoren von den im Betrieb befindlichen abgeleitet sind. Es ist dies der graphit-moderierte Konvertertyp, der vorwiegend mit langsamen Neutronen arbeitet und erlaubt, neben der Erzeugung von Wärme auch etwas spaltbares Material zu produzieren, das einen Teil des verbrauchten Kernbrennstoffes ersetzen kann.

Solche Typen sind im Bau in den USA für den Einsatz im Energieverteilungsnetz der Stadt Pittsburg (Duquesne Power and Light) und in England für die spätere Energielieferung an das «Grid». Im einen Fall ist die Kühlung des Reaktors mit unter hohem Druck stehendem reinem Wasser und im andern Fall mit unter Druck stehendem Gas (Kohlensäure) vorgesehen. Die Leistungen an den Klemmen der Generatoren werden sich zwischen 50 000 und 75 000 kW bewegen, und die Kosten scheinen auf das 2,5...3fache einer modernen Dampfkraftanlage mit Kohlenbeschickung veranschlagt zu werden, die elektrische Ausrüstung inbegriffen. Als Brennmaterial dient leicht angereichertes Natur-

uran. In allen Fällen wird mit einer sehr hohen Ausnützung der Energieerzeugungseinheiten gerechnet. Es wird erwartet, dass unter diesen Voraussetzungen elektrische Energie erzeugt werden kann, deren Preis etwas über 5 Rp./kWh liegen würde. Wenn es sich hier auch noch um Wunschziffern handelt und wir nicht wissen, welche Brennstoffkosten zugrunde gelegt wurden und inwieweit die chemischen Prozesse zur Regeneration der Uranstäbe in die Rechnung einbezogen sind, so erscheint uns doch der Schluss erlaubt, dass diese Grossleistungs-Pilotanlagen bereits elektrische Energie erzeugen können, deren Preis das 2fache desjenigen einer klassischen thermischen Anlage nicht überschreitet. Dabei ist berücksichtigt, dass der thermische Wirkungsgrad der Reaktoranlage rund 30 % niedriger ist als derjenige eines klassischen Dampfkraftwerkes.

3. Ausblick in die fernere Zukunft

Nach diesem Blick in die unmittelbare Zukunft möchte ich noch einige Gedanken äussern über die sich in den nächsten Jahrzehnten eröffnenden Aussichten, wenn die im Gang befindlichen Entwicklungsarbeiten für industrielle Energiereaktoren zum Erfolg führen sollten. Die Bestrebungen zu ihrer Vervollkommnung weisen nach verschiedenen Seiten. Sie gehen einmal in Richtung einer Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades durch Erhöhung der Austrittstemperatur des zur Dampferzeugung oder zum Betrieb von Gasturbinen verwendeten Kühlmittels. Es sei wiederholt, dass die Lösung dieses Problems weitgehend davon abhängt, ob es gelingt, Baustoffe zu finden, die bei annehmbaren Preisen genügend widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen und starke Neutronenbestrahlung sind. Die bis jetzt erzielten Fortschritte lassen darauf schliessen, dass in absehbarer Zeit mit Temperaturen von 500 °C gearbeitet werden kann, gegenüber heute 300...350 °. Eine weitere Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades könnte erreicht werden durch die Ausschaltung der Wärmeaustauscher, indem das den Kernreaktor verlassende Kühlmedium direkt zum Antrieb der Primärmaschine herangezogen würde, ohne dass eine radioaktive Verseuchung befürchtet werden müsste. Man versucht auch, den sogenannten heterogenen, mit Uranstäben beschickten Reaktor durch eine Bauart zu ersetzen, die erlaubt, das Uran in flüssiger Form dem Kühlmedium beizumischen und damit den Betrieb kontinuierlicher zu gestalten. Schliesslich wird auch das Breederprinzip in mehreren Grossanlagen weiter entwickelt, um so rasch als möglich die *optimale* Verwertung des nicht spaltbaren U 238 und des Thoriums zu sichern.

Die General Electric Co. hat einige Vergleichszahlen bekanntgegeben über ein Atomkraftwerk mit einer Leistung ab Generatorklemme von 300 000 kW, das mit einem sogenannten Verdampfer-Reaktor ausgerüstet wäre, und ein leistungsgleiches Dampfkraftwerk mit Kohlenbeschickung. Diesem Vergleich liegen folgende Zahlen zugrunde:

	für den Reaktor		für die klassische Dampfanlage
Ausnützungsgrad %	80		80
Dampftemperatur °C	227	(Sattdampf)	535
Dampfdruck kg/cm²	30		100
Gesamtwirkungsgrad %	24		35

Rechnet man die amerikanischen Zahlen auf unsere Verhältnisse um und berücksichtigt man die heute in der Schweiz herrschenden Kapitalverhältnisse, so lässt sich ein interessanter Vergleich ziehen zwischen den zwei im Raum von Basel gedachten thermischen Kraftwerken für die Beschickung mit Kohle oder Atombrennstoff und einem hydraulischen Speicherwerk gleicher Leistung, und zwar in der Grössenordnung der Kraftwerkgruppe Mauvoisin. Der Vergleich ist insofern nicht ganz zutreffend, als die Wertigkeit der Speicherenergie verschieden ist von derjenigen einer thermischen Anlage, die bei einer Ausnützung von 80 % praktisch nur Konstantenergie liefert. Da man aber das Verhältnis der Wertigkeiten der beiden Energiequalitäten ziemlich genau schätzen kann, lassen sich aus dem Vergleich doch gewisse Schlüsse ziehen.

Es würden betragen:

	Anlagekosten Fr./kW rund	Jahreskosten % des investierten Kapitals
Bei der hydraulischen Anlage	1350	6
Beim Atomkraftwerk	1050	15
Beim kohlenbefeuerten Dampfkraftwerk	650	34

Beziffert man die gesamten Jahreskosten mit 100 %, so verteilen sich die anteiligen Kosten folgendermassen auf die einzelnen Kraftwerktypen:

	Hydraulische Anlage %	Atom-Anlage %	Dampfkraftwerk mit Kohlenfeuerung %
Kapitalkosten	90	66	29,5
Betrieb und Unterhalt	10	12,8	4,5
Brennstoffkosten	0	21,2	66,0

Diese Zahlen verstehen sich unter der Annahme einer 80jährigen Konzession für die hydraulische Anlage und einer Verzinsung des Kapitals von 3,3 %, einer Abschreibungsdauer für die thermische Anlage von 20 Jahren bei einer Verzinsung des Kapitals von 5 % und einem Kohlenpreis von 74 Fr./t in Basel. Über den Preis des Urans hat die General Electric Co. keine Angaben gemacht; er dürfte in den Grenzen liegen, die eingangs aufgezeigt wurden.

Unter diesen Voraussetzungen ergäben sich Energiegestehungspreise von:

3,2 Rp./kWh für das Wasserkraftwerk, bei 80 % Winterenergie,

2,8 Rp./kWh für das Atomkraftwerk, bei einer Betriebsdauer der Bestlast [240 MW] von 7000 h,

4,0 Rp./kWh für das Kohlendampfkraftwerk, bei einer Betriebsdauer der Bestlast [240 MW] von 7000 h.

Aus diesen Gegenüberstellungen geht hervor, dass die hohen Kohlenpreise, mit denen die Schweiz schon wegen der Transportkosten rechnen muss, die Atomenergieanlage als wirtschaftlich vorteilhaf-

ter erscheinen lassen. Nimmt man an, dass die Wertigkeit der hydraulisch erzeugten Speicherenergie nur 50 % höher ist als diejenige der thermisch erzeugten Konstantenergie, so sieht man, dass unsere einheimischen Wasserkraftwerke noch durchaus konkurrenzfähig sind. Einmal abgeschrieben, ist ihre Position noch viel stärker. Wie lange es noch dauern wird, bis Atomkraftwerke gebaut werden können, die so niedrige Energiegestehungspreise aufweisen, ist eine offene Frage.

C. Zusammenfassung

Zusammenfassend darf folgendes festgehalten werden:

Solange die Preise und Produktionsziffern von Uran *geheim* gehalten werden und wir über keine Erfahrungen im Bau und Betrieb von Grossreaktoren verfügen, ist es unmöglich, eine genaue wirtschaftliche Analyse für den Gestehungspreis von elektrischer Energie aus thermischen Kraftwerken mit Kernreaktoren durchzuführen. Insbesondere sind wir viel zu wenig im klaren über verschiedene, die Brennstoff- und Betriebskosten massgebend beeinflussende Faktoren, wie

maximal mögliche Expositionszeiten von Kernbrennstoffen in den Reaktoren,

Kosten der zyklischen chemischen Wiederaufbereitung der durch die Spaltprodukte vergifteten Brennstoffe,

Manipulationskosten für die Unschädlichmachung der radioaktiven Rückstände usw.

Über die zu erwartende Lebensdauer von Reaktoren bestehen auch erst Vermutungen, so dass über die notwendigen Abschreibungssätze noch keine Klarheit herrscht.

Die Vielfalt der im Studium und in Ausführung begriffenen Reaktortypen, die für Grossanlagen in Betracht kommen, lässt noch keinen Schluss über die wirtschaftlich günstigste Bauform zu. Das Endziel wird voraussichtlich der *Grossbreeder* sein, der schon im Hinblick auf die integrale Ausnützung des Natururans angestrebt werden muss. Wieviel Zeit diese Entwicklung in Anspruch nehmen wird, ist schwer vorauszusehen. Es darf aber darauf hingewiesen werden, dass sich der Erfolg, nach dem bisherigen Entwicklungstempo zu schliessen, rascher einstellen kann, als man vernünftigerweise erwarten würde. Wenn man bedenkt, dass bei der für die Jahre 1957/58 in Aussicht genommenen Inbetriebnahme der ersten zwei grossen Atomkraftwerke in Amerika und England erst 15 Jahre verstrichen sein werden, seit Enrico Fermi die Kernspaltungs-Kettenreaktion demonstrierte, so kann man auch für die Zukunft mit einem raschen Fortschritt rechnen, dies um so mehr, als auch militärische Interessen den Arbeiten auf diesem Gebiet einen nicht zu unterschätzenden Impuls geben.

Es darf deshalb mit einer gewissen Berechtigung angenommen werden, dass die Schweiz nach dem vollen Ausbau ihrer Wasserkräfte in der Lage sein wird, ihren weitern Energiebedarf durch Atomkraftwerke zu decken, zu Bedingungen, die nicht ungünstiger sind, als wenn sie die Energie mit importierten fossilen Brennstoffen zu erzeugen hätte. Die mit Kernreaktoren betriebenen Anlagen sollten schon im Interesse eines möglichst sparsamen Betriebes die Basisleistung unseres Belastungsdiagrammes übernehmen. Damit werden unsere Akkumulierwerke, die zur Deckung der Leistungsspitzen unentbehrlich sind, immer mehr an Bedeutung und Wert zunehmen. Ein steigender Einsatz von Grundlastwerken mit Kernreaktoren könnte daher sehr wohl einen Ansporn bilden, zukünftig auch die Erstellung von Spitzenkraftwerken zu wagen, deren Energiegestehungskosten auf Grund der heute geltenden Kriterien als untragbar erscheinen. Je billiger die Atomenergie wird, um so mehr wird dies zu verantworten sein.

Abschliessend verweise ich noch auf das für uns ganz besonders wichtige Problem, mit der Erzeugung von elektrischer Energie aus Atomkraftwerken die Deckung eines Teils unseres Wärmebedarfes zu verbinden. Da bei Verwendung von Kernbrennstoffen sowohl die Transport-, als auch die Lagerungskosten sehr gering sind, liegt in der weitgehenden Ausnützung der Atomenergie für Wärmezwecke ein ganz besonderer Anreiz. In der Verarbeitung der Rückstände der Kernspaltung und in der Herstellung von radioaktiven Isotopen liegen noch weitere unermessliche Möglichkeiten für die Befruchtung unserer Wirtschaft. Angesichts des Impulses, den die Atomkernspaltung unserm Lande bringen kann, ist es eine dringende Notwendigkeit, dass wir bald in die Lage versetzt werden, aus eigenen Erfahrungen zu schöpfen. Wir haben deshalb allen Grund, uns dafür einzusetzen, dass die dank der Initiative der Herren Dr. Walter Boveri und Professor Dr. Paul Scherrer getroffenen Vorbereitungen zum Bau eines schweizerischen Versuchsreaktors bald zum Ziele führen, damit wir nicht mehr darauf angewiesen sind, uns lediglich durch Publikationen ausländischer Fachgremien aufklären zu lassen. Wir werden auch nur dann zum Erfahrungsaustausch mit anderen Ländern zugelassen werden, wenn wir selbst einen wesentlichen Beitrag zur weitern Entwicklung beisteuern können. Setzen wir deshalb für einmal die Einheit der Tat über die Vielfalt unserer Ansichten; gerade im Hinblick auf die wirtschaftlichen Auswirkungen der Atomtechnik wollen wir auf den fahrenden Zug aufspringen, solange wir dazu noch in der Lage sind.

Adresse des Autors:

A. Winiger, Delegierter des Verwaltungsrates und Direktor der Elektro-Watt A.-G., Postfach Zürich 22.