Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 15

Artikel: Einiges über Atomkraftwerke in Kanada

Autor: Frymann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916502

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: 05.02.2026

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

Leute, sondern auch der Erwachsenen. Der technischen Ausbildung wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Das Land ist reich. 1960 wurden für ca. 760 Millionen Dollar Zeitungspapier, entsprechend ungefähr der Hälfte des Weltbedarfes, für je 200 bis 400 Millionen Dollar Getreide, Holz, Holzstoffe, Aluminium, Uranerz, Nickel, Kupfer, dazu in kleinern Mengen Eisenerz, synthetischer Kautschuk, Petroleum usw. exportiert. Die Petroleumerzeugung erreicht 30 Millionen m^3, wogegen die Kohlenförderung mit nur 10 Millionen t bescheiden ist.

Die Kanadier sind ein menschenfreundliches Volk; sie exportieren von ihrer Whiskyproduktion für 80 Millionen Dollar; sie selbst erfreuen sich am Kegelspiel, erzielen doch die kanadischen Kegelfabrikanten einen Umsatz von 50 Millionen Dollar jährlich. Importiert werden vorwiegend Maschinen, elektrische Apparate, Petroleum, Motoren, Fabrikausrüstungen, Automobil-Bestandteile, Autos, Flugzeuge und vieles anderes mehr. Der Totalexport erreichte im Jahre 1962 113,4, der Import 119 Milliarden Dollar; die Handelsbilanz ist also leicht negativ. In die Schweiz wurden für 26,4 Millionen Dollar Waren exportiert und von ihr für 24,3 Millionen Dollar bezogen. 30 % des kanadischen Exportes stammt aus dem Wald. Der Fischfang ist bedeutend nicht nur auf dem Meer, sondern auch in den grossen Binnengewässern.

Das riesige Gebiet bringt es mit sich, dass die Ausgaben für Strassenbau mit rund einer Milliarde Dollar pro Jahr oder 59 Dollar pro Person sehr gross sind. Dabei ist zu bedenken, dass — ausgenommen in der Nähe von Städten — ganz kleine, mit denen in der Schweiz nicht vergleichbare, Landpreise bezahlt werden müssen. Auf grosse Strecken in abgelegenen Gebieten dürften sie mit vielleicht 10 Rappen pro m^2 auskommen. Von der 7820 km langen transkanadischen Strasse waren 1961 4970 km mit einem Kostenaufwand von 674 Millionen Dollar vollendet. Eine vier- bis sechsspurige Autostrasse verbindet die Städte am St. Lorenz, Detroit (USA), Hamilton, Toronto, Ottawa, Montreal und Quebec untereinander; eine Abzweigung nach Buffalo stellt die Verbindung nach New York her.

Durch die grosse Wasserstrasse des St. Lorenz mit den daran gelegenen Häfen, insbesondere Montreal, Sept Iles, Hamilton, Toronto, Quebec, Trois Rivières, Port Alfred (am Saguenay), werden die Transportprobleme in diesem am dichtesten besiedelten Gebiet der Provinzen Quebec und Ontario sehr vorteilhaft gelöst. Dies umsomehr, als die Fortsetzung nach den grossen Seen eine ausserordentlich günstige Transportverbindung mit dem Haupthandelspartner, den USA, darstellt.

Die Industrialisierung wurde sehr stark von den USA aus gefördert; viele Unternehmen stehen unter amerikanischer Kontrolle, wie zum Beispiel die uns am meisten interessierenden Westinghouse Company of Canada und Canadian General Electric Company. Diese Unternehmen fabrizieren die grössten in Kanada gebrauchten Wasserturbinen von 200 000 PS. Bei der Canadian General Electric konnte man den Stator eines 300-MVA-Turbogenerators mit Wasserkühlung sehen. Auch Dampf- und Gasturbinen, meist kleinere, sah man in diesen Fabriken. Wenn auch Konstruktionen zum Teil noch von den Mutterhäusern stammen, so ist doch die industrielle Leistung bedeutend. Es sei dabei an die Pumpenturbinen im kanadischen Niagarawerk «Sir Adam Beck» erinnert. Mit berechtigtem Stolz wird auf die grössten Papiermaschinen der Welt hingewiesen, die in Kanada gebaut wurden und dort in Betrieb stehen.

Als zivilisierter Staat hat Kanada natürlich auch Schulden, und zwar 12,4 Milliarden Dollar = 648 Dollar pro Einwohner. Mit 1,54 Milliarden Dollar übersteigen die Aufwendungen für die nationale Verteidigung die Sozialausgaben mit 1,26 Milliarden nur wenig.

Die Elektrizitätswirtschaft stützt sich vorwiegend auf hydraulische Kraftwerke. Von den 1961 erzeugten 114 Milliarden kWh stammten 93 % aus hydraulischen Kraftwerken. Praktisch haben sämtliche Provinzen die Möglichkeit, Wasserkräfte auszubauen, allen voran jedoch Quebec und Britisch-Kolumbien. Die sehr industrialisierte Provinz Ontario muss sich mit weniger begnügen und glaubt bald alle ausbauwürdigen Wasserkräfte genutzt zu haben. Ich finde jedoch, dass der Begriff «ausbauwürdig» in Kanada um einiges enger aufgefasst wird als bei uns. Die Anlagen der Aluminium Company of Canada am Saguenay und am Peribonka River umfassen fünf Kraftwerke mit insgesamt 2,58 Millionen PS. Die kleinste unter ihnen hat eine Leistung von 270 000 PS, die grösste, Shipshaw, eine solche von 1,2 Millionen PS. Die Gefälle liegen zwischen 33,5 und 64 m. Der Lac St-Jean bildet ein natürliches Reservoir von vier Milliarden m^3, das durch zwei künstliche Seen von zusammen 7,3 Milliarden m^3 erweitert wurde. Das Einzugsgebiet ist mit 77 000 km^2 fast doppelt so gross wie die Schweiz. Die meisten Kraftwerke sind unmittelbar neben oder in den Stauwehren angeordnet, und das grösste, Shipshaw, weist eine Stollenlänge von nur etwa 2 km auf. Ähnlich günstige Verhältnisse liegen noch an zahlreichen anderen Orten vor. Das macht begreiflich, dass die Kanadier nicht gewohnt sind, kleine Einzugsgebiete von einigen km^2, bei denen wir noch Wasserfassungen erstellen, überhaupt in Betracht zu ziehen. Ich vermute sehr, dass unsere Wasserkräfte in Kanada höchstens zur Hälfte, wenn nicht weniger, als ausbauwürdig bezeichnet würden.

In Ontario ist der Ausbau thermischer Anlagen im Gang. Die Hydro Electric Power Commission of Ontario (Ontario Hydro) besitzt und baut neben 66 hydraulischen Anlagen mit mehr als 7 Millionen PS drei grosse thermische Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 1,8 Millionen kW. Aber auch in den Provinzen mit noch grossen Wasserkraftreserven, Quebec und Britisch-Kolumbien, ist der Bau thermischer Kraftwerke, wenn auch in kleinerem Masse, im Gange. Die Industrie Kanadas benötigt jährlich 35 Milliarden kWh, wovon sie die Hälfte selbst produziert.

In Ontario soll die importierte Kohle pro Kurztonne 8 Dollar kosten, das sind ca. Fr. 36.— pro Kilotonne. Als Brennstoffkosten für Energieerzeugung werden 1,2 Rp./kWh erwähnt. Erdöl kommt für die Elektrizitätserzeugung weniger in Frage, da die Ölfelder der Provinzen Alberta und Saskatchewan, die über 97 % des Öls produzieren, 3000 km westlich liegen. Die billigen Kohlenpreise machen es in Kanada schwerer als bei uns, mit Atomkraftwerken Konkurrenzpreise zu erzielen.

Die allgemeine Versorgung mit elektrischer Energie liegt heute vorwiegend in den Händen der Provinzen. Die den Abonnenten verrechneten Energiepreise sind bescheiden; die Haushaltungen bezahlten 1960 ca. 6,5, die Industrie ca. 3,2 Rp./kWh. Diese niedrigen Energiepreise weisen ebenfalls

darauf hin, dass die Möglichkeiten zur Anlage von grossen hydraulischen Werken ausserordentlich günstig sind. Um einen besseren Ausgleich zwischen Erzeugungs- und Konsumgebieten elektrischer Energie zu ermöglichen, wird nun auch der Höchstspannungsübertragung auf grössere Distanzen vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt.

Das Wachsen des Energiebedarfes ist bemerkenswert, nahm er doch in den Jahren 1951 bis 1960 in der Provinz Ontario von 17 500 auf 37 000 GWh um mehr als 100 % zu. Es wird darauf hingewiesen, dass Ontario bei weiterem Anwachsen des Energiebedarfes genötigt wäre, 1980 für 300 Millionen Dollar jährlich Kohle zu importieren. Das wird mit Rücksicht auf die heute schon ungünstige Handelsbilanz als nicht tragbar erachtet und ist mit ein Grund zur intensiven Entwicklung der Atomenergie vorwiegend in Ontario.

Drei staatliche Organisationen betreuen den Atomsektor in Kanada. Die Commission de contrôle de l'énergie atomique ist die oberste Überwachungs- und Koordinationsstelle; die Eldorado Mining and Refining Limited produziert Uranium und kauft als Agent der Regierung solches von privaten Minen; die Atomic Energy of Canada Limited (AECL) befasst sich mit der Grundlagenforschung, der Entwicklung der Reaktortechnik und der Produktion von Radio-Isotopen. Nach dem Uranrausch vor einigen Jahren hat nun die Eldorado Mining etwas Mühe, da der Bedarf nicht den erwarteten Umfang angenommen hat. Verschiedene wenig rentable Minen mussten geschlossen werden. Dagegen hat sich die AECL kräftig entwickelt; sie beschäftigt heute rund 2700 Personen, davon 2200 in ihrem Hauptstudienzentrum Chalk River nordwestlich von Ottawa. Schon 1947 wurde der NRX-Reaktor mit 42 MWth und dann 1947 der NRU mit 200 MWth erstellt. Beide Reaktoren und auch drei weitere kleinere werden nicht zur Elektrizitätserzeugung, sonder ausschliesslich zur Forschung und Entwicklung verwendet.

Als erster Reaktor der Elektrizitätserzeugung wurde in Rolphton der NPD (Nuclear Power Demonstration Reaktor) aufgestellt. Es ist ein schwerwassermoderierter und schwerwassergekühlter Druckrohr-Reaktor mit Uranium-Oxyd als Brennstoff. Seine elektrische Leistung beträgt gegen 20 MW. Die Erstellungskosten werden 128 Millionen Franken erreichen, bei einem Voranschlag von 124 Millionen Franken. Mit ihm wollte man die Zweckmässigkeit des gewählten Systems für die Elektrizitätserzeugung erproben. Von einer Wirtschaftlichkeit kann nicht gesprochen werden, betragen doch die Energiekosten bei etwa 12 % Jahreskosten und einer jährlichen Gebrauchsdauer von 7000 h 11 Rp./kWh. Ich will auf die Beschreibung dieses Reaktors verzichten, da er dem Candu, dem wir uns später zuwenden wollen, sehr ähnlich ist. Hingegen seien mir einige Worte zur Wahl des Reaktortyps gestattet.

Was für Gründe sprechen für die Wahl eines Natur-Uran-Reaktors? Kanada besitzt eigenes Uran, kann Natur-Uran verarbeiten, stellt die gesinterten Brennstoffelemente selbst her, verfügt jedoch nicht über eine Anreicherungsanlage. Angereichertes Uran müsste es aus USA beziehen; es wird auf das Fehlen einer Konkurrenz (heute noch) für die Lieferung dieses Brennstoffes hingewiesen. Viele Kanadier — aber nicht alle — rechnen noch mit einer Verbilligung des Natur-Urans um ungefähr 20 %. Natur-Uran schliesst die Verwendung von gewöhnlichem Wasser als Moderator aus. Die schmale Neutronenbasis verlangt das weniger absorbierende D_2O. Im Gegensatz zu angereichertem Uran stellt aber das ebenfalls teure Schwerwasser keinen Verbrauchsstoff dar, allfällige spätere Preiserhöhungen wiegen weniger schwer, umsomehr, als die Kanadier sich nun selbst um die Herstellung von Schwerwasser bemühen wollen. Für die Realisierung dieser Absicht liegen in Kanada günstige Voraussetzungen vor, weil man ja abseits billig ein Kraftwerk zur Erzeugung der notwendigen elektrischen Energie erstellen kann.

Uran, nennenswert angereichert, macht eine Wiederaufbereitung notwendig. Über eine Aufbereitungsanlage verfügen aber die Kanadier ebenfalls nicht und wären auch hier auf die USA angewiesen. Diese Abhängigkeit vom nächsten Nachbarn und stärksten Handelspartner wird nicht geschätzt. Man nimmt die durch das Natur-Uran bedingte kleinere Auswahl der Baumaterialien in Kauf. Es kommen in der Umgebung der Brennstoffelemente nur Materialien mit kleinem Einfangquerschnitt für thermische Neutronen in Frage, die aber bis jetzt den Forderungen nach höheren Drücken und höheren Temperaturen nicht voll gerecht werden.

Für die Wirtschaftlichkeit spielt der Zinssatz für das benötigte Kapital eine ganz wesentliche Rolle: Natur-Uran/Schwerwasser-Reaktoren verlangen grosse Investitionen, so dass niedrige Zinssätze Voraussetzung sind, wogegen bei Reaktoren mit angereichertem Uran und Naturwasser höhere Zinssätze eher tragbar sind; dafür ist der Brennstoff teurer.

Die Kanadier vernachlässigen neben dem gewählten System nicht die Weiterentwicklung anderer Typen. Sie bearbeiten neben einem 450-MW-el-Reaktor bisheriger Bauart einen schwerwassermoderierten organisch gekühlten Natur-Uran-Versuchsreaktor.

1954 begannen die Studien für einen Leistungsreaktor bescheidener Grösse mit einem Druckgefäss, Natur-Uran, Schwerwassermoderierung und -kühlung. 1957 zeigte sich dann die gute Verwendungsmöglichkeit von Zyrkonium-Legierungen (Zyrcaloy-2), so dass die Studien auf einen Druckrohr-Reaktor umgestellt wurden. Dieser Reaktor, NPD genannt und von der Canadian General Electric gebaut, wurde im Werk Rolphton bei Chalk River eingebaut. Bei unserem Besuch hatte er gerade den ersten Dauerbetrieb von sechs Wochen unter Vollast hinter sich. Wie bei den meisten neuen Konstruktionen, waren auch hier Kinderkrankheiten zu überwinden, die sich aber nicht auf das gewählte Prinzip als solches, sondern auf konventionelle Teile und die Lademaschine beschränkten. Als Energiequelle ist der NPD naturgemäss recht bescheiden. Er stellt aber insofern eine nützliche Anlage dar, als er zur Ausbildung von Personal für Atomkraftwerke herangezogen wird. Schon heute wird dort das Personal für den Candu in seine neuen Obliegenheiten eingeführt. Die Einführung des Personals in seine Aufgaben lässt sich an einem kleinen Reaktor zweckmässiger gestalten, weil zum Beispiel auch Störungen ohne allzuschweren Eingriff in das Produktionssystem simuliert werden können. Es steht auch genügend Zeit zur Verfügung, so dass das Personal nicht durch eine Schnellbleiche geschleust, sondern wirklich ausgebildet wird.

Ohne Betriebserfahrungen mit dem NPD abzuwarten — ja lange vor seiner Fertigstellung — wurden Pläne und Bau des Candu in Angriff genommen. Der Konstrukteur der beiden Anlagen, *Foster*, erachtet die während der Konstruk-

tion der NPD-Anlage gesammelten Kenntnisse als ausserordentlich wertvoll und nutzbringend verwendbar. Candu wurde im Zentrum Ontario der AECL entworfen. Dieses Zentrum ist in einem Barackenlager aus der Kriegszeit untergebracht. Man scheint hier das Parkinsonsche Gesetz beherzigt zu haben, indem man das Schwergewicht auf die zu schaffenden Anlagen und nicht auf ein repräsentatives Verwaltungsgebäude legt. Der konventionelle Teil wurde durch die Ontario Hydro entworfen und der Reaktor wird, wie der NPD, durch die Canadian General Electric gebaut. Mit diesem Reaktor soll die Wirtschaftlichkeit des gewählten Typs belegt werden. Er ist ein Prototyp. Die volle Erreichung der tiefen kanadischen Aequivalenzpreise konventionell erzeugter Energie wird allerdings nicht erwartet. In der Tat scheint der Gestehungspreis in einem modernen kanadischen Dampfkraftwerk mit 1,6 bis 1,8 Rp./kWh ausserordentlich bescheiden. Hingegen hofft man, mit einer weiteren, noch grösseren Atom-Anlage (400 MW) diese Preise doch noch zu erzielen.

Der Candu-Reaktor wird in Douglas Point am Lake Huron in der Nähe der Ortschaft Kincardine aufgestellt. Der Platz ist abgelegen; in einem Umkreis von 16 km leben 2180 Personen. Das erworbene Gelände erlaubt, eine zweite, sogar noch grössere Anlage unterzubringen. Teile, die beiden Anlagen dienen können — ich erwähne die Entnahme von Kühlwasser aus dem Huronsee — sind schon entsprechend gross gebaut.

Der Candu-Reaktor ist — wie sein Prototyp NPD — ein schwerwassermoderierter und -gekühlter Druckrohr-Reaktor. Der Brennstoff ist gesintertes Uranium-Dioxyd. Zylinderstücke von 15 mm Durchmesser und ca. 20 mm Länge sind in Zyrcaloy-2-Hülsen von 0,38 mm Wandstärke passend eingefüllt. Die einzelnen Röhrchen haben eine Länge von 50 cm. 19 solcher Röhrchen sind zu einem Brennstoffbündel von 17 kg zusammengefasst. Die Bündel sind wegen ihrer Kürze für das Laden und Entladen sowie für die Vorratshaltung sehr handlich. Ein solches Bündel erzeugt die gleiche Wärmemenge wie 200 t Kohle bei ihrer Verbrennung. Der Abbrand wird mit 9730 (± 10 %) MWd/t Uranium angegeben, das sind etwa 70 Millionen kWh elektrische Energie pro Tonne. Die 306 horizontal liegenden Druckrohre nehmen je zwölf dieser Brennstoffbündel auf. In der inneren Zone bleiben die Bündel ca. zwei Jahre, in der äusseren drei Jahre. Beidseits der Endschilder des Reaktors, durch die die Druckrohre aus Zyrcaloy-2 führen, ist je eine Lademaschine angeordnet. Bei dem Brennstoffwechsel, der auch im Betrieb erfolgen kann, werden in ein Druckrohr von einer Seite zwei neue Bündel eingeschoben und auf der Gegenseite mit der anderen Lademaschine zwei gebrauchte Bündel entnommen. Ein Brennstoffbündel wandert so in sechs Schritten durch das Druckrohr. Das benachbarte Rohr wird von der Gegenseite her beschickt, so dass der Brennstoff im Mittel gleichmässig abbrennt und nicht vor dem einen Schild alles neue Elemente und vor dem Gegenschild alles gebrauchte Elemente vorhanden sind. Jedes Rohr muss in vier bis sechs Monaten einmal beschickt werden.

Ein Computer errechnet aus der Flussverteilung und aus laufenden Messungen das Ersatzprogramm. Die beiden identischen Lademaschinen sind naturgemäss ziemlich kompliziert. Für einen Ladevorgang werden beide Maschinen benötigt, so dass sie nicht gegenseitig als Reserve dienen können.

Über die Deponierung der gebrauchten Bündel ist nichts Neues zu sagen. Die Elemente werden in Wasserbassins abgekühlt, die gemäss Prospekt die Bündel von zwei Reaktoren aus zwanzig Jahren Betrieb aufzunehmen vermögen. So abgekühlte Bündel werden voraussichtlich in einem betonierten Trog auf dem Umgelände definitiv abgelagert, möglicherweise unter Einbetonierung. Alle Rohre in der unmittelbaren Umgebung des Brennstoffes, also die Brennstoffhüllen, Druckrohre und Kalandriarohre, sind aus Zyrcaloy-2. Zum Vergleich sei erwähnt, dass der Lucens-Reaktor Magnesiumhüllen um den Brennstoff erhalten wird, die Druckrohre und Kalandriarohre dagegen aus einer Aluminium-Legierung bestehen werden.

Moderator und Kühlmittel sind schweres Wasser. Beide Kreisläufe sind durch CO_2 getrennt, das zwischen Kalandriarohr und Druckrohr zirkuliert. Der Moderator wird unter einem Druck von 1 kg/cm² im Kalandriagefäss gehalten.

Die Erwärmung des Moderators (140 t Schwerwasser D_2O) kann nicht vollständig unterbunden werden. Aus dem Moderator sind dauernd 40 MW über zwei Wärmeaustauscher abzuführen und sind, im Gegensatz zur Wärmeerzeugung im Moderator eines Gefässreaktors, verloren. Die Moderatortemperatur wird normal auf 54 °C gehalten.

Unter dem Kalandriagefäss und mit ihm über einen Siphon verbunden, befindet sich ein mit komprimiertem Helium gefüllter Ablauftank von 125 m³ Inhalt. Ventile, die durch die Überwachungsinstrumente gesteuert werden, erlauben das Ablassen des Moderators in diesen Tank, so dass die Kettenreaktion unterbrochen wird. Zum Wiedereinfüllen werden diese Ventile wieder geschlossen und der Moderator in das Kalandriagefäss zurückgepresst. Diese Anordnung ist sehr einfach und bietet eine grosse Sicherheit. Anlassen, Abstellen und, wie erwähnt insbesondere die Schnellabstellung werden durch die Änderung des Moderatorniveaus im Kalandria durchgeführt. Zur eigentlichen Regulierung stehen vier vertikale Absorberstäbe und acht vertikal gelagerte Stäbe mit angereichertem Uran zur Verfügung. Zur Normalregulierung dienen die Absorberstäbe. Die angereicherten Stäbe erleichtern das Hochfahren nach kurzen Abstellungen, indem sie durch ihre starke Neutronenemission die sich einstellende Xenon-Vergiftung kompensieren. Der Abbrand des Brennstoffes wird ausgeglichen durch eine Natrium-Sulfit-Lösung, die anfänglich — bei hoher Reaktivität — dem Moderator zugefügt und mit dem Abbrand der Stäbe — also mit sinkender Reaktivität — wieder entfernt wird. Das Moderatorniveau im Kalandria wird nur gesenkt, wenn die verlangte Reaktivitätsverminderung so gross ist, dass die Wirkung der eingefahrenen Absorberstäbe nicht genügt. Das Anlassen des kalten Reaktors nimmt 3 h in Anspruch. Bei einer Schnellabstellung durch Ablassen des Moderators wird die Reaktorleistung in 7 s auf 50 % und in weiteren 30 s auf 10 % reduziert.

Der Kalandriakessel weist eine Länge von 5 m und einen Durchmesser von 6 m auf. Die beiden Stahlschilder, die die Druckrohre halten, sind mit Wasser gekühlt und wiegen je 120 t. Interessant ist, dass der eigentliche Reaktor, der Ablasstank und die Lademaschinen in einem getrennten Raum aus schwerem, mit Wasser gekühltem Beton (spez. Gewicht 3,6) untergebracht sind. Der Raum ist ganz mit zusammengeschweissten, rostfreien Stahlplatten von 3,2 mm Dicke ausgekleidet. Er ist mit einer CO_2-Atmosphäre ge-

füllt, um die Bildung von Argon 41 und Salpetersäure, die in bestrahlter Luft entstehen, zu vermeiden.

Der Kühlkreislauf enthält 40 t D_2O. Der Druck wird normalerweise auf 91 kg/cm² einreguliert. Am Reaktor-Ausgang beträgt die D_2O-Temperatur 290, beim Rücklauf 270 °C. Stündlich werden 10 900 t D_2O umgewälzt, das heisst, der ganze Inhalt 270 mal. Von den zehn Umwälzpumpen dienen zwei der Reserve. Die Umwälzpumpen und die acht Wärmeaustauscher sind über dem Reaktor-Raum angeordnet. Bei einer Schnellabstellung, zum Beispiel, wenn die Stromzufuhr für die Pumpenmotoren ausfällt, wird die Restwärme durch natürlichen Umlauf durch die Wärmeaustauscher abgeführt. Die Wärmeaustauscher erzeugen Sattdampf von 250 °C und 40 kg/cm².

Das schwere Wasser kostet mindestens 225 Fr./kg. Beim NPD-Reaktor hofft man, die unvermeidlichen Verluste auf $2^1/_4$ kg/Tag reduzieren zu können, aber schon dieser bescheidene Verlust belastet den Betrieb mit 500 Fr./Tag oder mit ungefähr $^1/_{10}$ Rp./kWh. Gegenwärtig ist der Verlust noch grösser, und eine grössere Menge ging während der Versuchsperiode einmal beim Ladevorgang verloren. Durch sorgfältige Ausführung sämtlicher Schweissungen, Dichtungen usw. hofft man, auch beim Candu-Reaktor die D_2O-Verluste in erträglichen Grenzen zu halten. Wenn es gelingt, wirklich alle Leckstellen zu vermeiden, ist die Verwendung von Schwerwasser als Kühlmittel, abgesehen natürlich vom hohen Anschaffungspreis, nicht zu beanstanden.

Sämtliche Anlagen, die strahlen können, das heisst, der im besonderen Raum untergebrachte Reaktor und Ablauftank, dann die Pumpen und die Wärmeaustauscher, sind in einem runden Reaktor-Gebäude eingebaut, das auch alle Reinigungsanlagen für D_2O und CO_2, Helium usw. umfasst, kurz alles, was mit den Kreisläufen der Moderierung und der Kühlung in Verbindung steht. Der Beton-Rundbau hat 1,2 m starke Wände. Er ist oben mit einer doppelten Stahlkuppel abgeschlossen. Das Gebäude widersteht einem inneren Überdruck von 0,42 kg/cm². In der Kuppel befindet sich ein Behälter mit 183 m³ gewöhnlichem Wasser. Wenn nun der Druck zufolge Entweichung von Dampf ansteigt, lässt eine Automatik aus diesem Reservoir Wasser in das Reaktorgebäude sprühen; der Dampf wird kondensiert und damit der Druck in ungefährlichen Grenzen gehalten.

Die Turbine weist eine Hochdruckstufe 40—4 atü und drei parallel arbeitende Niederdruckstufen mit zwei Zwischenüberhitzern auf. Der Dampfwirkungsgrad beträgt 33, der Gesamtwirkungsgrad 29,1 %. Der Generator leistet 200 MW. Normalerweise wird die Energie für alle Hilfsbetriebe der Hauptmaschine entnommen. Die Sicherheit der lokalen Speiseleitung ist nicht sehr hoch einzusetzen. Deshalb stehen drei Dieselmotoren zu je 1000 PS zur Verfügung. Die Anlage ist mit einer doppelsträngigen 50 km langen 220-kV-Leitung mit dem Netz der Ontario Hydro verbunden. Jeder Schnellschluss ist natürlich ein unliebsames Vorkommnis, und ich glaube, ein sicherer Anschluss an das Verbundnetz, wenn möglich — namentlich bei grossen Entfernungen — über mehr als eine Leitung, ist sehr wichtig. Eine zuverlässige Speisung des Eigenbedarfs aus dem Netz ist neben den Notstromgruppen natürlich ebenfalls sehr erwünscht.

Der sechswöchige Dauerlauf der NPD-Anlage Rolphton und die Erfahrungen mit anderen schon in Betrieb stehenden Kraftwerken haben gezeigt, dass ein praktisch störungsfreier Betrieb über längere Zeit möglich ist und erwartet werden darf. Man hofft, den Candu-Reaktor Ende nächsten Jahres dem Versuchsbetrieb übergeben zu können.

Der Candu kostet mit 330 Millionen Fr. (ohne Brennstoffüllung, die weitere 25 Millionen Fr. ausmacht) nur zweieinhalb mal so viel wie der zehnmal schwächere NPD.

Neben der grossen Gebrauchsdauer ist, um den Energiepreis tief halten zu können, auch eine grosse Reaktorleistung erforderlich. Die Canadian General Electric legte ein Diagramm vor, das folgende Gestehungskosten nennt:

100 MW	3,6 Rp./kWh
200 MW	2,6 Rp./kWh
300 MW	2,4 Rp./kWh
500 MW	2,0 Rp./kWh

Die Schätzungen offizieller amerikanischer Stellen stimmen mit diesen Zahlen fast überein. Mit Ausnahme der kleineren Typen liegen ihre Angaben ein klein wenig höher.

Die AECL rechnet für den Candu mit einem Energiepreis von 6 Mills (= 2,4 Rappen) pro kWh bei einer jährlichen Betriebszeit von 7000 h, wobei die Spaltstoffkosten 0,4 Rp./kWh betragen. Der Candu wird von der Ontario Hydro betrieben. Diese bezahlt den Aequivalenzpreis der Energie aus einem modernen Dampfkraftwerk, der auch bescheiden mit 4 bis 4,4 Mills (= 1,6 bis 1,8 Rp.) angegeben wird.

Vom Energiepreis des Candu, der bei einer Amortisationsdauer von 20 Jahren, einem Zinssatz von $4^1/_2$ % und einer Gebrauchsdauer von 7000 h ungefähr 2,8 Rp. erreichen dürfte, entfallen ca. zwei Drittel auf die Kapitalkosten. Neben der Grösse des Reaktors, der grossen Gebrauchsdauer, sind die Kosten somit entscheidend durch den Zinssatz und die Amortisationsdauer bestimmt. Der als erreichbar angegebene Abbrand wird von Amerikanern als etwas zu optimistisch bewertet.

Dass Kanada trotz den noch vorhandenen reichen Wasserkräften und dem verhältnismässig billigen Brennstoff für konventionelle Wärmekraftwerke die Entwicklung der Atomenergiegewinnung vorantreibt, liegt im Wunsch zur Unabhängigkeit in der Elektrizitätsversorgung und im Verlangen, die Handelsbilanz durch Verminderung umfangreicher Brennstoffimporte zu verbessern. Um dieses Ziel zu erreichen, ist Kanada bereit, neben den Aufwendungen für neue Atomkraftwerke — nur für die Forschung und Entwicklung — jährlich 30...40 Millionen Dollar zu bezahlen, und das bei einer Einwohnerzahl, die nur $3^1/_2$mal grösser ist als diejenige der Schweiz.

Für die Schweiz gelten meines Erachtens generell die gleichen Gründe wie für Kanada, der Atomenergie alle Aufmerksamkeit zu schenken und den Bau entsprechender Anlagen ohne Verzögerung ins Auge zu fassen. Gegenüber Kanada haben wir allerdings den Nachteil, kein eigenes wirtschaftlich gewinnbares Uran zu besitzen. Uran ist aber ein Energieträger, von dem sich mit verhältnismässig geringen Kosten für Jahre ausreichende Vorräte anlegen lassen. Nicht so die konventionellen Brennstoffe: Öl käme für Lagerung schon gar nicht in Frage; für den Tankraum rechnet man mit Kosten um 100 Fr./m³. Die in der letzten Zeit viel diskutierten Pipelines verbessern die Versorgungsmöglichkeit, bieten aber nicht die Sicherheit, die einem Uranvorrat in der Schweiz eigen ist. In einem weniger von eigennützigen und nationalistischen Gefühlen regierten Europa

könnte man die Versorgungssicherheit durch Pipelines wesentlich höher einsetzen. Sie helfen über witterungsbedingte Stockungen auf dem Schiffahrts- oder Bahnweg, können aber unmöglich eine Garantie bei politischen Verwicklungen darstellen, die bei den labilen Verhältnissen im Osten zum mindesten nicht ausgeschlossen sind. Natürlich können wir nicht unsere ganze Energieversorgung für alle Fälle sichern. Ist das ein Grund, diese Sicherung dort zu unterlassen, wo sie möglich ist?

Unsere Gleichgültigkeit gegenüber der Wasserverunreinigung hat doch zu lange gedauert, wir sind reichlich spät der aufziehenden Gefahren inne geworden. Mit der Luft sind wir glücklicherweise noch nicht so weit. Messungen in Zürich haben ergeben, dass auch stark belastete Verkehrsknotenpunkte keine oder dann nur kurzzeitig auftretende unzulässige Luftverschmutzungen aufweisen. Aber ebensowenig lässt sich bestreiten, dass an solchen Zentren — nicht nur in Zürich — die Luft gerochen werden kann und mit der berühmten schweizerischen Alpenluft wirklich nichts mehr gemeinsam hat. Auch in verhältnismässig licht besiedelten Quartieren ist es durchaus keine Seltenheit, wenn während der Heizperiode die Abgase der Ölheizungen, wenn sie auch nicht gesundheitsschädlich sind, sich doch unangenehm bemerkbar machen. Es ist deshalb eine sehr begrüssenswerte Entwicklung, wenn in verschiedenen ausländischen Städten ein Teil der Energieproduktion in Heizkraftwerke verlegt wird. Solche zentralen Verbrennungsanstalten können technisch viel besser ausgerüstet werden als einzelne Hausheizungen, so dass die Verunreinigung der Luft bei gleicher Wärmeerzeugung sehr viel kleiner wird. Die Aufstellung von Fernheizkraftwerken in den grösseren Schweizer Städten muss mit der Zeit bestimmt geprüft werden. Ihrer Kleinheit wegen — sie müssen ja auf das mit wirtschaftlichen Mitteln mit Wärme zu versorgende Gebiet Rücksicht nehmen und haben deshalb heute meist nur einige zehn Megawatt elektrische Leistung — ist die Verwendung von Uran an Stelle konventioneller Brennstoffe vorläufig noch nicht denkbar. Ich hoffe aber sehr, dass in der Entwicklung der Atomtechnik auch der Kombination elektrische Energie/Heizung die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die für die Aufstellung in Städten nötige Sicherheit wird bestimmt mit der Zeit erreicht, und wenn uns an gesunden Lebensbedingungen etwas liegt, wird auch die Frage der Wirtschaftlichkeit solcher kleinerer Anlagen ihren Stachel verlieren.

Geteilter Meinung ist man über die Luftverunreinigung durch die Abgase von Raffinerien und Grosskraftwerken. An der geeigneten Stelle gebaut, sollte ein thermisches Kraftwerk kein untragbares Servitut auch für die nähere Umgebung darstellen. Die rauchenden Kamine alter konventioneller Dampfkraftwerke bilden keinen Maßstab für die Beurteilung moderner Verbrennungsanlagen. Ich bin kein Ölspezialist, aber ich kann mir vorstellen, dass der Schwefelausstoss von einem solchen Kraftwerk doch die ernsthafte Prüfung, wie sie bei uns durchgeführt wird, rechtfertigt. Die Qualität des zu liefernden Öls lässt sich wohl vertraglich festlegen, aber wir haben kaum wirksame Mittel in der Hand, sie tatsächlich durchzusetzen. Thermische Kraftwerke werden kein Bodio oder San Vittore werden, trotzdem muss jede vernünftige Möglichkeit zur Luftreinhaltung ebenfalls sorgfältig geprüft und entwickelt werden. Diese Arbeit ist der Schweiss der Atommänner wohl wert.

Die Industrie kann aber nur Reaktoren bauen, wenn die Elektrizitätswerke bereit sind, wirklich schon bald Atomkraftwerke als Energiequelle zu verwenden. Ich freue mich, dass sich die energieerzeugenden Elektrizitätswerke bereit erklärt haben, die Leistung, die sie aus einem Atomkraftwerk etwa 1970 mit grosser Gebrauchsdauer übernehmen können, zusammenzustellen. Dabei hoffe ich, dass — unter selbstverständlicher Wahrung eines realen Bodens — etwas von dem Geist mitspricht, der zu Anfang dieses Jahrhunderts hat hydraulische Kraftwerke entstehen lassen, deren Produktion nur teilweise verkauft war. Der unsicheren Wirtschaftlichkeit standen schwarze Prognosen über das technische Genügen dieser Anlagen zur Seite, und trotzdem!

Das von den Rheinisch-Westfälischen und Bayer-Werken zusammen bestellte Atomkraftwerk von 237 MW in Gundremmingen geniesst die Unterstützung nicht nur der Bundesrepublik, sondern auch verschiedener internationaler Organisationen, unter anderem der Euratom. Die Uranladung im Kostenbetrag von 60 Millionen DM wird von der Amerikanischen Atomenergiekommission vorläufig gestundet. Die Bundesrepublik übernimmt neben Bürgschaften für weitere Kredite und Steuererleichterungen eine weitgehende Garantie für die Energiepreise. Die Kosten dieser Anlage belaufen sich auf 290 Millionen DM ohne Brennstoffüllung. Neben diesem Kraftwerk «weil seine Leistung, jedenfalls in der Anlaufzeit noch nicht als gesichert angesehen werden kann» wird zugleich neben einer entstehenden Erdölraffinerie ein thermisches Kraftwerk errichtet. Der Parallelausbau von konventionellen Wärmekraftwerken neben Atomkraftwerken ist ein allgemein festzustellendes Vorgehen auch dort, wo noch hydraulische Anlagen zu wirtschaftlich tragbaren Bedingungen erstellt werden können, und deren Ausbau allerorts bevorzugt wird. Ebenso eindeutig kann man aber auch die Entwicklung der Atomtechnik und den Bau von Atomwerken neben dem Ausbau der herkömmlichen Wärmekraftwerke feststellen. Anfänglich glaubte man, die Atomkraft sehr bald wirtschaftlich nutzen zu können. Wir haben auch in der Schweiz solche sicher kompetente Stimmen gehört. Als sich dann aber die Probleme als etwas zahlreicher und schwieriger erwiesen, schlug der Stimmungsbarometer ins Gegenteil um, und heute scheint man eher mit der Mode zu gehen, wenn man eine noch sehr lange Entwicklungsdauer bis zur Erreichung des gewünschten Zieles verkündet. Ein gesunder, ruhiger Optimismus ist einem Pendeln zwischen Extremen vorzuziehen. Trotz der noch vorhandenen Widersprüchen und Fragezeichen kann ich den heutigen Pessimismus nicht teilen; vor allem kommen wir mit ihm nicht weiter.

Die Kanadier glauben, nahe an der Konkurrenzfähigkeit zu sein. Einem schwedischen Bericht konnte ich ähnliche Angaben entnehmen; auch sie sprechen von einem Energiepreis bei 2,6 Rp./kWh, immer bei 6000...7000 h Gebrauchsdauer und 200-MW-Anlagen. Beim Durchlesen des Geschäftsberichtes der Bayernwerke stellt man eher eine etwas grössere Zurückhaltung fest; möglich, dass dort ein Teil Zweckpessimismus mit Rücksicht auf die Finanzierung mitgesprochen hat. Wenn nichts unternommen wird, kann auch das betriebssichere wirtschaftliche Atomwerk nie entstehen. Ist es unsere Art, nur auf die Entwicklung im Ausland zu schielen und selbst nichts zu wagen? Mit Lucens

wurde doch gezeigt, dass dem nicht so ist, und es ist zu hoffen, dass der Weg zu einer Fortsetzung gefunden werden kann, um so eher als bei uns der höheren Brennstoffkosten und des billigeren Geldes wegen Konkurrenzpreise rascher erreicht werden sollten.

Mit dem starken Ausbau der Speicherwerke mit Gebrauchsdauer zwischen 1000 und 1800 h pro Winter haben wir schon seit längerer Zeit eine notwendige Voraussetzung für den Einsatz von Atomwerken in unserem Energieerzeugungssystem geschaffen und neuerdings durch vermehrte Pumpanlagen verbessert. Es ist zu hoffen, dass die laufende Prüfung in den einzelnen Elektrizitätswerken ergibt, dass für ein erstes Atomwerk von bis 250 MW mit einer Betriebsdauer von angenähert 7000 h gerechnet werden darf. Die Plätze, die uns für Atomkraftwerke zur Verfügung stehen, dürfen nicht mit weiteren Nur-Versuchsanlagen mit kleiner Leistung belegt werden. Bei dem Entwurf für ein solches Kraftwerk müssen wir uns aber auch hüten, einem Perfektionismus zu verfallen. Mögliche, nicht nachteilige Vereinfachungen sind eingehend zu prüfen. Mit Rücksicht auf die ungleiche Wasserdarbietung in unseren hydraulischen Kraftwerken sollte es möglich sein, für ein Atomkraftwerk eine zweimonatige Betriebspause zur Zeit der Hauptschneeschmelze, Juni/Juli, vorzusehen, während der die Brennstoffelemente zur Hauptsache ausgewechselt werden, was sich bei abgestelltem Reaktor bedeutend leichter und mit einer einfacheren Lademaschine bewerkstelligen lässt. Vielleicht genügt ungefähr in der Mitte der Betriebszeit eine kürzere Abstellung um Verschiebungen in kleinerem Umfang durchzuführen. Seit Jahren läuft in der Schweiz, abgesehen von kleineren abgelegenen Gemeindewerken, kaum ein Kraftwerk ausserhalb des parallel arbeitenden Gesamtbetriebes. So hübsch es wäre, mit einem Atomkraftwerk ein separates Netz, womöglich noch mit stark schwankender Belastung, zu beliefern, so sehe ich dazu doch keine Notwendigkeit. Für die Ausregulierung haben wir die Speicherwerke; also nutzen wir diesen Vorteil und verzichten wir auf zusätzliche Anforderungen an einen Reaktor, die vielleicht alle zehn Jahre einmal wünschbar wären!

Wir sind etwas im Rückstand. Der Wille, die schweizerische Reaktorentwicklung fortzusetzen, ist vorhanden, sie darf aber nicht dazu führen, dass wir in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Ausland stets um eine Reaktor-Generation nachhinken. Schon mit dem nächsten Reaktor muss ein Grossteil dieses Rückstandes aufgeholt werden. Das wird gewisse Opfer verlangen. Die Schweizer sollten diese zu bringen so gut imstande sein wie unsere Nachbarn, nicht zu reden von Staaten, die unvergleichlich viel mehr aufgewendet haben, wie England, Frankreich, Schweden, Amerika, Kanada und neuerdings Deutschland.

Die Energieversorgung muss gesichert sein; die Möglichkeiten des Ausbaues der Wasserkräfte neigen sich dem Ende entgegen. Energie, die durch hydraulische Anlagen und durch Atomkraftwerke mit schweizerischem Reaktor nicht geliefert werden kann, muss notwendigerweise in konventionellen thermischen Werken oder Atomwerken mit fremden Reaktoren erzeugt werden. Amerikanische und wahrscheinlich auch andere Firmen werden uns gerne komplette Atomkraftwerke anbieten. Ich hoffe aber doch, dass wir auf dem angefangenen Weg voranschreiten dürfen. Kleinmut heute würde bei späteren Generationen nicht verstanden. Die Aufgabe ist gross. Es ist aber nicht die erste Aufgabe, die in der Schweiz gemeistert wurde. Die Öffentlichkeit hilft und muss auch bei uns, wie überall, noch eine Zeitlang helfen. Nicht nur die Autobahnen, sondern auch die Schaffung schweizerischer Atomwerke ist für uns eine Aufgabe.

Adresse des Autors:
H. Frymann, Direktor des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich, Beatenplatz 2, Zürich 1.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Elektrische Antriebe für Raumfahrzeuge

629.19; 621.459

[Nach *Hasso G. Wichmann:* Elektrische Antriebe für Raumfahrzeuge, ETZ-A, 84(1963)8, S. 245...252]

Raumfahrzeugantriebe haben die Aufgabe, den Vortrieb von Raumfahrzeugen zu ermöglichen. Da die chemischen Antriebe, welche Luft benötigen, für die Raumfahrt nicht in Frage kommen, beschränkt sich die Auswahl auf chemische Raketen und elektrische Triebwerke. Die chemischen Raketen gestatten sehr grosse spezifische Strahlleistungen von $10^6 ... 10^7$ kW/kg zu erzeugen; der hohe Massenaufwand hat jedoch zur Folge, dass die Leistung nicht sehr lange aufrecht erhalten werden kann. Für den weiten Raumflug können daher elektrische Triebwerke viel besser die erforderlichen kleinen Schübe während langen Zeiten erzeugen.

Heute sind drei verschiedene Prinzipien dieser Triebwerke bekannt:

1. Elektrothermische Plasmaantriebe;
2. Elektrostatische Antriebe (Ionenantriebe);
3. Magneto-hydrodynamische Antriebe.

Bei den *elektrothermischen Plasmaantrieben* wird ein geeignetes Arbeitsgas im elektrischen Lichtbogen auf sehr hohe Temperaturen erhitzt und durch eine Düse expandiert. Die sehr hohen Austrittsgeschwindigkeiten von 25 000 m/s ergeben auch bei kleinem Massendurchsatz einen ausreichenden Schub und dank der leichten Regulierbarkeit kann das Triebwerk besonderen Aufga-

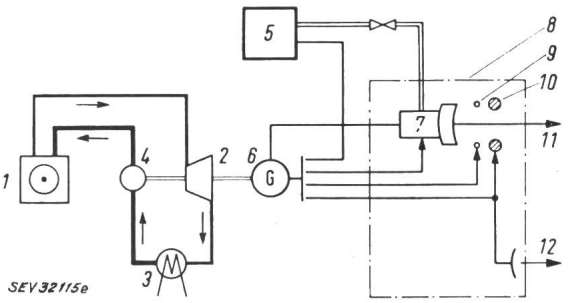

Fig. 1
Prinzip eines Ionentriebwerkes

1 Reaktor; *2* Turbine; *3* Kondensator und Radiator; *4* Pumpe; *5* Treibstofftank; *6* elektrischer Generator; *7* Ionenquelle; *8* Ionen-Beschleunigungskammer; *9* Fokussierungs-Elektrode; *10* Beschleunigungselektrode; *11* beschleunigte Ionen; *12* Elektronenemitter