Die Entwicklung der Kernindustrie: Rückblick auf die "Nuclex 66"

Autor(en): **Künzler, Max**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **85 (1967)**

Heft 3

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-69356

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Die Entwicklung der Kernindustrie: Rückblick auf die «Nuclex 66»

DK 061.3:621.039

Von **Max Künzler**, Masch.-Ing., Zürich

1. Das Ziel der «Nuclex 66»

Im vergangenen September wurde in den Hallen der Schweizer Mustermesse in Basel die erste internationale Fachmesse für die kerntechnische Industrie, «Nuclex 66» veranstaltet[1]). Zweck dieser Ausstellung und der zugleich abgehaltenen Fachtagungen war es, den Industrie- und Wirtschaftsorganisationen die Gelegenheit zu geben, ihre in intensiver Entwicklungsarbeit konstruierten und erprobten Erzeugnisse der Öffentlichkeit vorzustellen. Es sollte der Beweis erbracht werden, dass der Entwicklungskreis, welcher über den Wissenschaftler zum Versuchsingenieur geführt hat, nunmehr mit dem Übergang zum praktischen Betrieb und damit zum Dienst an der Allgemeinheit geschlossen werden konnte.

Die Kernindustrie sowie die durch sie ins Leben gerufene Komponenten-Zulieferbetriebe sind zu sich selbst erhaltenden, konkurrenzfähigen Wirtschaftsunternehmungen emporgewachsen und konnten in die Phase des Preis- und Qualitätswettbewerbes treten, eine Tatsache, die im Verlaufe der Ausstellung und auch der Fachtagungen deutlich zum Ausdruck kam. Es ist die Zeit gekommen, da ein Kernkraftwerk allmählich zum Gewohnten und Alltäglichen zu zählen ist; da die Atomenergie die Stellung eines nützlichen Partners der menschlichen Gesellschaft einnehmen kann und auch einnehmen muss. In der Bekanntgabe und in der Veranschaulichung dieser Tatsache bestand das Ziel der «Nuclex 66». Es darf mit Genugtuung festgestellt werden, dass dieses Ziel tatsächlich erreicht worden ist.

2. Der Mensch und die Atomenergie

Der Weg, welcher von der streng geheimgehaltenen Laboratoriumsforschung bis zur praktischen Anwendbarkeit der Kernspaltung zurückgelegt werden musste, war lang und nicht ohne Schwierigkeiten tiefgreifender Natur. Er forderte ausser dem allergrössten persönlichen Einsatz unwahrscheinlich grosse finanzielle Mittel, und es besteht kein Zweifel darüber, dass erst der Zweite Weltkrieg die Vereinigung der Kräfte und der Kapitalien in dem Masse herbeiführen konnte, welche für eine Bewältigung der grossen Aufgabe in nützlicher Frist erforderlich war.

Die Kernenergie offenbarte sich daher dem nicht direkt mit ihr beschäftigten Menschen als die erschreckendste Vernichtungsgewalt; plötzlich wurde ihm bewusst, dass es ein Mittel gibt, welchem die Möglichkeit innewohnt, dem gesamten irdischen Leben ein Ende zu setzen, und dass diese Gewalt vom Menschen selbst ausgelöst werden kann. Über zwanzig Jahre sind seit diesem ersten schockartigen Bewusstwerden verstrichen; immer noch werden Strahlungsauswirkungen pathologischer und genetischer Natur bekannt, die von den ersten Atombombenexplosionen herrühren. Im gleichen Atemzug wird aber dem Menschen nicht nur zur Kenntnis gebracht, dass solche Waffen weiter vervollkommnet und erprobt werden, sondern auch, dass ihre ungeheure Vernichtungskraft um mehrere Zehnerpotenzen angewachsen ist.

Dass die machtlos zuschauende Bevölkerung den Siegeszug der Nukleartechnik auf friedlichen Anwendungsgebieten mit Skepsis und Misstrauen verfolgt und sich dagegen wehrt, ist psychologisch voll und ganz verständlich. Zur noch heute weit verbreiteten Angst hat die Tatsache wesentlich beigetragen, dass die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten noch lange Zeit weitgehend geheimgehalten wurden, dass ein tieferes Verständnis nur einem engen Kreis von Fachleuten möglich ist, und dass die weitere Öffentlichkeit nicht weiss, ob und in welchem Masse sich die friedlichen Anwendungen dienenden Anlagen auf atomare Aufrüstung umstellen lassen. Auch ist die Angst sehr verbreitet, es könne sich in einem Kernkraftwerk ein atomexplosionsartiger Unfall ereignen. Offensichtlich hat man an massgebenden Stellen die dem Menschen angeborene Skepsis gegenüber dem Unbekannten und Unverstandenen unterschätzt und es versäumt, die Öffentlichkeit rechtzeitig und sachgemäss über Absichten, Möglichkeiten der Verwirklichung und erzielten Entwicklungsstand zu unterrichten[2]). Das Unbehagen wurde durch sensationelle Veröffentlichungen noch verschärft. So kam es dazu, dass die ersten Anlagen für die Nutzbarmachung der Kernspaltungsenergie unter heftiger Opposition zur Erstellung gelangten. Teilweise stammt diese Abneigung auch von der Angst vor der ungeheuren Macht der Technik überhaupt. Der Mensch fürchtet, Sklave seines eigenen Werkes zu werden.

3. Probleme der Sicherheit

Betrachtet man aber die kehrseitigen Auswirkungen dieser Angstreaktion, so ist man geneigt, sie in gewisser Beziehung als positiv zu bewerten; denn unter dem Druck der Öffentlichkeit entstanden derart umfangreiche Sicherheitsvorschriften und -massnahmen, wie sie bisher auf keinem anderen Gebiet bekannt waren. Diese waren durchaus berechtigt, denn ein schwerer Unfall im Anfangsstadium hätte möglicherweise die ganze Entwicklung zum Stillstand oder zumindest zu einer mehrjährigen Verzögerung gebracht; vielleicht hätte die Öffentlichkeit sogar einen Halt erzwungen.

Ob die Tatsache, dass nach zehnjährigem Betrieb von kommerziellen Kernkraftwerken noch kein nennenswerter Unfall gemeldet wurde, welcher bestehenden Sicherheitsvorschriften oder der diesen Anlagen anhaftenden Betriebssicherheit zuzuschreiben ist, sei dahingestellt; wichtig ist der Umstand, dass bisher kein solches Unglück bekannt wurde, was die Behauptung, Atomkraftwerke seien die sicherste Art der thermischen Energieerzeugung, zu rechtfertigen scheint.

Trotz umfangreichen Vorschriften und Massnahmen kann dennoch kein menschliches Werk absolut sicher erstellt und betrieben werden: Ein Missgeschick ist immer möglich. Selbstverständlich ist man bestrebt, grösste Sicherheit zu erzielen, soweit es nach gesundem Verstand, technischer Durchführbarkeit und wirtschaftlicher Tragbarkeit vertretbar ist. Im Falle der Kernkraftwerke musste diese Sicherheit derart verwirklicht werden, dass die gesamte Unfallwahrscheinlichkeit, verglichen mit den Risiken auf anderen Gebieten, wesentlich geringer ist. Ausser den konkreten Auswirkungen einer Katastrophe ist es unumgänglich, das subjektive Empfinden der Bevölkerung zu berücksichtigen. Diese würde bei einem Kernkraftwerk-Unfall ganz anders reagieren, als sie es zum Beispiel bei einem Wasserkraftwerks- oder Verkehrsunglück tut, welche wohl Mitleid erwecken, aber relativ kühl zur Kenntnis genommen und in den meisten Fällen nach kürzester Zeit vergessen werden.

Von verschiedenen Seiten war die Meinung zu hören, dass die Sicherheitsvorschriften in Umfang und Schärfe überzüchtet seien, und dass sie sich in vielen Fällen hemmend auswirken würden. Tatsächlich sind die Grundzüge dieser Vorschriften zu einer Zeit ausgearbeitet worden, da über das erste Kernkraftwerk noch keine Betriebserfahrungen vorlagen. Dass man sie gelegentlich als überholt ansieht, ist verständlich. Man sollte aber mit einer Überarbeitung erst dann beginnen, wenn die Gefahr des Einschleichens unbekannter Faktoren durch ausreichende Betriebserfahrung gebannt ist, eine Bedingung, die heute noch keineswegs erfüllt ist. Eine Überstürzung wäre in diesem Fall schon wegen den möglichen Auswirkungen fehl am Platze.

Es ist allerdings zuzugeben, dass das Einhalten aller Sicherheitsvorschriften ausserordentlich stark ins Gewicht fallende Investitions- und Betriebskosten verursacht. Tatsächlich muss ein sehr grosser Teil der Kosten für die Errichtung eines Kernkraftwerkes durch die Vorkehrungen für die Betriebssicherheit aufgewendet werden.

4. Warum Atomenergie?

Trotz der soeben genannten grossen Belastungen konnte sich die Atomenergie sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht durchsetzen. In der ganzen Geschichte der technischen Entwicklung ist kein Gebiet zu finden, welches in so kurzer Zeit derart grosse Fortschritte zu verzeichnen gehabt hätte, wie das der Nutzbarmachung der Atomenergie. Seit dem Jahre 1942, als es *Enrico Fermi* gelang, die

[1]) Vgl. Vorbericht in SBZ 1966, H. 39, S. 696–697.

[2]) Vgl. *W. Dubs:* Die gegenwärtigen Aussichten der Energiegewinnung durch Uranspaltung, SBZ 1948, H. 11, S. 145–146.

erste sich selbsterhaltende, kontrollierte Kettenreaktion zu verwirklichen, über das Jahr 1956, als das erste kommerzielle Atomkraftwerk in Calder Hall dem Betrieb übergeben wurde, entstand bis heute ein ausgedehnter Markt für diese Industrie, dessen Ausmass auch sehr optimistische Voraussagen sogar zu übertreffen vermochte.

Entscheidend für dieses Wachstum ist die Tatsache, dass es anhand bereits gesammelter Erfahrungen möglich wurde, die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen zu beweisen. Es wurden bisher allerdings noch keine zwei genau gleiche Anlagen in Betrieb genommen, so dass Kalkulationsergebnisse nur mit Vorbehalt auf neue Projekte übertragen werden können. Eine genaue Erfassung und Aufschlüsselung der Kapital- und Betriebskosten dürfte erst über eine während der ganzen Lebensdauer der Anlage geführte Statistik möglich sein. Ausserdem verschieben sich die Investitions- und die Unterhaltskosten beträchtlich mit der Natur und dem Standort der Werke. Immerhin beweisen die bisherigen Zahlen, dass es möglich ist, mittels Kernspaltung billige Energie zu produzieren[3]).

Ein weiterer Einfluss, der zweifellos diese Entwicklung entscheidend begünstigt hat, ist die Tatsache, dass die mit tragbaren Kosten ausbaufähigen Wasserkräfte in den meisten Industrieländern bereits ausgenutzt sind, so dass die Notwendigkeit entstand, nach anderen Energiequellen Umschau zu halten, wozu auch die schon seit längerer Zeit von vielen Experten vorausgesagte Erschöpfung der abbaubaren fossilen Brennstoffe entscheidend beigetragen hat.

Ferner wurden die ersten Investitionen auf diesem Gebiet massgebend von der Möglichkeit begünstigt, durch Neutronenbestrahlung des Isotops Uran 238 das Transuran Plutonium 239 für die Herstellung von Atom- und Wasserstoffsprengkörpern für militärische Zwecke erzeugen zu können. Zu diesem Zweck wurden bereits Kernspaltungs-Kettenreaktionen benützt, wobei aber die freiwerdende Wärmeenergie ungenutzt mit den Kühlmitteln abfloss[4]). Einige der heute rein kommerziell betriebenen Anlagen wurden ursprünglich zu Militärzwecken erstellt und erst später für die Erzeugung elektrischer Energie umgebaut.

5. Derzeitige Leistungsreaktoren auf der «Nuclex 66»

Da diese Fachmesse hauptsächlich eine kommerzielle Veranstaltung war, wurde das Schwergewicht auf das nachweisbar Betriebstüchtige und auf das gelegt, was sich bereits in Ausführung befindet. Die Hersteller bemühten sich, dem Besucher einen Einblick in den Aufbau und die Funktionsweise ihrer Reaktoren zu verschaffen und stellten dazu sorgfältig ausgeführte, masstabgetreue Modelle aus, deren Arbeitsprinzip auf übersichtliche Art gezeigt und erklärt wurde.

Werbung ist in der freien Wirtschaft unerlässlich. Dementsprechend haben die Aussteller ihre eigene Sache sorgfältig begründet. Das dabei Vorgebrachte schien sich bei nur oberflächlicher Betrachtung vielfach zu widersprechen. Die angeführten Argumente waren aber durchwegs sachlich und stichhaltig, woraus hervorgeht, dass die Wahl eines Reaktorsystems nur unter sorgfältiger Abwägung der standortbedingten, energiewirtschaftlichen und politischen Gesichtspunkte getroffen werden kann. Das Zusammentreffen aller ortsbedingten Gegebenheiten, worunter auch das Vorhandensein abbauwürdiger Spaltstoffvorkommen und Aufbereitungsanlagen für abgebrannte Brennelemente zu berücksichtigen ist, ergibt praktisch für jedes Land mit eigener Entwicklung ein anderes Reaktorsystem, das am geeignetsten erscheint. Hinzu kommen die aus möglicherweise vorhandenen Anlagen und Einrichtungen gesammelten Erfahrungen, welche für die weiteren Entwicklungen verwertet werden und unter Umständen richtungsweisend wirken können.

Demnach dürfte sich die in den USA konsequent durchgeführte Entwicklung der Leichtwasser-Reaktoren vom Typ PWR[5]) und BWR[6]) (Druck- bzw. Siedewasser-System), die mit angereichertem Uran arbeiten, auf die mit den wassergekühlten Plutoniumgewinnungsanlagen gesammelten Betriebserfahrungen gestützt haben. Da dort auch bereits Isotopentrennungsanlagen vorhanden waren und ausserdem über grosse Uranvorkommen verfügt werden kann, fällt die Bedingung, angereichertes Uran verwenden zu müssen, nicht so sehr ins Gewicht. Die Vorteile dieser beiden Typen, nämlich hohe Leistungsdichte im Kern und relativ kleine Abmessungen, sind für ihre Verbreitung entscheidend und bilden auch das Hauptargument ihrer Hersteller. Ausser in den USA werden diese beiden Typen auch in Europa, insbesondere in Deutschland gebaut. Ihr Anwendungsgebiet erstreckt sich sowohl auf ortsgebundene Betriebe wie auch auf den Schiffsantrieb.

Auch die englischen, gasgekühlten, graphitmoderierten Reaktoren der Calder Hall-Bauart[7]) stellen eine Weiterentwicklung der Plutoniumerzeugungsanlagen dar, welche dort ursprünglich aus Sicherheitsgründen Luftkühlung verwendeten, wobei die Wärme als Abfallprodukt ins Freie geführt wurde. Ein wichtiger Gesichtspunkt für die Übernahme und Weiterentwicklung dieses Systems bestand in der Möglichkeit, eine Kettenreaktion im natürlichen Uran auszulösen, womit man sich von den Bezugsquellen für angereicherten Brennstoff, welche im Lande nicht vorhanden waren, unabhängig machen konnte.

In Frankreich wurde ebenfalls Wert darauf gelegt, von ausländischen Brennstofflieferungen unabhängig zu sein. Man hat dort, wie in England, die Bauart mit Natururan, CO_2-Kühlung und Graphitmoderierung bevorzugt. In Kanada dagegen, wo die Entwicklung etwas später begann, stützte man sich auf die riesigen Vorkommen an Natururan im Lande und auf die ausgezeichneten Moderatoreigenschaften des schweren Wassers. Man strebte eine günstige Neutronenökonomie an und nahm dafür die relativ hohen Gestehungskosten des schweren Wassers in Kauf.

Die genannten vier Reaktortypen und deren Weiterentwicklungen behaupteten auf der «Nuclex 66», gestützt auf die mit ihnen erzielten guten Betriebserfahrungen, das Feld. Von den vier ist ohne Zweifel die kanadische Linie diejenige, welche noch die kleinste Erfahrungsquote aufweist; entsprechend traten denn auch die Bemühungen der Kanadier um das Zustandekommen eines grösseren Auftrages stark in den Vordergrund.

6. Systeme mit verbesserter Spaltstoffausnützung

Bekanntlich besteht Natururan nur zu 0,714 % aus dem spaltbaren Isotop U^{235}. Um mit ihm eine sich selbsterhaltende Kettenreaktion zu erreichen, bedarf es einerseits einer sehr beträchtlichen Brennstoffmenge, also grosser Reaktorkerne, und anderseits Massnahmen, um die unvermeidlichen Neutronenverluste möglichst weitgehend zu beschränken. Die für solche Systeme geeigneten Werkstoffe, insbesondere für die Brennstoffhüllen, erlauben jedoch nur mässige Temperaturen, weshalb der Wirkungsgrad des thermischen Kreislaufs verhältnismässig niedrig ist. Berücksichtigt man weiter, dass das U^{235} im Reaktor nicht vollständig ausgenützt werden kann, so wird die sehr geringe Ausbeute der Gesamtanlage deutlich.

Dieser Sachverhalt befriedigt um so weniger, als die abbauwürdigen Uranvorkommen begrenzt sind. Zwar gehen die diesbezüglichen Schätzungen noch weit auseinander. Auch die Auswirkungen des zu erwartenden Abbaues auf die Vorkommen werden eher subjektiv beurteilt. Ohne Zweifel beeinflussen die Fortschritte in der Abbau- und Gewinnungstechnik sowie die Gestaltung der Preise für Atombrennstoffe die weiteren Entwicklungen[8]). Das alles darf aber für die Tatsache nicht blind machen, dass beim zu erwartenden Weltbedarf an elektrischer Energie beste Ausnützung der vorhandenen Vorräte ein dringendes Gebot ist.

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Wirkungsgrad zu verbessern. Die erste besteht im Steigern der Temperatur im Reaktor, wodurch sich der thermische Kreislauf dem in neuzeitlichen Dampfkraftwerken annähern lässt. Die zweite Möglichkeit wird im schnellen Brutreaktor am besten verwirklicht und beruht auf der Umwandlung von nicht spaltbaren in spaltbare Materialien, zum Beispiel U^{238} in Pu^{239}, Th^{232} in U^{233}, usw. An der Verwirklichung dieses Verfahrens wird an verschiedenen Forschungsstellen gearbeitet, worüber später (Abschnitt 8) berichtet werden soll. Die Umwandlung kleiner Mengen nicht spaltbaren Materials in spaltbare Stoffe findet in jedem Reaktor statt. Werden gewisse Bedingungen erfüllt, so kann diese Umwandlung intensiviert werden, so dass der Anteil des am erschöpften Brennelement erzeugten neuen Spaltstoffes, gemessen an der ursprünglich im frischen Brennelement vorhandenen Menge (Konversionsrate), wächst. Es konnte bereits festgestellt werden, dass sich in Brennelementen, welche mehrmals verwendet und wiederaufbereitet wurden, sich ein kleiner Teil des ursprünglich vorhandenen U^{238} infolge intensiver und wiederholter Neutronenbestrahlung in Transurane mit immer höherem Atomgewicht umwandelt. Diese Transurane, deren Mengen

[3]) Vgl. Kostenvergleich von nuklearer und konventioneller Energieerzeugung, SBZ 1965, H. 24, S. 428–429.

[4]) Vgl. *W. R. Dubs:* Die physikalischen Grundlagen der Atomenergie-Anlagen, SBZ Bd. 128 (1946), H. 10, S. 123–127.

[5]) Beschreibung siehe SBZ 1960, H. 24, S. 381 u. ff.

[6]) Beschreibung siehe SBZ 1960, H. 25, S. 404 u. ff.

[7]) Vgl. *L. Rotherham:* Der englische Atomenergie-Reaktor in Calder Hall, SBZ 1956, H. 49, S. 754–761.

[8]) Vgl. *F. G. Houtermans:* Kernenergie-Reserven, SBZ 1956, H. 49, S. 761–766.

bisher in der Grössenordnung von einigen Milligrammen nachgewiesen werden konnten, sind teilweise spaltbar. Die Entstehung und das Verhalten solcher Brennstoffe wird derzeit erforscht. Sie erhalten deshalb grosse Bedeutung, weil bereits sehr kleine Mengen genügen können, um eine Spaltungs-Kettenreaktion aufrechtzuerhalten, was den Bau wesentlich kleinerer Energiequellen in Aussicht stellt. Gleichzeitig gehen die Bemühungen dahin, den Abbrand zu verbessern, das heisst die selbständige Kettenreaktion bei gleicher Anfangs-Anreicherung des Brennelementes bis auf die geringstmöglichen Spaltstoffkonzentrationen noch zu erhalten.

Ein vielversprechender Weg für die Verbesserung des Brennstoffabbrandes, worüber auch während der Studientagung über Betriebsprobleme bei Kernkraftwerken am 2. und 3. Dezember 1966 in Bern[9]) kurz berichtet wurde, besteht in der Zugabe eines Mittels, welches zu Beginn des Brennstoffzyklus einen grossen Neutronenabsorptionsquerschnitt aufweist, der sich bei fortschreitendem Abbrand verringert. Es werden dem Brennstoff neutronenabsorbierende Isotopen seltener Erden, zum Beispiel Samarium, beigegeben. Diese Stoffe wandeln sich bei Bestrahlung infolge Neutroneneinfangs in Isotope mit höherem Atomgewicht um, welche einen sehr geringen Absorptionsquerschnitt aufweisen. Man erhält somit einen über die Lebensdauer der Brennelemente abnehmenden parasitären Neutroneneinfang. Diese Methode gestattet eine selbsttätige Steuerung der zu Spaltungen beitragenden Neutronenausbeute im Reaktorkern. Die Drosselung der Spaltprozesse ist bei frischem, hochangereichertem Brennstoff voll wirksam. Bei zunehmendem Abbrand, also bei abnehmender Spaltstoffanreicherung, wird die Dichte der energieerzeugenden Spaltprozesse im Brennelement kleiner, die Drosselwirkung des Samariums lässt aber infolge Umwandlung gleichzeitig nach. Die praktische Anwendbarkeit und die genaue Wirkungsweise dieser «brennbaren Gifte» sind zur Zeit Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. An der «Nuclex 66» kamen u. a. Ergebnisse und Verwirklichungen solcher Verbesserungen zur Darstellung, die sich sowohl auf Hochtemperatur-Reaktoren wie auch auf solche mit verbessertem Abbrand bezogen.

In England stützte sich die Entwicklung auf die grossen Erfahrungen und die guten Ergebnisse der Gas-Graphit-Natururan-Reaktoren von Typ Calder Hall. Die ersten acht Anlagen dieses Typs produzierten bereits 24 Mrd. kWh elektrischer Energie. Der Lastfaktor lag in den letzten Jahren über 90%. Diese Entwicklung führte zum Advanced Gas Cooled Reactor (AGR). Bei diesem wird, wie im Calder Hall-Typ, mit CO_2 gekühlt und mit Graphit moderiert, jedoch mit wesentlich höheren Wärmeträger-Temperaturen (bis 700 °C) gearbeitet. Es kann dabei Frischdampf von 160 ata, 565 °C erzeugt und ein thermischer Wirkungsgrad des Dampfkreislaufs von über 40% erzielt werden. Wegen den hohen Kühlmitteltemperaturen verwendet man statt metallischem Uran das unempfindlichere Urandioxyd als Brennstoff und rostfreien Stahl als Hüllenwerkstoff. Da aber Stahl einen wesentlich höheren Neutronen-Absorptionsquerschnitt als die bisher verwendeten Magnesium-Legierungen vom Magnox-Typ aufweist, ist man gezwungen, mit angereichertem Uran zu arbeiten. Um die Verfügbarkeit zu erhöhen, wird der Brennstoffwechsel unter Last durchgeführt, wodurch man sich Jahres-Lastfaktoren von weit über 90% verspricht.

Auf Grund der mit Prototypen gesammelten Erfahrungen erwartet man bei den grossen AGR-Reaktoren wie zum Beispiel bei den Anlagen «Dungeness B» und «Hinkley Point B» (je 2×600 MWe) Energiegestehungskosten, die bei gleicher jährlicher Vollbetriebsstundenzahl wesentlich unter denen konventionell erzeugter Energie liegen. Diese Anlagen sollen im Jahre 1970 in Betrieb kommen. Obschon England mehr Elektrizität aus Kernanlagen erzeugt hat als die ganze übrige Welt zusammen, wurden bisher nur zwei Reaktoren britischer Konstruktion im Ausland aufgestellt («Latina» in Italien und «Tokai Mura» in Japan). Auf der «Nuclex 66» war aber deutlich erkennbar, dass man sich bemüht, mit den fortgeschrittenen Anlagen zunehmend ins Exportgeschäft zu kommen.

Im Zuge der Weiterentwicklung bestehen bereits Projekte, welche im Aufbau dem AGR-Reaktor ähnlich sind, jedoch noch höhere Kühlmitteltemperaturen bei ebenso günstigen Konversionsraten ermöglichen sollen. Diese High Temperature Gas Cooled Reactors (HTGR) sollen Wärmeträgertemperaturen bis rund 800 °C erreichen und somit möglicherweise den vorteilhaften Einsatz von Gasturbinen im geschlossenen Kreislauf gestatten. Bei diesen Temperaturen ergeben sich interessante Werkstoffprobleme, deren Lösung mittels verschiedenen Versuchs- und Prototypanordnungen gesucht wird. Da weiter das hocherhitzte CO_2 unter hohem Druck zur Reaktion mit dem Graphit neigt, wurde Helium als Kühlmittel vorgesehen. Es ist ferner beabsichtigt, als Brennstoff eine Mischung aus Uran- und Thoriumdikarbid zu verwenden, das mit U^{235} angereichert und in Graphit eingebettet ist. Man erwartet damit ausser guten Konversionsraten im Zyklus U^{238} — Pu^{239} auch die Erzeugung des Spaltstoffes U^{233} aus Th^{232}. Diese Möglichkeiten verleihen dieser Bauart grosse Bedeutung, zumal das erreichbare Umwandlungsverhältnis eine gute Ausnützung des Brennstoffes und die hohen Temperaturen einen guten thermischen Wirkungsgrad in Aussicht stellen. HTGR-Reaktoren werden zur Zeit nicht nur in Europa («Dragon») sondern auch in Amerika («Peach Bottom») erstellt und sollen wertvolle Erkenntnisse über Brennstoffzyklen sowie über die Einwirkungen der hohen Temperaturen und des dichten Neutronenflusses auf die Brennelemente und auf die verschiedenen Werkstoffe des Kernes liefern. Ausser mit der bewährten Graphit-Moderierung sollen auch Versuche mit Brennelementen durchgeführt werden, die mit Berylliumoxyd moderiert sind und mit denen noch bessere Konversionsraten erreicht werden können.

Zur Gruppe der gasgekühlten Hochtemperaturanlagen gehört auch der deutsche Prototyp des Kugelhaufenreaktors der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR). Es handelt sich um eine Anlage von 15 MWe, in deren Kern eine Schüttung kugelförmiger Brennelemente durch das Kühlmittel Helium in kontinuierlichem Umlauf gehalten wird. Die Spaltstoffelemente sind zur Moderierung der Neutronenenergie mit Graphit umhüllt. Die dem Helium mitgeteilte Wärme erzeugt in einem Wärmeaustauscher Heissdampf von rd. 500 °C. Zur Leistungsregelung werden dem Kern die dafür nötigen Brennelemente zugeführt oder entzogen. Wegen des relativ einfachen Aufbaues und der zu erwartenden hohen Konversionsraten sowohl im Zyklus U^{238} — Pu^{239} wie auch im Zyklus Th^{232} — U^{233} dürfte diese Bauart sehr aussichtsreich sein.

Da auch die Leicht- und Schwerwasser-Reaktoren neuen Spaltstoff in beträchtlichen Mengen erzeugen, lohnt es sich, sie weiter zu vervollkommnen. Diese Absicht wurde besonders in den amerikanischen Ständen deutlich. Ausser der Erzeugung von Plutonium sind die Hauptziele dieser Arbeiten das Verbessern der spezifischen Leistung und des Brennstoffabbrandes, sowie die Verringerung der Anlagekosten. Bei den Druckwasserreaktoren rechnet man bereits mit einem Abbrand von rund 17 000 MWd/t[10]) und hofft, diesen Wert bis 1970 auf 21 000 bis 25 000 MWd/t steigern zu können. Für die Erzielung hoher Abbrände bedient man sich verschiedener Massnahmen, wie der Unterteilung des Kerns in Zonen unterschiedlicher Anreicherung, und periodischer Verlegung der Brennelemente von den Randzonen ins Innere, wobei die neuen Elemente aussen eingesetzt werden; sorgfältige Anwendung des chemischen Trimmens sowie die Beimischung brennbarer Gifte usw. Ferner wird untersucht, ob Brennelementumhüllungen aus Zirkaloy neben ihren guten neutronenwirtschaftlichen Eigenschaften auch in mechanischer Hinsicht geeignet sind. Teilweise ist man schon auf dieses Hüllenmaterial übergegangen. Auf dem Sektor der Siedewasser-Reaktoren sind die gleichen Bestrebungen im Gange. Man ist hier von der Stahlumhüllung des Brennstoffes wegen den starken Korrosionserscheinungen abgekommen und verwendet nunmehr Zirkaloy. Um einen besseren Abbrand zu erreichen, muss bei diesem System mit höher angereichertem Uran gearbeitet werden. Der Übergang zum Einkreissystem sowie die kompakte Bauweise mit Sicherheitsbehälter aus vorgespanntem Beton ermöglichen beträchtliche Einsparungen an Anlagekosten.

Auf dem kanadischen Stand war man zuversichtlich, dass der neue «CANDU»-Schwerwasser-Reaktor durch seine günstige Neutronenökonomie, gute Brennstoffausnutzung und hohen Konversionsraten die aufwendigere Bauweise und den hohen Preis des Schwerwassers auszugleichen vermag. In der neuen Ausführung wurde der Kern nunmehr vertikal angeordnet; eine unterhalb desselben angebrachte Wechselmaschine besorgt den Austausch der Brennelemente. Eine gemischte Bauart, bei welcher Schwerwasser als Moderator und leichtes Wasser als Kühlmittel verwendet werden, ist der englische Steam Generating Heavy Water Reactor (SGHWR). Das Kühlwasser fliesst in Druckrohren, umspült die darin angeordneten Brennelemente aus leicht angereichertem Urandioxyd und kommt zum

[9]) Ankündigung und Programm siehe SBZ 1966, H. 38, S. 680. In diesem Aufsatz werden wir nur einige Angaben verwerten, die im Verlaufe dieser Tagung zu vernehmen waren. Die vollständige Veröffentlichung der Referate wird in der Zeitschrift «Neue Technik» erfolgen.

[10]) Megawatt-Tage pro Tonne Brennstoff.

Sieden. Der dabei entstehende Sattdampf wird vom Wasser getrennt und treibt im direkten Kreis die Turbinen an. Es wurde ein nuklearer Überhitzungskreis zu Versuchszwecken vorgesehen. Eine Prototyp-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 100 MW befindet sich in Winfrith im Bau. Neben geringen Kapital- und Betriebskosten verspricht man sich Vorteile aus der Möglichkeit, durch Erhöhung der Anzahl Druckrohre einen grossen Leistungsbereich ohne nennenswerte technische Schwierigkeiten bestreichen zu können.

Wenn man die Vielfalt der Systeme und Bauarten der Reaktoren – die an dieser Stelle gar nicht alle aufgeführt werden können – sowie die riesigen Aufwendungen für die nuklearen und konventionellen Anlagen solcher Kraftwerke betrachtet und bedenkt, dass es sich bei der Mehrzahl der Ausführungen um Einzelanfertigungen handelt, die speziell konstruiert, gebaut und erprobt werden müssen, so gewinnt die Forderung nach zunehmender Vereinheitlichung vieler Elemente an Gewicht. Nicht nur wegen der möglichen Rationalisierung der Fertigung und der somit erzielbaren Verbilligung, sondern auch weil dadurch ein wirkungsvollerer Erfahrungsaustausch stattfinden könnte, wäre eine weitgehende Normalisierung anzustreben.

7. Nichtnukleare Anlagenteile

Die Befriedigung des weltweiten Energiemarktes mit nuklearem Brennstoff warf mannigfache Probleme auf, die mit der Beherrschung und Kontrolle des Reaktionsablaufes sowie mit dessen Steuerung und Regelung zusammenhängen. Bei der Betrachtung der auf diesem Gebiet erzielten Fortschritte vergisst man allzuleicht die ungeheuren Anstrengungen der Hersteller konventioneller Bauteile, welche ihre Erzeugnisse unter vollkommen neuen Bedingungen konstruieren und ausführen mussten. Diese nicht atomaren Komponenten waren an neue, bisher unbekannte oder zumindest unberücksichtigte Forderungen anzupassen. Wer die Statistiken über die Ausfallursachen der ersten Kernkraftwerke betrachtet, wird feststellen, dass weit mehr als die Hälfte davon durch die nichtnuklearen Bauteile entstanden sind; er mag daraus ermessen, welch vielfältige und schwierige Aufgabe die Komponentenindustrie zu meistern hatte.

Die Schwierigkeiten beginnen bereits bei der Wahl der Werkstoffe. Lange Forschungsarbeiten waren nötig, um dabei Bedingungen zu befriedigen wie Strahlungsbeständigkeit in den verschiedensten Umgebungen, hoher oder niedriger Neutronen-Absorptionsquerschnitt, Abschirmungstauglichkeit, geringes Radioaktivwerden infolge Bestrahlung (Kontamination) usw., und um der Industrie geeignete Baustoffe zur Verfügung stellen zu können.

Viele Vorgänge müssen infolge der Strahlungsgefährdung des Personals ferngesteuert oder vollautomatisch abgewickelt werden; Undichtheiten, welche in herkömmlichen Anlagen noch durchaus zulässig wären, sind im Falle der Kernreaktor-Kreisläufe vollkommen zu vermeiden. Um Kontaminationsgefahren auf allen Sektoren entgegentreten zu können, wurden für deren Feststellung zahlreiche neue Prüf- und Kontrollmethoden entwickelt. Bei der Fertigung sah man sich gezwungen, die herkömmlichen Genauigkeitsmasstäbe zu überprüfen, oft auch zu verfeinern sowie neue Verfahren anzuwenden, um die in vielen Fällen sehr eingeengten Toleranzen einhalten zu können.

Anlageteile, welche sich in unmittelbarer Nähe des Reaktorkernes befinden oder mit radioaktiven Substanzen in Berührung kommen, müssen wartungsfrei betrieben werden. Vielfach sind solche Geräte nach der Inbetriebnahme des Reaktors für Unterhalts- und Reparaturarbeiten überhaupt nicht mehr zugänglich, sodass ein Ausfall schwerwiegende Folgen haben würde[11]), [12]). Eigentlich kann man beim grössten Teil dieses Zubehörs nur das Funktionsprinzip als konventionell bezeichnen.

Den Anstrengungen der Komponentenindustrie ist es grossenteils zu verdanken, dass die Nuklearenergie in kurzer Zeit zum praktischen Einsatz kommen konnte. Vom dabei erzielten Ergebnis war auf der «Nuclex 66» viel zu sehen; der fachkundige Besucher konnte an den zahlreichen kleinen und grossen Gegenständen erkennen, dass die jahrelange Entwicklung nun auch auf dem Komponentensektor trotz der schwierigen Aufgabe zu wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit geführt hat.

Ein interessantes Beispiel einer Konstruktion, die nach der Inbetriebnahme der Anlage nicht mehr zugänglich ist, stellt der Einrohr-Zwangdurchlauf-Dampferzeuger von Gebrüder Sulzer für das französische Projekt EDF-4 dar, der die beachtliche Leistung von mehr als 2000 t/h Dampf bei 37 atü und 390 °C aufweist, aus welchem ein Original-Teilstück gezeigt wurde[13]). Die Notwendigkeit, neue Probleme auf neue Art zu lösen, wird durch die von vielen Firmen ausgestellten Manipulatoren für die Handhabung von radioaktiven Substanzen in abgeschirmten Räumen eindrucksvoll ersichtlich. Solche Geräte gestatten die Durchführung aller Bewegungen der menschlichen Arme und Hände durch dicke Abschirmungen hindurch. Sie sind derart vervollkommnet worden, dass auch sehr heikle Arbeiten wie das Zumessen, Wiegen, Abfüllen von gefährlichen Mitteln usw. mit ihnen verrichtet werden können.

Auf dem Gebiet des Kleinzubehörs wurden z. B. Rohrabdichtungen und -kupplungen gezeigt, welche eigens für die verschärften Bedingungen der Kerntechnik konstruiert wurden und wegen der Strahlungsgefährdung absolute Dichtheit und Beständigkeit gegen Korrosionsangriffe aufweisen.

Ein Stromausfall stellt im Kernkraftwerk mehr als auf anderen Gebieten eine grosse Gefahrenquelle dar. Eine Unterbrechung in der Kühlmittelumwälzung könnte z. B. zum Schmelzen von Brennelementen führen, was schwerwiegende Folgen hätte. Man muss also die ununterbrochene Betriebsfähigkeit der wichtigsten Elemente sicherstellen. Zu diesem Zweck werden Notstromaggregate gebaut, welche in der Lage sind, 0,5 Sekunden nach einem Netzausfall die Stromversorgung vollautomatisch zu übernehmen. Es handelt sich um dieselelektrische Gruppen, bei denen ein Schwungrad dauernd auf Betriebsdrehzahl gehalten wird und dessen gespeicherte Energie ausreicht, um den Dieselmotor anzulassen und gleichzeitig in der dafür benötigten Zeit den belasteten Generator anzutreiben.

Bemerkenswert war eine Maschine für die heliumdichte Umhüllung von radioaktivem Material, welche auf dem Prinzip der kurzzeitigen Impulse starker magnetischer Felder (Magnetschock) arbeitet und auch ferngesteuert werden kann. Das Gebiet der elektronischen Messtechnik kam ausführlich zur Darstellung. Die Notwendigkeit, starke und stärkste Strahlungen, sowie solche mit sehr geringer Intensität genau und zuverlässig zu messen, stellte diese Industrie vor interessante Probleme. Die Ergebnisse der durchgeführten Entwicklungsarbeiten konnten anhand der ausgestellten Geräte betrachtet werden. Sie umfassten ein weites Feld, das vom grossen Mehrkanal-Szintillator für die Messung von β- und γ-Strahlungen mit automatischem Probenwechsler bis zum kleinen, tragbaren Dosimeter für die Personalüberwachung reicht.

Eine konstruktive Aufgabe, bei welcher der heutige Stand der Maschinenbautechnik voll zur Entfaltung kommt, stellte sich bei der Entwicklung der Brennstoff-Wechselmaschine. Dabei müssen die Auswechslungsvorgänge ferngesteuert und weitgehend automatisch vorgenommen werden, und zwar in einem Medium, welches in hohem Grad radioaktiv und vielfach korrosiv ist. Zudem darf die Funktion des Reaktors, der während des Wechsels unter Last arbeitet, nicht gestört werden. Da die Arbeiten in unmittelbarer Berührung mit dem Kern durchgeführt werden, muss die Maschine voll abgeschirmt sein, wofür Blei in grossem Umfang angewandt wird. Eine der im Modell ausgestellten Brennelement-Wechselanlagen wiegt 630 t. Sie ruht fast reibungslos auf hydrostatischen Drucklagern und ist dadurch in der Lage, die Brennelement-Verschlusstellen mit höchster Präzision anzusteuern, ferner die gasdichte Verbindung mit dem Kern herzustellen, einen Druck- und Temperaturausgleich mit dem selben Medium wie im Reaktorinnern zu erstellen, und das abgebrannte Element herauszunehmen und ein neues einzuführen.

Diese Aufzählung, die sich noch wesentlich erweitern liesse, soll einen Einblick geben in die Vielfalt der Probleme, welche von der Kernindustrie aufgeworfen wurden, ebenso in die Kühnheit vieler Lösungen, wobei zu bedenken ist, dass die Komponenten in gleich kurzer Zeit entstanden sind wie die Nuklearindustrie selbst.

8. Schnelle Brutreaktoren

Bei den bisher genannten Reaktoren handelt es sich durchwegs um solche, die entweder bereits Betriebserfahrungen geliefert haben oder auf betriebsfähige Prototypen aufbauen und sich kurz vor der Bewährungsprobe im kommerziellen Einsatz befinden. Es sind thermische Reaktoren, bei denen die energiereichen Spaltungsneutronen auf die der Umgebungstemperatur entsprechende Gleichgewichtsgeschwindigkeit abgebremst werden. Diese thermischen Neutronen

[11]) Vgl. *K. Rütschi:* Stopfbüchslose Pumpen für Kernkraftwerke, SBZ 1966, H. 36, S. 629–631.

[12]) Vgl. *R. A. Strub:* Turbomaschinen für Kernenergie-Anlagen, SBZ 1958, H. 44, S. 649–655.

[13]) Siehe auch: Schweizerische Ausrüstungen für ausländische Atomkraftwerke, SBZ 1966, H. 29, S. 536.

werden besonders leicht von den U^{235}-Kernen eingefangen, eine Eigenschaft, welche die erforderliche Neutronenflussdichte begrenzt.

Schnelle Brutreaktoren dagegen sind noch im Entwicklungsstadium und werden erst etwa zwischen 1975 und 1985 Marktreife erreichen[14]). Bei diesen Reaktorsystemen benutzt man die schnellen, nicht abgebremsten Neutronen für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion. Da die U^{235}-Kerne dafür einen wesentlich kleineren Einfangsquerschnitt aufweisen, ist es erforderlich, die Dichte des Neutronenflusses im Kern entsprechend zu erhöhen. Die grosse Zahl der von den Spaltstoffkernen nicht eingefangenen Neutronen werden vom U^{238}, welches den «Brutmantel» bildet, teilweise absorbiert. Dadurch wandelt sich das Uran 238 über einige Zwischenstufen zum Teil in den Spaltstoff Plutonium 239 um. Auf diese Art kann mehr Brennstoff erzeugt werden, als verbraucht wird.

Mit den bereits in Betrieb und im Bau befindlichen schnellen Brutreaktoren werden in erster Linie die umfangreichen Probleme in Zusammenhang mit der sehr grossen Leistungsdichte untersucht. Das Freiwerden grosser Energiemengen auf engstem Raum stellt besondere Anforderungen an die Brennelemente und vor allem an die Wärmeträger. Bisher wurde hierfür hauptsächlich flüssiges Natrium vorgesehen. Es weist ausgezeichnete thermische Eigenschaften auf; die für dessen Umwälzung erforderlichen Pumpenleistungen sind klein und die Preise günstig. Vertreter dieser Bauart sind die Prototypen «Rapsodie» (Frankreich) und «Dounreay» (Grossbritannien). Der letztgenannte ist der erste Schnellbrüter, der Energie an das öffentliche Verbundnetz abgibt (60 MWe).

Die bereits überwundenen Schwierigkeiten dieses Systems waren mannigfaltig; noch immer bleibt aber sehr viel zu tun übrig, und es ist weiterhin mit langen Entwicklungsarbeiten zu rechnen. Natrium oxydiert leicht, so dass man dazu übergegangen ist, eine Argon-Atmosphäre über dem flüssigen Metall anzuordnen. Ferner wird es durch Bestrahlung stark radioaktiv, was eine absolute Dichtheit des Kreislaufs bedingt. Um die dadurch entstandenen Gefahren herabzusetzen, wurde beim Reaktor Rapsodie zwischen dem Primärkreis und dem Dampferzeuger ein zweiter Natriumkreis gelegt.

Auch in bezug auf das Verhalten der Brennelemente bei hohem Abbrand sind noch Schwierigkeiten zu überwinden. Man ist vom metallischen Brennstoff weggekommen und verwendet nun keramische Mischungen, womit wesentlich höhere Abbrände ohne grosse Verformungen der Brennelemente erreicht werden können.

In allen Ländern mit eigener Entwicklung wird an diesen Problemen intensiv gearbeitet. Gewisse Kreise vertreten die Meinung, dass Gaskühlung auch bei den schnellen Brütern erhebliche Vorteile bringen könnte, nämlich geringere Neutronenabsorption, verminderte Radioaktivitätsgefahr, keine plötzlichen Reaktivitätsänderungen infolge Gasentwicklung (heisse Stellen infolge Gasbildung im Natrium-Kreislauf) usw.

Die Entwicklung des schnellen Brutreaktors ist auf Grund der damit erzielbaren hohen Konversionsraten von rund 1,5 vielversprechend, und seine technische Durchführbarkeit kann kaum noch in Frage gestellt werden. Obwohl nach diesen Reaktoren ein dringender Bedarf besteht, müssen sie gegenüber den erprobten und den in nächster Zukunft betriebsfähigen Systemen auch wirtschaftlich konkurrenzfähig werden, um sich durchsetzen zu können, wozu, wie bereits bemerkt, noch einige Jahrzehnte erforderlich sein werden.

9. Kernfusion – Energie der Zukunft?

Die Möglichkeit der Energiegewinnung aus Wärme, die bei der *Fusion* zweier leichter Atomkerne frei wird, eröffnet neue, vielversprechende Aussichten. Zwar befindet sich die Forschung noch durchaus in den Anfängen, weshalb an der «Nuclex 66» von diesem Gebiet nichts zu sehen war. Bei der schnellen Entwicklung der Technik ist es aber doch angezeigt, die Möglichkeiten zu bedenken, mit denen zu rechnen sein wird.

Über das Verfahren selbst wurde bereits früher kurz berichtet[15]). Was ihm besondere Bedeutung erteilt, ist der Umstand, dass die Ausgangsstoffe Wasserstoff und sein in der Natur vorkommendes Isotop Deuterium in grossen Mengen vorhanden sind, so dass mit der Gefahr einer Erschöpfung nicht gerechnet werden muss, im Gegensatz zu den begrenzten Vorkommen an spaltbaren Materialien. Zudem ist die je Fusionsprozess freiwerdende Energie rund zehnmal grösser als jene eines Spaltprozesses. Diese günstigen Umstände rechtfertigen eine intensive Förderung der diesbezüglichen Forschung.

Die Schwierigkeit der Verwirklichung besteht in der Erzeugung und Beherrschung von Temperaturen zwischen 10^7 und 10^8 °C. Einer neulich erschienenen Pressemeldung zufolge soll es im Max Planck-Institut in München gelungen sein, ein Gemisch aus Deuterium und Tritium auf 6.10^7 °C zu erhitzen. Man wird den Fortgang der Entwicklung mit gespanntem Interesse verfolgen.

10. Kernenergieerzeugung in der Schweiz

In unserem Lande liegt der Zeitpunkt nahe, da die noch verfügbaren Wasserkräfte nicht mehr ausreichen werden, um den immer noch jährlich um 5 bis 6 % zunehmenden Bedarf an elektrischer Energie zu decken. Es müssen also andere Quellen erschlossen werden. Energiewirtschaftlich vorteilhaft wäre ein schrittweiser Übergang auf kohlen- oder ölgefeuerte Dampfkraftwerke grosser Leistungen für den Grundlastbedarf, soweit er durch hydraulische Laufkraftwerke nicht mehr gedeckt werden kann, während die Speicherkraftwerke immer mehr zur Spitzendeckung herangezogen werden sollen. Atomkraftwerke eignen sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen vor allem für ganzjährige Grundlastdeckung. Sie werden erst dann eingesetzt, wenn die Bedarfsentwicklung den Einsatz entsprechend grosser Leistungen während mindestens 7000 Vollbetriebsstunden je Jahr erfordert. Alsdann ist es vorteilhaft, brennstoffgefeuerte Dampfkraftwerke nur noch zur Wintergrundlastdeckung heranzuziehen.

Bei energiewirtschaftlichen Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass unser Land in regem Energie-Austausch mit den Nachbarländern steht und sich seine nationale Energiewirtschaft in jene Westeuropas sinnvoll einzugliedern hat. Nur so ist eine Landesversorgung bei minimalen Gestehungskosten zu sichern. Dieser Gesichtspunkt legt es nahe, geeignete Speicherkraftwerke für grössere Leistungen und Pumpbetrieb auszubauen, um auch an Nachbarländer Spitzenenergie abgeben und dafür Wintergrundlast beziehen zu können. Man kann sich so im Bau brennstoffgefeuerter Dampfkraftwerke etwas Zeit lassen, was auch mit Rücksicht auf die Luftreinhaltung erwünscht ist. Zugleich ergibt diese Entwicklung einen höheren *ganzjährlichen* Grundlastbedarf, was den Einsatz von Kernkraftwerken begünstigt[16]).

Das erste Kernkraftwerk wird für die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) neben dem alten Wasserkraftwerk Beznau an der Aare erstellt. Gewählt wurde ein Druckwasser-Reaktor, System Westinghouse. Er erweist sich preislich vorteilhaft und ist trotz der relativ kleinen Leistung wirtschaftlich. Es handelt sich um ein mit leichtem Wasser gekühltes und moderiertes Reaktorsystem; die thermische Leistung beträgt 1130 MW, die elektrische 350 MW, was einem Gesamtwirkungsgrad von rund 31 % entspricht. Als Brennstoff werden Urandioxyd-Tabletten mit einer mittleren Anreicherung auf 3,08 % U^{235} verwandt, die in Zirkaloy-Hüllrohren zu Stäben zusammengefasst werden. Insgesamt beträgt die Brennstoffladung etwa 40 t; der jährliche Bedarf bei 80 %iger Auslastung der vollen Leistung rund 13 t.

Zur Regelung dienen neutronenabsorbierende Silber-Indium-Kadmium-Stäbe, welche von Rohren aus rostfreiem Stahl umhüllt sind. Diese Stäbe werden magnetisch angetrieben und nur für kurzzeitige Reaktivitätsänderungen oder für Notabschaltungen verwendet. Zu Beginn des Zyklus und während des Betriebs erfolgt die langzeitige Regelung durch chemische *Trimmung* mit Borsäure, die Neutronen absorbiert und dem Moderator beigegeben wird. Die Steuerung der Borsäurenkonzentration erfolgt in einer chemischen Wasseraufbereitungsanlage.

Der zylindrische Druckbehälter aus Kohlenstoffstahl weist unten einen halbkugelförmigen Boden auf, der mit Öffnungen für den Einbau der Neutronenfluss-Messfühler versehen ist. Oben schliesst ein mit Flansch und Dichtung befestigter Deckel den Behälter ab, an welchem die Anschluss-Stutzen für die Regelstäbe angebracht sind. Die Ein- und Austrittstutzen für das Kühlwasser befinden sich seitlich am Zylinder, oberhalb des Kernes. Der Westinghouse-Dampferzeuger ist von vertikaler Bauweise und bildet mit dem Wasserabscheider eine Einheit. Er speist den Sekundärkreis mit weitgehend trockenem Sattdampf.

Die zwei Turbinen-Generatorgruppen werden von der AG. Brown Boveri & Cie., Baden, geliefert und sind bemessen für eine Klemmenleistung von je 182 MW bei einem Frischdampfzustand von 45,2 bar und 258 °C. Die Drehzahl beträgt 3000 U/min. Nach dem Durchströmen des Hochdruckteiles wird der Dampf durch zwei horizontal angeordnete Wasserabscheider geführt, von wo aus er mit einem Druck von 2,7 bar in den darüberliegenden Überhitzer

[14]) Nach anderen Schätzungen soll die Einsatzreife solcher Anlagen erst in 30 bis 40 Jahren erreicht sein.

[15]) SBZ 1958, H. 13, S. 180–182.

[16]) Siehe auch *M. J. Klaentschi:* Standortprobleme von Kernkraftwerken in der Schweiz, SBZ 1965, H. 31, S. 541–544.

gelangt und dort mittels Frischdampf auf 230 °C gebracht wird. Die Anlage Beznau soll gegen Ende 1969 in Betrieb gehen.

Die Aufrechterhaltung der Energieversorgung in der Schweiz und die anzustrebende Unabhängigkeit von Lieferungen aus dem benachbarten Ausland führten zur Ausarbeitung weiterer Kernanlage-Projekte. Diese Projekte sehen eine Gesamtkapazität von rund 2000 MWe vor und sollen gestaffelt ab Anfang der siebziger Jahre in Betrieb genommen werden. Davon wurde neulich von der Bernischen Kraftwerke AG der Auftrag für die Errichtung eines Atomkraftwerkes in Mühleberg vergeben. Generalunternehmer für die schlüsselfertige Anlage und Lieferant des konventionellen Teiles ist die A.G. Brown, Boveri & Cie., Baden. Der Siedewasser-Reaktor mit einer thermischen Leistung von rund 950 MW wird von der General Electric Technical Services Co., Inc., geliefert. Die garantierte elektrische Nettoleistung der Anlage wird 306,2 MW betragen, der Gesamtwirkungsgrad 32,3 %.

Als Brennstoff werden rund 50,5 t Uranoxyd mit einer mittleren Anreicherung auf 2,26 % (Kern I) und 2,71 % (Kern II) verwendet. Die zwei Turbogenerator-Gruppen sind bemessen für je 163,2 MW Bruttoleistung bei einem Frischdampfzustand von etwa 72 at und 286 °C. Der Baubeginn wurde auf den 1. April 1967 festgelegt und die Fertigstellung und Übergabe der Anlage soll im Oktober 1971 erfolgen.

11. Die Eingliederung der atomaren Industrie in der freien Wirtschaft

Die derzeit geschätzte Gesamtleistung aller auf der Welt in Betrieb, in Erstellung und im Projektstadium befindlichen Kernkraftwerke von rund 40 000 MWe bestätigt eindrucksvoll den Durchbruch dieser Energieform auf dem Markt. Genau so eindrucksvoll ist aber die im Juni 1966 von der General Electric erlassene Erklärung, sie werde in Zukunft nicht mehr als Generalunternehmer für die Erstellung von betriebsfertigen Atomanlagen auftreten. Diese Absicht, die vorerst auf die Vereinigten Staaten beschränkt wurde, ermöglicht der gesamten Nuklearindustrie einen kommerziell absolut normalen Preis- und Qualitäts-Wettbewerb unter allseits gleichen Bedingungen. Es ist damit zu rechnen, dass diese Entscheidung, welche der neuen Industrie Gelegenheit gibt, konventionelle Formen anzunehmen und sich in das normale Wirtschaftsleben einzugliedern, auch bald in Europa Nachahmung findet.

Das Kreisspital Bülach

DK 725.51

Architekt **Ernst Schindler,** BSA/SIA, Zürich,
Mitarbeiter **Hans Spitznagel,** Arch. SIA

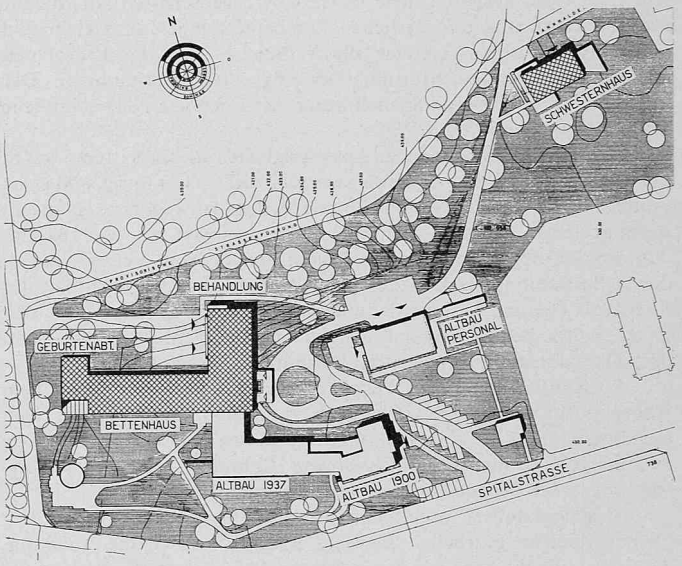
Hierzu Tafeln 3 und 4

Aus der Vor- und Baugeschichte

Dank einer grosszügigen Spende des Auslandbülachers Sir *John Brunner* in Liverpool konnte die Gemeinde Bülach um das Jahr 1900 das Krankenasyl «Brunnerstift» erstellen (Baukosten rd. 100 000 Fr.). Seine erste Vergrösserung (abgesehen von einem 1916 gebauten Absonderungshaus) erfuhr das Bülacher Spital durch einen Neubau im Jahre 1937. Zu dessen Erstellung haben sich 1935 elf Gemeinden (heute 15 Gemeinden) in einem Zweckverband zusammengeschlossen. Die Baukosten betrugen rund 1 Mio Franken; die Bettenzahl konnte von 38 auf 92 erhöht werden. Infolge der Bevölkerungsentwicklung im Einzugsgebiet wies das Spital seit 1950 eine dauernde Überbelegung auf (gegen 110 Betten, einschl. Notbetten). Das zu erwartende Anwachsen der Patientenzahl und die immer mehr Behandlungsraum erfordernde Entwicklung des medizinischen Fortschritts machten in der Folge einen weiteren Ausbau des Kreisspitals Bülach unvermeidlich. Hierfür erstellte Architekt BSA/SIA *Ernst Schindler*, der 1955 beigezogen worden war, ein Vorprojekt mit einer Erweiterung auf 170 Patienten- und Personalbetten (1956). Das Vorprojekt enthielt im wesentlichen die heute ausgeführte Lösung der Bauaufgabe. Die Projektpläne und der detaillierte Kostenvoranschlag lagen im Februar 1959 in bereinigter Form vor (vgl. auch «Finanzielles», S. 42).

*

Mit den Aushubarbeiten für die Unterfangung des Altbaus wurde Mitte August 1960 begonnen. Im Frühjahr 1961 wurden die Rohbauarbeiten des Spitalneubaus in Angriff genommen und im Oktober vollendet. Im Herbst 1963 waren die Neubauten fertiggestellt (Einweihung am 21. September 1963). Die Umgebungsarbeiten wurden im Frühling 1963 begonnen. Im Winter 1963/64 wurde der an den Neubau anschliessende alte Behandlungstrakt umgebaut. Darauf folgten die Renovationsarbeiten in den bisherigen Krankenabteilungen.



Lageplan 1:3000

Situation

Die heute vollendete (als 1. Etappe zu bezeichnende) Erweiterung des Kreisspitals Bülach besteht in einem winkelförmigen Anbau an das alte Gebäude aus dem Jahre 1937. Dabei ist der neue Bettenhausflügel nach Süden orientiert und von der verkehrsreich gewordenen Spitalstrasse durch die parkartig vorgelagerte Waldpartie gegen Einblick und Lärm geschützt.

Der Behandlungsanbau ist im Anschluss an den bestehenden Operationstrakt als Verlängerung nach Norden disponiert worden. Dadurch konnte die Zufahrt beibehalten und der Haupteingang

Bettenhaus von Süden



Schwesternhaus, Südseite

