

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 64 (1973)
Heft: 20a: Sondernummer des VSE über den UNIPEDE-Kongress in Den Haag
Rubrik: Studienkomitee für thermische Produktion

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

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



Schweizerisches Mitglied
Y. de Haller
Vizedirektor der EOS
Lausanne

Das Komitee hat seine Arbeiten in erster Linie auf die aktuellen Probleme der thermischen Produktion konzentriert, wobei folgende Hauptgebiete besonders erwähnt seien.

Im Bericht 20.02 werden die Studien über die hauptsächlichsten Aspekte der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Entwicklungen der thermischen Energieproduktion zusammengefasst.

Das Subkomitee «Chemie der thermischen Kraftwerke» berichtet über seine Arbeiten in einem separaten Bericht 21, in welchem vor allem auf die chemischen Aspekte von leichtwassergekühlten Kraftwerken hingewiesen wird.

In einem separaten Bericht Nr. 20.1 sind die Betriebserfahrungen über Kernkraftwerke in den Mitgliedsländern der UNIPÉDE zusammengefasst. Ein Auszug ist nachfolgend publiziert.

1. Allgemeines

Im Laufe des letzten Jahrzehntes hat sich die Anzahl der leichtwassergekühlten Kernkraftwerke in den UNIPÉDE-Mitgliedsländern ansehnlich vermehrt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen haben die Kenntnisse über das Verhalten der Konstruktionsmaterialien, der Wasserqualitäten und den Transport von korrosionsverursachenden Produkten beträchtlich erweitert.

Eine Expertengruppe hat diese Kenntnisse und Erfahrungen in den Kraftwerken der UNIPÉDE-Mitgliedsländern bis Oktober 1971 durch eine Umfrage ermittelt.

Die Untersuchung wurde durchgeführt über die Bauart der Reinigungssysteme, Spezifikationen, Materialien, Beschaffenheiten, Verschmutzung, Anzahl und Resultate von Analysen, angewendete analytische Methoden, Organisation und spezielle Probleme.

Die allgemeine Zielsetzung richtet sich auf eine Standardisierung und eine damit verbundene Reduktion der Investitionskosten. Immer mehr Aufmerksamkeit muss dem Umweltschutz gewidmet werden, was zu einer Beschränkung der Handlungsfreiheit für die Abfallbeseitigung führen könnte, insbesondere könnten werkeigene Anlagen für die Behandlung fester und flüssiger Abfälle gefordert werden.

Diese vorauszusehenden Probleme könnten durch die Vergrößerung der Kapazität und der Abmessungen dieser Systeme, welche eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Leckagen

der Kondensatoren und Rohrschäden bei den Dampferzeugern zur Folge haben, noch schwieriger werden.

Ein erster Bericht über die Betriebserfahrungen in Kernkraftwerken, welcher am Kongress in Cannes im Jahre 1970 vorgelegt wurde, bezog sich auf 21 Kraftwerke von über 100 MW, welche Ende 1968 in Betrieb waren. Von diesen waren 13 mit Gas-Graphit-Reaktoren, 5 mit Druckwasser-Reaktoren und 3 mit Siedewasser-Reaktoren ausgerüstet. Die gegenwärtige Untersuchung umfasst 57 Kraftwerke (siehe Tabelle I). Ungefähr 50% der Kraftwerke waren schon Ende 1971 in Betrieb. Die kumulierte Energieproduktion betrug Ende 1972 358184 GWh (siehe Tabelle II).

Auf Grund der am Ende 1972 im Bau befindlichen Kraftwerke dürfte die in den UNIPÉDE-Mitgliedstaaten in den Jahren 1975/76 installierte Nuklearleistung 30000 MW erreichen, was ungefähr 9% des totalen Leistungsbedarfs dieser Länder und etwa 28% der in der Welt installierten Nuklear-Leistung entspricht.

Was die Grösse der Kernkraftwerke anbetrifft, kann man feststellen, dass die Einheiten in den letzten 10 Jahren ungefähr 8mal grösser geworden sind und bisweilen 1300 MW erreichen, was die beträchtlichen Anstrengungen auf diesem Gebiete veranschaulicht.

2. Besonderheiten des Standortes

Mit Ausnahme der schwedischen sind alle mit wassergekühlten Reaktoren bestückten Kraftwerke an Flüssen gelegen. Die Temperaturerhöhung durch das Kondensatorwasser beträgt zwischen 7 und 12 °C. Kühltürme werden selten verwendet, ausgenommen bei der Kühlung in kritischen Perioden in Doel und Caorso, und während Zeiten von niedrigstem Wasserstand in Trino Vercellese, Würgassen und Tihange. In Deutschland ist das Kraftwerk Lingen mit einer Vorrichtung für gemischten Betrieb versehen, wobei die Kühltürme für zwei Drittel der Gesamtleistung ausgelegt sind.

Was die gasgekühlten Reaktoren anbelangt, sind in Frankreich sämtliche Kraftwerke an Wasserläufen, und in England im allgemeinen am Meer oder bei Flussmündungen, gelegen. Die Temperaturerhöhung des Kühlwassers am Ausgang des Kondensators beträgt ungefähr 7 bis 10 °C. Kein Kraftwerk besitzt Kühltürme, mit Ausnahme des deutschen THTR-Kraftwerkes in Ventrop.

In den Ländern der UNIPEDe am 31. Dezember 1972 im Betrieb oder im Bau befindliche Kernkraftwerke

Tabelle I

| Ref. | Kraftwerk | Betreiber | Typ | Leistung MW | Datum des Baubeginns | Datum der Inbetriebsetzung | Produzierte Energie GWh | Land |
|------|------------------|-----------|------------|-------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | Tullnerfeld | GKT | LWR-BWR | 700 | | 1977 | - | Oesterreich |
| 2 | Doel 1 - II | Doel | LWR-PWR | 2x410 | Juni 69-Feb.71 | 1973-1975 | - | Belgien |
| 3 | Tihange | SEMO | LWR-PWR | 920 | Juni 70 | 1974 | - | Belgien |
| 4 | Chinon II | EdF | GCR | 200 | August 58 | März 65 | 8 302 | Frankreich |
| 5 | Chinon III | EdF | GCR | 480 | Sept. 60 | Okt. 66 | 5 055 | Frankreich |
| 6 | St. Laurent I-II | EdF | GCR | 500+515 | Sept. 63-Feb.66 | März 65-Aug.71 | 3 497 | Frankreich |
| 7 | Bugey I | EdF | GCR | 540 | Feb. 66 | 1972 | - | Frankreich |
| 8 | Chooz | EdF-SENA | LWR-PWR | 282 | Jan. 62 | April 67 | 3 887 | Frankreich |
| 9 | Fessenheim I-II | EdF | LWR-PWR | 2x930 | Okt. 71-72 | April 76-Sept.76 | - | Frankreich |
| 10 | Gundremmingen | KRB | LWR-BWR | 250 | Nov. 62 | Nov. 66 | 7 261 | Deutschland |
| 11 | Lingen | KWL | LWR-BWR | 252 | Okt. 64 | Mai 68 | 5 258 | Deutschland |
| 12 | Obrigheim | KWO | LWR-PWR | 345 | März 65 | Okt. 68 | 6 837 | Deutschland |
| 13 | Würgassen | PEA | LWR-BWR | 670 | Feb. 68 | 1972 | - | Deutschland |
| 14 | Stade | KKS | LWR-PWR | 662 | März 68 | 1972 | - | Deutschland |
| 15 | Brunsbüttel | KKB | LWR-BWR | 805 | März 70 | 1974 | - | Deutschland |
| 16 | Phillipsburg I | KKP | LWR-BWR | 900 | Nov. 70 | 1974 | - | Deutschland |
| 17 | Biblis A | RWE | LWR-PWR | 1204 | März 70 | 1974 | - | Deutschland |
| 18 | Niederaichbach | KKN | HWR-GCR | 107 | 1966 | 1972 | - | Deutschland |
| 19 | Uentrop THTR | HKG | HTGR | 325 | Nov. 71 | 1976 | - | Deutschland |
| 20 | Bradwell | CEGB | GCR-Magnox | 2x130 | Jan. 57 | Juni 62-Nov.62 | 21 216 | Grossbritannien |
| 21 | Berkeley | CEGB | GCR-Magnox | 2x138 | Jan. 57 | Juni 62-Nov. 62 | 20 887 | Grossbritannien |
| 22 | Hinkley Point A | CEGB | GCR-Magnox | 2x230 | Dez. 57 | Feb. 65-März 65 | 21 758 | Grossbritannien |
| 23 | Trawsfynydd | CEGB | GCR-Magnox | 2x205 | Juli 58 | Jan. 65-April 65 | 20 687 | Grossbritannien |
| 24 | Dungeness A | CEGB | GCR-Magnox | 2x205 | August 60 | Jan. 66-Feb. 66 | 21 486 | Grossbritannien |
| 25 | Sizewell | CEGB | GCR-Magnox | 2x210 | April 61 | Jan. 66-Feb. 66 | 19 088 | Grossbritannien |
| 26 | Oldbury | CEGB | GCR-Magnox | 2x200 | Mai 62 | Nov. 67 -April 68 | 10 528 | Grossbritannien |
| 27 | Wylfa | CEGB | GCR-Magnox | 2x420 | Okt. 63 | März 71-Aug.71 | 1 722 | Grossbritannien |
| 28 | Hunterston A | SSEB | GCR-Magnox | 2x130 | August 57 | April 64 | 19 213 | Grossbritannien |
| 29 | Dungeness B | CEGB | GCR-AGR | 2x660 | Feb. 66 | Nov. 74 | - | Grossbritannien |
| 30 | Hinkley Point B | CEGB | GCR-AGR | 2x660 | August 67 | 1972-1973 | - | Grossbritannien |
| 31 | Hartlepool | CEGB | GCR-AGR | 2x660 | Nov. 68 | 1975 | - | Grossbritannien |
| 32 | Heysham | CEGB | GCR-AGR | 2x660 | Dez. 70 | 1976 | - | Grossbritannien |
| 33 | Hunterston B | SSEB | GCR-AGR | 2x660 | Nov. 67 | 1973 | - | Grossbritannien |
| 34 | Latina | ENEL | GCR-Magnox | 160 | Nov. 58 | Mai 63 | 10 499 | Italien |
| 35 | Trino VC | ENEL | LWR-PWR | 257 | Juli 61 | Okt. 64 | 5 987 | Italien |
| 36 | Garigliano | ENEL | LWR-BWR | 160 | Nov. 59 | Mai 64 | 7 550 | Italien |
| 37 | Caorso | ENEL | LWR-BWR | 822 | August 70 | April 75 | - | Italien |
| 38 | Borssele | PZEM | LWR-PWR | 470 | Sept. 69 | 1973 | - | Holland |
| 39 | J. Cabrera | U.E. | LWR-PWR | 160 | April 65 | August 69 | 2 817 | Spanien |
| 40 | S.M. de Garõna | NUCLEONOR | LWR-BWR | 460 | Okt. 66 | Juni 71 | 1 516 | Spanien |
| 41 | Vandellòs | HIFRENSA | GCR | 500 | Juni 67 | 1972 | - | Spanien |
| 42 | Oskarshamn I | OKG | LWR-BWR | 460 | Sept. 66 | 1972 | - | Schweden |
| 43 | Ringhals I | SSPB | LWR-BWR | 762 | Febr. 69 | 1974 | - | Schweden |
| 44 | Ringhals II | SSPB | LWR-PWR | 809 | März 70 | 1974 | - | Schweden |
| 45 | Beznau I-II | NOK | LWR-PWR | 2x350 | Nov. 65-Mai 68 | Jan.70-72 | 4 249 | Schweiz |
| 46 | Mühleberg | BKW | LWR-BWR | 320 | Mai 67 | 1973 | - | Schweiz |
| 47 | Lovisa I-II | IVO | LWR-PWR | 2x440 | 1972 | 1977-1978 | - | Finnland |
| 48 | Bugey II | EdF | LWR-PWR | 925 | 1972 | 1976 | - | Frankreich |
| 49 | Neckar | GKN | LWR-PWR | 805 | 1972 | 1976 | - | BR Deutschland |
| 50 | Biblis B | RWE | LWR-PWR | 1 300 | 1972 | 1976 | - | BR Deutschland |
| 51 | Isar | KKI | LWR-BWR | 900 | 1972 | 1976 | - | BR Deutschland |
| 52 | Unterweser | KKU | LWR-PWR | 1 300 | 1972 | 1976 | - | BR Deutschland |
| 53 | Almaraz I-II | Konsorium | LWR-PWR | 2x930 | 1972 | 1977-1978 | - | Spanien |
| 54 | Oskarshamn II | OKG | LWR-BWR | 580 | 1971 | 1974 | - | Schweden |
| 55 | Ringhals III | SSPG | LWR-PWR | 915 | 1972 | 1977 | - | Schweden |
| 56 | Barsebäck I | Sydskraft | LWR-BWR | 580 | 1971 | 1975 | - | Schweden |
| 57 | Foskmark I | SSPG | LWR-BWR | 900 | 1972 | 1978 | - | Schweden |

Maximal mögliche Leistung und kumulierte Erzeugung der Kernkraftwerke (Stand: 31. Dezember 1972)

Tabelle II

| Land | Maximal mögliche Nuklearleistung | | | Erzeugte Energie bis 31.12.72 GWh | |
|------------------------|----------------------------------|----------------|------------|-----------------------------------|---------|
| | Total MWe | in Betrieb MWe | im Bau MWe | | |
| Mitglieder der UNIPEDe | Belgien | 1 751 | 11 | 1 740 | - |
| | BR Deutschland | 9 990 | 2 330 | 7 660 | 29 236 |
| | Finnland | 880 | - | 880 | - |
| | Frankreich | 5 643 | 2 705 | 2 938 | 46 148 |
| | Grossbritannien | 11 226 | 4 246 | 6 980 | 232 737 |
| | Holland | 522 | 52 | 470 | 1 442 |
| | Italien | 1 417 | 577 | 840 | 27 671 |
| | Oesterreich | 700 | - | 700 | - |
| | Schweden | 4 732 | 452 | 4 280 | 2 500 |
| | Schweiz | 1 020 | 1 020 | - | 9 366 |
| | Spanien | 2 980 | 1 120 | 1 860 | 9 084 |
| | Japan | 10 661 | 1 723 | 8 938 | 21 569 |
| | Kanada | 5 610 | 1 870 | 3 740 | 9 917 |
| | USA | 62 458 | 14 683 | 47 775 | 183 167 |

3. Technische Entwicklung

3.1 Kraftwerke mit Leichtwasserreaktoren

Die Prüfung der Angaben betreffend der Kraftwerke mit wassergekühlten Reaktoren lässt gewisse Richtungen in der Entwicklung des nuklearen Dampfproduktionssystems für die Erzeugung von elektrischer Energie erkennen.

3.1.1 Sicherheitsbehälter

Es besteht gegenwärtig die Tendenz, die Sicherheitsbehälter mit doppelter Ummantelung zu versehen, die erste Umhüllung ist immer mit Stahlblech ausgekleidet und die äussere besteht aus armiertem Beton. Die Abschirmung im Kraftwerk Oskarshamn, mit zwei Hüllen aus armiertem Beton, bildet die einzige Ausnahme.

tauschfläche erreicht, während der Temperaturabfall des Primärkühlmittels praktisch gleich geblieben ist, wie in den Kraftwerken der ersten Generation. In den Siedewasserreaktoren wurde der doppelte Kreislauf aufgegeben und die Installation von Einspritzdüsen im Innern des Gefässes hat die Abmessungen des Kreislaufes, trotz der grösseren Einheitsleistungen, in ansehnlicher Weise reduziert. Im Kraftwerk Garigliano wurde zum Beispiel eine Durchflussmenge der Umwälzpumpe von 5000 t/h für 160 MWe gewählt, und im Kraftwerk Caorso von 7800 t/h für 800 MWe; somit eine fünffache Leistung für eine nur 1,5mal grössere Umwälzmenge.

Die neuesten Siedewasserreaktoren deutscher Herkunft (Brunsbüttel und Philippsburg) haben 8 bis 9 Umwälzpumpen im Innern des Gefässes.

Leichtwasserreaktoren, Bauarten der Nukleardampferzeuger

Tabelle III

| Ref. | Werk | Typ-Leistung MWth / MWe | Abschirmung | | Reaktorgefäss | | Primär- Umwälzpumpen, Anzahl x Kapazität t/h | Dampferzeuger | | | Kern | |
|------|------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|--|------------------|---|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | | Anzahl der Abschirmungen | Normaldruck kg/cm ² | Innere Durchmesser m | Dicke cm | | Anzahl x MWth | Temperatur des Primärkühlmittels Eintritt (°C) | Austritt (°C) | Anzahl der Brennelemente | Spez. Leistung kW/kg U |
| 2 | Doel I-II | PWR-1192/410 | 2 | 2,90 | 3,30 | 18,00 | 2 x 12 240 | 2 x 600 | 317,0 | 287,0 | 121 | 39,5 |
| 3 | Tihange | PWR-2652/920 | 2 | 3,10 | 3,98 | 20,00 | 3 x 15 200 | 3 x 887 | 321,6 | 284,0 | 157 | 38,0 |
| 8 | Chooz | PWR-1000/282 | 1 | 3,92 | 3,20 | 20,00 | 4 x 6 000 | 4 x 250 | 292,0 | 259,0 | 112 | 27,8 |
| 9 | Fessenheim I-II | PWR-2660/930 | 2 | 3,75 | 4,00 | 20,00 | 3 x 15 200 | 3 x 886 | 322,0 | 284,0 | 157 | 38,0 |
| 12 | Obrigheim | PWR-1050/345 | 2 | 4,05 | 3,27 | 16,0+0,7 | 2 x 12 300 | 2 x 525 | 312,4 | 283,0 | 121 | 30,9 |
| 14 | Stade | PWR-1900/660 | 2 | 4,85 | 4,08 | 19,2+0,7 | 4 x 11 000 | 4 x 475 | 316,4 | 288,2 | 157 | 33,8 |
| 17 | Biblis A | PWR-3440/1200 | 2 | 5,80 | 5,00 | 23,5+0,4 | 4 x 18 000 | 4 x 865 | 316,4 | 284,6 | 193 | 35,0 |
| 35 | Trino Vercellese | PWR-825/257 | 2 | 2,37 | 3,20 | 21,91 | 4 x 5 820 | 4 x 215 | 284,5 | 253,5 | 112 | 22,5 |
| 38 | Borssele | PWR-1365/450 | 2 | 3,9 | 3,81 | 18,50 | 2 x 18 000 | 2 x 685 | 319,4 | 295,4 | 121 | 35,9 |
| 39 | José Cabrera | PWR-510/150 | 1 | 2,25 | 2,80 | 14,80 | 1 x 12 240 | 1 x 510 | 299,0 | 272,0 | 69 | 28,2 |
| 44 | Ringhals II | PWR-2440/809 | 1 | 5,30 | 3,99 | 19,50 | 3 x 15 000 | 3 x 813 | 319,0 | 285,0 | 157 | 34,4 |
| 45 | Beznau I-II | PWR-1130/350 | 2 | 2,65 | 3,33 | 16,60 | 2 x 12 240 | 2 x 565 | 315,0 | 285,0 | 121 | 28,2 |
| 1 | Tullnerfeld | BWR-2100/700 | 2 | 3,25 | 5,40 | 13,25 | 6 x 5 000 | | | | 484 | 21,3 |
| 10 | Gundremmingen | BWR-801/250 | 2 | 4,55 | 3,71 | 12,1+0,6 | 3 x 4 100 | 3 x 83 | 279,0 | 265,0 | 368 | 17,3 |
| 11 | Lingen | BWR-520/252 | 2 | 4,80 | 3,60 | 8,4+0,6 | 2 x 6 000 | 2 x 260 | 286,0 | 285,9 | 284 | 16,2 |
| 13 | Wurgassen | BWR-1912/642 | 2 | 5,35 | 5,30 | 12,9+0,8 | 2 x 5 500 | | | | 444 | 22,1 |
| 15 | Brunsbüttel | BWR-2292/805 | 2 | 4,25 | 5,58 | 13,6+0,5 | 8 x 4 250 | | | | 532 | 22,1 |
| 16 | Phillipsburg I | BWR-2575/900 | 2 | 4,25 | 5,85 | 14,3+0,5 | 9 x 4 245 | | | | 592 | 22,3 |
| 36 | Garigliano | BWR-506/160 | 1 | 1,80 | 3,58 | 12,06 | 2 x 4 800 | 2 x 60 | 283,0 | 254,0 | 208 | 11,0 |
| 37 | Caorso | BWR-2436/822 | 1 | 3,23 | 5,53 | 13,63 | 2 x 7 780 | | | | 560 | 23,0 |
| 40 | S.M. de Garona | BWR-1389/460 | 2 | 4,30 | 4,78 | 12,00 | 2 x 7 300 | | | | 400 | 17,6 |
| 42 | Oskarshamn I | BWR-1130/460 | 2 | 4,60 | 5,00 | 12,50 | 4 x 5 900 | | | | 448 | 17,3 |
| 43 | Ringhals I | BWR-2270/762 | 2 | 5,30 | 5,95 | 14,60 | 6 x | | | | 648 | 19,8 |
| 46 | Mühleberg | BWR-947/320 | 2 | 3,93 | 4,04 | 10,40 | 2 x 3 130 | | | | 228 | 21,5 |

3.1.2 Reaktorgefässe

Man kann feststellen, dass die Gewichte für die Siedewasserreaktoren verhältnismässig grösser geworden sind, vor allem, weil die Wasserabscheider und Dampftrocknungssysteme innerhalb des Gefässes angeordnet sind. Das Gewicht und die Abmessungen haben zur Folge, dass Siedewasserreaktoren von mehr als 700 MW an Ort und Stelle zusammengebaut werden müssen.

3.1.3 Primärkreislauf

Bei den Druckwasserreaktoren besteht die Tendenz, die Anzahl der Kreisläufe zu verringern, was eine Vergrösserung ihrer Kapazitätseinheiten zur Folge hat. So bestehen jetzt Pumpen, welche 18000 t/h Wasser im Primärkreislauf fördern sowie Dampferzeuger mit U-förmigen Rohrbündeln mit Einheitskapazitäten von etwa 900 MW. Die Erhöhung der Leistung der Dampferzeuger wurde durch die Vergrösserung der Aus-

3.1.4 Spaltstoffe

Infolge der erzielten Verbesserungen der Brennstoffeigenschaften ist die spezifische Leistung allmählich von 11 auf 23 kW/kgU für Siedewasserreaktoren und von 22 auf 40 kW/kgU für Druckwasserreaktoren angestiegen.

Was das Umhüllungsmaterial der Brennstoffelemente anbelangt, ist der Übergang von rostfreiem Stahl auf Zircaloy in den Druckwasserreaktoren fast überall vollzogen, mit den entsprechenden wirtschaftlichen Vorteilen infolge geringerer Anreicherung für das Uran.

3.1.5 Systeme der Primärkühlmittelbehandlung

Die Systeme für die Behandlung des Primärkühlmittels, bestehend aus Anlagen für die Filtrierung und Entsalzung durch Anionenaustauscher, setzen im Mittel weniger als 1% des totalen Kühlmitteldurchflusses um. In den Druckwassertypen

wird als chemischer Zusatz gegen die Korrosion alkalisches Hydroxyd (LiOH) verwendet.

3.1.6 Sicherheitssysteme

Wie bekannt, werden die Sicherheitssysteme, infolge immer strenger werdender Sicherheitskriterien, dauernd verbessert. Die Energieversorgung dieser Systeme erfolgt durch Kombination von äusseren, unabhängigen Energiequellen und durch Diesel-Generatoren. Die Anzahl der letzteren kann zwischen 1 und 4 pro Kraftwerkanlage variieren.

In den Kraftwerken mit zwei Reaktoren hat gewöhnlich jede Einheit ihre eigene Notanspeisung.

Einrichtungen für die Produktion elektrischer Energie

3.1.7 Turbinen-Generatorgruppen

Die Turbinen-Generatorgruppen für gesättigten Dampf der wassergekühlten Kernkraftwerke haben Leistungen erreicht, die mit denjenigen von klassischen Einheiten verglichen werden können, oft mit einer Drehzahl von 3000 U/min. In gewissen Fällen werden von einem Reaktor zwei Gruppen gespiesen. Die Leistungszunahme hat auch eine Erhöhung der Generatorenspannung bis zu 27 kV zur Folge gehabt.

3.1.8 Thermische Kreisläufe

Die Charakteristik der thermischen Kreisläufe ist ziemlich einheitlich; nämlich Kondensatpumpen und Elektro-Speisewasserpumpen von je $3 \times 50\%$ der Kapazität.

Einzig die Kraftwerke von Caorso und Fessenheim sind mit Turbo-Speisewasserpumpen von 100% und 50% der Kapazität ausgerüstet. Ausserdem besitzen diese beiden Kraftwerke zwei zusätzliche Motor-Pumpen von 50% der Leistung.

3.1.9 Zirkulationskreislauf

Dieser Kreislauf ist durch verschiedene Anzahlen und Kapazitäten der Umwälzpumpen von $2 \times 50\%$ bis $6 \times 16,6\%$ mit zahlreichen Zwischenlösungen charakterisiert. Ein einziges Kraftwerk (Mühleberg) ist mit einer zusätzlichen Zirkulationspumpe ausgerüstet.

3.2 Kraftwerke mit gasgekühlten Reaktoren

Dieser Abschnitt behandelt den Gas-Graphit-Reaktor Magnox, den davon abgeleiteten AGR (Advanced Gas Cooled Reactor) mit angereichertem Uran in England und den THTR (Thorium High Temperature Reactor) mit heliumgekühlten Kugeln in Deutschland.

Nukleares Dampferzeugungssystem

3.2.1 Reaktorgefäss

Die Reaktorgefässe werden infolge des hohen Gasdruckes, welcher sich von 10 kg/cm^2 in den ersten Magnox-Typen auf ungefähr 50 kg/cm^2 in den AGR und den THTR erhöht hat, fast ausschliesslich aus vorgespanntem Beton anstelle von Stahl hergestellt.

3.2.2 Primärkreislauf

Was den Primärkreislauf anbelangt, so können die Dampferzeuger in das Innere der Reaktorgefässe aus vorgespanntem Beton verlegt werden (unter dem Reaktorkern im französi-

schen System und um den Reaktorkern im englischen System und im THTR), was dem sogenannten integrierten System entspricht.

Die Einheitskapazität dieser Dampferzeuger hat sich von 67 MWth in Hunterston A bis zu 500 MW in Wyifa erhöht; die französischen Reaktoren von Saint-Laurent-des-Eaux und von Bugey sind mit einem einzigen Wärmeaustauscher für die gesamte Gasmenge ausgerüstet.

Der Temperatursprung des Gases im Dampferzeuger ist in allen Kraftwerken mit Natururan-Reaktoren ziemlich gleich (ungefähr 200°C).

In den AGR hat die Temperaturerhöhung der Gasaustritte zu einem beträchtlichen Temperatursprung im Dampferzeuger geführt. Dieser Temperatursprung erreicht Werte in der Grössenordnung von 400°C , im THTR sogar 500°C .

Die Gebläse, gewöhnlich 4 bis 8 Stück pro Reaktor, werden durch Primärmotoren angetrieben, etwa je zur Hälfte von Gleich- oder Wechselstrommotoren und von Dampfturbinen. Alle französischen Reaktoren und der englische Reaktor Magnox sind mit Gebläsen variabler Drehzahl versehen; die AGR, mit Ausnahme der Zentrale Dungeness B und die THTR, enthalten Gebläse konstanter Drehzahl.

3.2.3 Spaltstoff

Die spezifische Leistung der Brennstoffstäbe in den Reaktoren mit natürlichem Uran ist praktisch bei 2,5 bis $3,5 \text{ kW/kgU}$ geblieben.

Eine ansehnliche Erhöhung bis 8–10 kW/kgU wurde im Reaktor Bugey, durch die Verwendung von rohrförmigen, mit zentraler Kühlung versehenen Elementen, erreicht. In den Reaktoren mit angereichertem Uran wird die spezifische Leistung ebenfalls hohe Werte erreichen, wie 13 kW/kgU (Reaktor von Hartlepool), während im THTR $104 \text{ kW/kg (U + Th)}$ erreicht werden.

Der Abbrand hat sich in allen englischen Reaktoren des Types Magnox von ungefähr 3600 MWd/t auf 4000 MWd/t erhöht, während die französischen Reaktoren dank der Verwendung von rohrförmigen Brennstäben 4800 MWd/t erreicht haben, mit Spitzenwerten von ungefähr 6000 MWd/t .

Für das Umhüllungsmaterial sind keinerlei wichtige Änderungen in Sicht; die Reaktoren der ersten Generation sind im allgemeinen mit Legierungen des Typs Magnox ausgerüstet, während die AGR rostfreien Stahl verwenden.

3.2.4 Sicherheitssysteme

Unter den Neuerungen bei den englischen Reaktoren verdient die Einspritzvorrichtung für Borkugeln zur Notabstellung des Reaktors besonders erwähnt zu werden. Dieses System ist gegenwärtig in Erprobung.

Die Energieversorgung der Hilfsbetriebe der Kraftwerke erfolgt durch 3 bis 4 Diesel- oder Gasturbinen-Gruppen, deren Leistung zwischen $0,75$ bis $3,5 \text{ MW}$ beträgt; in den englischen AGR Kraftwerken, in Hartlepool und Hinkley Point B, sind je 4 Gasturbinen von $17,5 \text{ MW}$ installiert. In Frankreich und Italien wird auch Fremdstrom verwendet.

3.2.5 Behandlungssysteme für radioaktive Abfälle

Die Abgabe der im Falle eines Unfalles aus dem Primärkreislauf entweichenden Gase erfolgt im allgemeinen über eine absorbierende Substanz und über Aktivkohlefilter, deren Wirksamkeit gegenüber von I 131 über 99% erreicht.

Die für die flüssigen Abfälle im allgemeinen gebräuchliche Behandlung besteht in der Entleerung der wenig aktiven Substanzen nach dem Verdünnen in ein Gewässer und der Lagerung der stark aktiven Abfälle nach dem Verdampfen.

Die englischen Kraftwerke sind mit Verbrennungsanlagen für die festen brennbaren Abfälle mit schwacher Aktivität ausgerüstet, während die nicht brennbaren festen Abfälle in zentralen Anlagen aufbewahrt oder in abgeschirmten Lagerbehältern innerhalb des Kraftwerkgeländes vergraben werden.

Schliesslich soll das Kraftwerk Chinon erwähnt werden, für welches das «Atelier des Matériaux Irradiés» (AMI) sämtliche radioaktiven Abfälle zur endgültigen Behandlung übernimmt.

4. Betriebserfahrungen

Die ausgewerteten Betriebserfahrungen beziehen sich auf 160 Reaktor-Betriebsjahre, wovon 134 für Gas-Graphit-Reaktoren und 26 für Leichtwasser-Reaktoren. Das Land mit den grössten Betriebserfahrungen ist England mit 111 Reaktor-Betriebsjahren, gefolgt von Italien mit 22 und Frankreich mit 20 Reaktor-Betriebsjahren.

Die nachfolgenden Betriebsergebnisse beziehen sich auf die totale Betriebsdauer der Kraftwerke, d.h. seit der Betriebsaufnahme bis zum 31. Dezember 1971.

4.1 Kraftwerke mit Leichtwasserreaktoren

4.1.1 Laständerungen

Die für einen Kaltstart benötigte Zeit ist praktisch gleich für Siedewasser- und Druckwasser-Reaktoren, und beträgt 16 bis 20 Stunden.

Was den Belastungsanstieg (bis zur Nennleistung) anbelangt, so liegt dieser zwischen 1 und 5% pro Minute.

Die technisch mögliche kleinste Belastung variiert zwischen 5% und 15%, die kleinere Zahl entspricht der Handsteuerung.

4.1.2 Spaltstoffe

Was den unterbrochlosen Betrieb anbelangt, so können die Leistungen der Brennstoffe in den Leichtwasser-Reaktoren als befriedigend bezeichnet werden. Es sind jedoch bei Brennstoff-Umhüllungen aus Zr aus verschiedenen Ursachen einige Störungen eingetreten.

4.1.3 Radioaktive Abfälle

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die durch die flüssigen und gasförmigen Abfallstoffe hervorgerufene Reaktivität ausserhalb des Kraftwerkgeländes so gering gehalten werden kann, dass sie nur einige Prozente oder Promille der natürlichen Radioaktivität beträgt.

4.1.4 Nichtverfügbarkeit der Kraftwerke

Die Resultate der Nichtverfügbarkeit der Leichtwasser-Kernkraftwerke beziehen sich nur auf 9 Kraftwerke, wovon 5 mit Druckwasserreaktoren und 4 mit Siedewasserreaktoren ausgerüstet sind. Die beiden Kraftwerke Beznau und Santa Maria de Garona waren noch nicht lange genug im Betrieb, um verwertbare Resultate zu liefern. Der Nichtverfügbarkeitsfaktor der Leichtwasser-Kernkraftwerke variiert im Mittel zwischen 25 und 30%, mit Ausnahme des Kraftwerkes Trino Vercellese mit einem Nichtverfügbarkeitsfaktor von 60% (dieses Kraftwerk musste infolge von Störungen während 3 Jahren innerhalb einer Periode von 7 Jahren ausser Betrieb gesetzt werden). Aus dem gleichen Grunde beträgt der Nichtverfügbarkeitsfaktor des Kernkraftwerkes von Chooz 62%. In beiden Fällen sind die Störungen auf Ermüdungserscheinungen infolge Vibrationen, hervorgerufen durch das Kühlmedium, zurückzuführen.

Nichtverfügbarkeit von Kernkraftwerken

Tabelle IV

| Ref. | Kraftwerk | Nichtverfügbarkeit in % | | | | | Betrachtete Zeitspanne Jahre |
|------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------|--------|------------------------------------|
| | | Total | Nuklear- Teil | Konventioneller Teil | Unterhalt | Divers | |
| 4 | Chinon 11 | 39,60 | 6,40 | 23,00 | 10,20 | | 7,00 |
| 5 | Chinon 111 | 70,50 | 16,00 | 30,20 | 24,30 | | 5,00 |
| 6 | St. Laurent 1 | 72,00 | 40,00 | 28,00 | 4,00 | | 2,75 |
| 6a) | St. Laurent 11 | 52,00 | 7,50 | 44,50 | | | 0,33 |
| 20 | Bradwell | 14,58 | 2,75 | 1,19 | 10,64 | | 8,00 |
| 21 | Berkeley | 10,57 | 2,16 | 0,34 | 8,07 | | 8,00 |
| 22 | Hinkley Point A | 34,83 | 4,24 | 27,10 | 3,49 | | 7,00 |
| 23 | Trawsfynydd | 31,17 | 10,25 | 9,91 | 11,01 | | 7,00 |
| 24 | Dungeness A | 14,51 | 4,62 | 4,29 | 5,60 | | 7,00 |
| 25 | Sizewell | 25,01 | 4,53 | 11,93 | 8,55 | | 6,5 |
| 26 | Oldbury | 28,90 | 2,13 | 8,76 | 18,01 | | 4,00 |
| 28 | Hunterston A | 14,96 | 4,41 | 3,58 | 6,97 | | 8,00 |
| 34 | Latina | 26,63 | 12,71 | 3,99 | 7,60 | 2,33 | 8,00 |
| 8 | Chooz | 62,00 | 50,00 | 8,20 | 3,80 | | 5,00 |
| 10 | Gundremminghen | 32,14 | 0,01 | 15,85 | 16,07 | 0,20 | 4,00 |
| 11 | Lingen | 16,51 | 1,32 | 4,35 | 10,32 | 0,52 | 2,5 |
| 12 | Obrigheim | 14,90 | 4,80 | 2,40 | 7,70 | | 2,00 |
| 35 | Trino Vercellese | 60,92 | 53,82 | 2,92 | 4,18 | | 7,00 |
| 36 | Garigliano | 24,75 | 9,90 | 4,12 | 10,19 | 0,54 | 7,5 |
| 39 | José Cabrera | 24,27 | 1,59 | 9,45 | 12,21 | 1,02 | 3,00 |
| 40 | S.M. de Garoña | 24,99 | | 15,63 | 4,28 | 5,08 | 0,67 |
| 45 | Beznau | 29,61 | 15,10 | 2,86 | 10,69 | 0,96 | 1,5 |

4.2 Kraftwerke mit Gas-Graphit-Reaktoren

4.2.1 Laständerungen

Die Zeit für einen Kaltstart beträgt im Mittel für die französischen Kraftwerke 20 Stunden; sie konnte für die Reaktoren von Chinon III und Saint-Laurent-des-Eaux auf 5 bis 7 Stunden reduziert werden. Für die englischen Reaktoren des Typs Magnox beträgt die Zeit für den Kaltstart bis zur Synchronisierung der ersten Gruppe 28 Stunden in Trawsfynydd und 96 Stunden in Dungeness A. Als Engpass ist die Kontrolle der Temperaturdifferenzen der internen Konstruktionen zu bezeichnen.

Die normale Anfahrzeit variiert zwischen 2 bis 6 Stunden. Die längsten Zeiten beziehen sich auf Kraftwerke, welche mit Turbogebläsen ausgerüstet sind.

Für die englischen Kraftwerke beträgt der Belastungsanstieg auf die Nennleistung bezogen bei Kaltstart 2%/Min., wenn warm, sind raschere Laständerungen möglich. In den französischen Kraftwerken erreicht der Gradient für die Lasterhöhung teilweise 10%/Min. der Nennlast, wie zum Beispiel im Kraftwerk Bugey.

Für die englischen Kraftwerke kann die technisch mögliche tiefste Belastung Null erreichen, unter der Voraussetzung, dass eine vorgängige Xenon-Konzentration vermieden werden kann. Nur das Kraftwerk von Oldbury kann mit der Last infolge Stabilitätsschwierigkeiten des Dampferzeugers nicht unter 20% hinuntergehen.

Für die französischen Kraftwerke variiert die technisch mögliche tiefste Last zwischen 5% (St-Laurent-des-Eaux) und 20% bei Chinon II, letzteres durch die Beschränkung der Dampftemperatur am Austritt der ND-Turbinen und der Betriebseigenschaften der Gebläse.

4.2.2 Spaltstoffe

Die Brennelemente aus natürlichem Uran der Gas-Graphit-Reaktoren haben gute Eigenschaften, der Ausfall betrug im Durchschnitt weniger als 0,1%.

Es soll daran erinnert werden, dass in den Gas-Graphit-Reaktoren das Brennelement nicht im Reaktor verbleibt, sondern sie werden bei Überschreitung einer gewissen Produktion herausgezogen.

4.2.3 Radioaktive Abfälle

Gleiche Situation, wie sie für die Kraftwerke mit Leichtwasserreaktoren angegeben wurde.

4.2.4 Nichtverfügbarkeit der Kraftwerke

Die Verfügbarkeit eines Kraftwerkes vom Typ Magnox kann im allgemeinen als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Für die englischen Kernkraftwerke variiert der Nichtverfügbarkeitsfaktor zwischen 11% in Berkeley und 35% in Hinkley Point A, die meisten Werke weisen Werte um 15% auf.

Es muss hiezu aber erwähnt werden, dass die obigen Werte die Leistungsreduktionen nicht berücksichtigen, welche durch Oxydation der Eisenkonstruktionen des Reaktors entstehen. Unter der Berücksichtigung der Korrektur der Leistung infolge Oxydation variieren die Werte der englischen Kraftwerke für

die Nichtverfügbarkeit von 16% in Berkeley bis 51% in Oldbury, mit einem Mittel von 38%. Was die Gründe der Ausserbetriebsetzung der Kraftwerke anbelangt (ausser der Lastverminderung durch Oxydation), so sind in fast allen Störfällen weniger als ein Fünftel der Störungen den Nuklearkomponenten zuzuschreiben.

In den französischen Kernkraftwerken sind am meisten Störungen an den Dampferzeugern (Chinon II-III) und an der Vorrichtung für die Erfassung von Umhüllungsbrüchen (Chinon III) aufgetreten. Eine Störung, hervorgerufen durch Schmelzen von Brennstäben, hat den Betrieb des Kraftwerkes Saint-Laurent-des-Eaux während dieses Jahres unterbrochen.

5. Zusammenfassung der Diskussion am Kongress

Die zweckmässige Eingliederung der Kernenergie in die heute bestehenden und sich weiterentwickelnden Strukturen wird zur Hauptaufgabe, die sich der gesamten Elektrizitätswirtschaft und damit auch der UNIPEDE stellt. Die Frage der zweckmässigen Erzeugung von Grundlast, Mittellast und Spitzenlast wird uns dauernd beschäftigen, und die Lösungen werden nicht überall und nicht jederzeit die gleichen sein. Diese Aufgabe ist gerade in der heutigen schnelllebigen Zeit mit all ihrer Unruhe eine besonders schwierige. Die rasche Preisentwicklung auf dem Brennstoffmarkt, die inflationistischen Tendenzen in unserer Volkswirtschaft, sie alle beeinflussen die Ausgestaltung und den Bau unserer Kraftwerke ebenso wie das bisherige rasche Ansteigen der Einheitsleistungen nuklearer Kraftwerke.

Es herrscht Übereinstimmung, dass trotz der weiterhin vorhandenen Tendenz der Entwicklung in der angeführten Richtung, Phasen der Beruhigung und Konsolidierung der erreichten Technik nötig sind. Dies gilt ebenso für Kernkraftwerke wie auch für konventionell-thermische Einheiten. Erst durch Erfahrung im Betrieb und durch ausgereifte und erprobte Konstruktionen erreichen wir die notwendigen Verfügbarkeiten. Dies muss begleitet sein von einem weitgehenden Erfahrungsaustausch unter den Erzeugern und erfordert ebenso eine enge Zusammenarbeit zwischen Erzeugern und der Industrie.

Kosten und Verfügbarkeit unserer Anlagen stehen mit Recht neben den Umweltfragen immer im Vordergrund der planerischen, baulichen und betrieblichen Aspekte. Bei der Kraftwerkauslegung besteht daher die Tendenz zur Vereinfachung, zur weitgehenden Standardisierung zumindest der Komponenten und zu einer vernünftigen Automatisierung, die sich erstrecken kann von einer teilweisen Automatisierung von funktionellen Abläufen und Zusammenhängen bis hin zum vollautomatischen Kraftwerk, je nach Art und Einsatzweise des Kraftwerks.

Die Diskussionen haben ferner deutlich ergeben, dass bei all unseren Bestrebungen in Richtung auf eine perfekte Technik diese nie zum Selbstzweck werden darf, sondern ebenso auf die im Kraftwerk arbeitenden Menschen ausgerichtet werden muss. Nicht der Automat ist der Boss, sondern der Mensch bedient sich der Automatisierung. Doch bedarf dies auch für alle Kraftwerke einer noch verbesserten

Ausbildung und einer fortwährenden Schulung des Personals.

So wird dann ein ebenso wesentlicher Beitrag zur Betriebssicherheit und damit auch zur Erhöhung der Verfüg-

barkeit geleistet werden wie durch eine als ebenso notwendig angesehene systematische Erforschung und statistische Erfassung der Fehler und Störquellen, und dies auch über den nationalen Rahmen hinaus.