

EUR 2735.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER
VERGLEICH EINES 237 MWe ZWEIKREIS-
UND EINES EINKREIS-
SIEDEWASSERKERNKRAFTWERKES

Abschluss-Bericht

1966



Bericht abgefasst von
AEG-Kernenergieanlagen, Frankfurt (Main) - Deutschland und
ALSTHOM-Services des Etudes Nucléaires, Paris - Frankreich

Euratom-Vertrag Nr. 012-62-12 ECIC

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind, oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt ;

keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von DM 10,—	FF 12,50	FB 125	Lit. 1560	Fl. 9,—
------------------------	----------	--------	-----------	---------

verkauft.

Es wird gebeten, bei Bestellungen die EUR-Nummer und den Titel anzugeben, die auf dem Umschlag jedes Berichts aufgeführt sind.

Gedruckt von L. Vanmelle, Gent
Brüssel, März 1966

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 2735.d

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF A 237 MWe DOUBLE-CYCLE AND A SINGLE-CYCLE BOILING-WATER NUCLEAR POWER PLANT - Final Report

European Atomic Energy Community — EURATOM

Report prepared by AEG-Kernenergieanlagen, Frankfurt (Main) - (Germany) and ALSTHOM-Services des Etudes Nucléaires, Paris - (France)

Euratom Contract No. 012-62-12 ECIC

Brussels, March 1966 - 92 Pages - 20 Figures - FB 125

This report gives the results of a study contract between Euratom and the AEG and ALSTHOM companies.

The subject of the study is the technical and economic comparison of two boiling-water nuclear power plants, of 237 MWe net capacity, the one with a double and the other with a single steam cycle.

EUR 2735.d

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF A 237 MWe DOUBLE-CYCLE AND A SINGLE-CYCLE BOILING-WATER NUCLEAR POWER PLANT - Final Report

European Atomic Energy Community — EURATOM

Report prepared by AEG-Kernenergieanlagen, Frankfurt (Main) - (Germany) and ALSTHOM-Services des Etudes Nucléaires, Paris - (France)

Euratom Contract No. 012-62-12 ECIC

Brussels, March 1966 - 92 Pages - 20 Figures - FB 125

This report gives the results of a study contract between Euratom and the AEG and ALSTHOM companies.

The subject of the study is the technical and economic comparison of two boiling-water nuclear power plants, of 237 MWe net capacity, the one with a double and the other with a single steam cycle.

In the technical part of this study, the KRB plant (double cycle) was compared with a single-cycle BWR plant designed by AEG. In the economic part, this latter plant was compared with a double-cycle plant supplied, unlike the KRB, exclusively by AEG.

After this, studies were carried out, first, of the kinetic behaviour of the single cycle BWR reactor and, secondly, of the parameters of the single-cycle BWR plant.

The results of the studies can be summarized as follows :

1. The single-cycle plant is cheaper than the double-cycle by about DM 7.500.000, or 5 % ; similarly, the cost per kWh generated by the former is DM 0,14, or 3,7 %, lower than the double-cycle kWh.
2. The single-cycle BWR is less stable than the double-cycle, from the kinetic standpoint.
3. The optimum feed-water heating temperature of the single-cycle BWR is about 155 °C, which is some 30 °C lower than the temperature specified for the KRB plant.

In the technical part of this study, the KRB plant (double cycle) was compared with a single-cycle BWR plant designed by AEG. In the economic part, this latter plant was compared with a double-cycle plant supplied, unlike the KRB, exclusively by AEG.

After this, studies were carried out, first, of the kinetic behaviour of the single cycle BWR reactor and, secondly, of the parameters of the single-cycle BWR plant.

The results of the studies can be summarized as follows :

1. The single-cycle plant is cheaper than the double-cycle by about DM 7.500.000, or 5 % ; similarly, the cost per kWh generated by the former is DM 0,14, or 3,7 %, lower than the double-cycle kWh.
2. The single-cycle BWR is less stable than the double-cycle, from the kinetic standpoint.
3. The optimum feed-water heating temperature of the single-cycle BWR is about 155 °C, which is some 30 °C lower than the temperature specified for the KRB plant.

EUR 2735.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER
VERGLEICH EINES 237 MWe ZWEIKREIS-
UND EINES EINKREIS-
SIEDEWASSERKERNKRAFTWERKES

Abschluss-Bericht

1966



Bericht abgefasst von
AEG-Kernenergieanlagen, Frankfurt (Main) - Deutschland und
ALSTHOM-Services des Etudes Nucléaires, Paris - Frankreich

Euratom-Vertrag Nr. 012-62-12 ECIC

I n h a l t

	Seite
EINLEITUNG	1
ZUSAMMENFASSUNG	4
I. DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND DEREN ERGEBNISSE	9
1. Auslegung des Einkreis-Siedewasser- reaktors	9
1.1 Physikalische Auslegung	9
1.2 Technische Auslegung	11
1.3 Regelung des Einkreis-Siedewasser- reaktors	16
2. Auslegung des Kernkraftwerkes, ausge- rüstet mit einem Einkreis-Siedewasser- reaktor	19
2.1 Steuerstabantrieb	19
2.2 Schnellabschaltsystem	20
3. Kostenermittlung für das Einkreis- Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk	22
4. Technischer Vergleich	25
4.1 Reaktorkern	25
4.2 Dampf-Grobabscheider	26
4.3 Reaktordruckgefäß	26
4.4 Reaktorregelung	26
4.5 Zwangsumlauf	27
4.6 Frischdampfsystem	27
4.7 Turbine	28
4.8 Kondensator und Kondensatreinigungs- anlage	28
4.9 Speisewasservorwärmung und Reaktor- einspeisung	28
4.10 Hauptkühlkreis	29
4.11 Leistungsregelung	29
4.12 Bypass-Reinigungsanlage	30
4.13 Reaktorgebäude	30
4.14 Vergiftungssystem	30
4.15 Datenzusammenstellung	31

II

	Seite
5. Wirtschaftlicher Vergleich	38
6. Stabilitätsuntersuchungen über das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk	41
6.1 Verhalten bei Änderung der von den Steuerstäben induzierten Reaktivität	42
6.2 Verhalten bei Änderung des Reaktordruckes	43
6.3 Verhalten bei Änderung der Enthalpie des Kühlmittels am Kanaleintritt	44
6.4 Verhalten bei Änderung des Kühlmitteldurchsatzes am Kanaleintritt	45
6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	46
7. Parameterstudien über den Einkreis-Siedewasserreaktor	47
7.1 Änderung der thermischen Reaktorleistung	47
7.2 Änderung des mittleren Dampfblasen-gehaltes im Reaktorkern	48
7.3 Änderung des Abbrandes	49
7.4 Änderung der Anfangsanreicherung des Gleichgewichtsbrennstoffes	50
7.5 Änderung der Brennstoffkosten	50
7.6 Änderung der burn-out-Sicherheit	54
7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	56
8. Kritische Betrachtung über die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors	58
II. ÄNDERUNGEN IM STAND DER SIEDEWASSERREAKTOR-TECHNIK	62
1. Kreislaufsystem	62
2. Physikalische und thermodynamische Kernausslegung	63
3. Konstruktive Kernausslegung	64
4. Berechnungsverfahren	65
5. Reaktordruckgefäß und Sicherheitsbehälter	66
6. Prozeßrechner	67
7. Datenliste	68

III. ABBILDUNGEN

- Abb. 1 Leistungsdichte im Brennelementbündel
- Abb. 2 Therm. Neutronenfluß im Reaktorkern
- Abb. 3 Verteilung der burn-out-Sicherheit
- Abb. 4 Siedewasserreaktor mit Zwangsumlauf
- Abb. 5 Rohrleitungsschaltplan für den nuklearen Teil
- Abb. 6 Wärmebilanz Vollast 100 %
- Abb. 7 Verhalten des Kanals bei Änderung der äußeren Reaktivität
- Abb. 8 Verhalten des Kanals bei Änderung des Reaktor-druckes
- Abb. 9 Verhalten des Kanals bei Änderung der Enthalpie des Kühlmittels am Kanaleintritt
- Abb. 10 Verhalten des Kanals bei Änderung des Kühlmitteldurchsatzes am Kanaleintritt
- Abb. 11 Thermische Reaktorleistung als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 12 Mittlerer Dampfblasengehalt als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 13 Anfangsanreicherung als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 14 Endanreicherung im Gleichgewichtskern als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 15 Plutoniumgehalt im bestrahlten Brennstoff als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 16 Urangehalt im bestrahlten Brennstoff als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 17 Brennstoffkosten als Funktion von X_s und T_r
- Abb. 18 Radiale Verteilung der minimalen burn-out-Sicherheit und der Kühlmiteleintrittsgeschwindigkeit
- Abb. 19 Burn-out-Verhältnisse im heißen Kanal
- Abb. 20 Abhängigkeit der Kapital- und Brennstoffkosten von der Speisewasservorwärmtemperatur T_r

EINLEITUNG

Den Untersuchungen im Rahmen des von der Europäischen Atomgemeinschaft an die Firmen ALSTHOM-Services d' Etudes Nucléaires und AEG-Kernenergieanlagen vergebenen Studienvertrages Nr. 012 - 62 - 12 ECIC war das Ziel gesetzt, die grundlegenden Unterschiede zwischen einem Kernkraftwerk, ausgerüstet mit einem Zweikreis-Siedewasserreaktor, und einem solchen, ausgerüstet mit einem Einkreis-Siedewasserreaktor, aufzuzeigen und anhand dessen zum besseren Verständnis der technischen Probleme des Einkreis-Siedewasserreaktors beizutragen.

Aus diesem Grunde sollte ein technischer und wirtschaftlicher Vergleich beider Kraftwerkstypen auf der Basis gleicher elektrischer Nettoleistungen durchgeführt und sowohl der Einfluß einer Variation zweier wesentlicher Anlagenparameter auf den Einkreis-Siedewasserreaktor als auch das Stabilitätsverhalten des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes untersucht werden.

Als Grundlage dieser Arbeiten wurde einerseits das sowohl der Europäischen Atomgemeinschaft als auch den Auftragnehmern bekannt 237-MW_e-Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk der Kernkraftwerk RWE-Bayernwerk GmbH (KRB), das von der Firmengemeinschaft General Electric (GE) - AEG - Hochtief (HT) in Gundremmingen an der Donau errichtet wird, und andererseits ein von den Auftragnehmern zu konzipierendes Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk von ebenfalls 237 MW_e Nettoleistung festgelegt.

Die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes sollte so weit geführt werden, daß der Reaktor selbst in allen Einzelheiten bestimmt ist,

Manuskript erhalten am 17. Januar 1966.

während die zugehörigen Hilfskreisläufe, Nebenanlagen und der konventionelle Teil nur dann und nur so weit in die Untersuchungen einzubeziehen waren, wenn bzw. wie ihr genereller Aufbau im Vergleich zu den entsprechenden Anlagen des KRB-Kernkraftwerkes wesentlich abweicht. Es sollten weiterhin die Anlagekosten des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes ermittelt und denen des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes gegenübergestellt sowie die Stromgestehungskosten beider Kernkraftwerke auf gleicher Basis, d. h. mit derselben Rechenmethode und mit denselben Voraussetzungen und Annahmen berechnet werden.

Anhand des von den Auftragnehmern konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes sollten die Auswirkungen von Änderungen des Dampfgehaltes am Reaktorkern-Austritt und der Speisewasservorwärmtemperatur auf den Einkreis-Siedewasserreaktor, insbesondere auf dessen Kerngeometrie, hinsichtlich seiner optimalen Auslegung eingehend untersucht und eventuell sich daraus ergebende Änderungen in den Anlage- und Brennstoffkosten abgeschätzt werden. Desweiteren gehörte zu den durchzuführenden Arbeiten eine Studie über das Stabilitätsverhalten sowohl des Reaktors als auch des Kernkraftwerkes als Gesamtes.

Die sich aus der Aufgabenstellung dieses Studienvertrages ergebenden einzelnen Untersuchungen wurden wie folgt zwischen den Auftragnehmern aufgeteilt:

AEG:

- Auslegung eines Einkreis-Siedewasserreaktors
- Auslegung des Kernkraftwerkes, ausgerüstet mit einem Einkreis-Siedewasserreaktor
- Kostenermittlung für das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

- Technischer Vergleich
 - Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk /
 - Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk
- Wirtschaftlicher Vergleich
 - Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk /
 - Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

ALSTHOM:

- Stabilitätsuntersuchungen über das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk
- Parameterstudien über den Einkreis-Siedewasserreaktor

Der vorliegende Bericht, letzter von den insgesamt fünf von den Auftragnehmern erstellten Berichten

- Technischer Vergleich
- Wirtschaftlicher Vergleich
- Dynamische Studien
- Parameter-Studien
- Zusammenfassung

enthält zusammenfassend einen Überblick über die tatsächlich durchgeführten Arbeiten und die dabei gewonnenen Ergebnisse sowie eine kritische Betrachtung der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors im Hinblick auf die bei den Parameterstudien und Stabilitätsuntersuchungen gefundenen Einflüsse.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors wurde in besonders ausführlicher und detaillierter Form durchgeführt, so daß entsprechend der in der Einleitung beschriebenen Aufgabenstellung alle Merkmale und Charakteristiken dieses Reaktortyps in verständlicher und klarer Weise aufgezeigt werden konnten. Bei der Auslegung der übrigen Kraftwerksanlage und der zum Reaktor gehörenden Hilfssysteme wurde soweit wie möglich auf das aus den Projektunterlagen her bekannte KRB-Kernkraftwerk zurückgegriffen.

Bei der Beschaffung der Details zeigten sich jedoch Schwierigkeiten, die bei Abschluß des Studienvertrages nicht bekannt waren bzw. nicht berücksichtigt wurden. Die Ursachen dieser Schwierigkeiten sind darin begründet, daß einerseits die Untersuchungen im Rahmen dieses Studienvertrages zu einem Zeitpunkt durchgeführt worden sind, als für das KRB-Kernkraftwerk die Planung bis in die letzten Einzelheiten noch nicht abgeschlossen war, und daß andererseits die Errichtung des Kernkraftwerkes in den Händen einer Firmengemeinschaft, bestehend aus den Firmen General Electric, Hochtief und Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, liegt.

Aus der ersten Tatsache resultierten zu jener Zeit gewisse Unkenntnisse hinsichtlich der Auslegung und Konstruktion einiger GE-Anlagekomponenten. Die zweite Tatsache bedeutete, daß die Zusammensetzung der für den entsprechenden Lieferumfang abgegebenen Gesamtpreise der beiden Firmen GE und Hochtief nicht in Einzelheiten bekannt wurde.

Beide Umstände machten es letztlich notwendig, die gestellte Aufgabe eines technischen und wirtschaft-

lichen Vergleiches der beiden Kernkraftwerkstypen ein wenig zu modifizieren bzw. beim wirtschaftlichen Vergleich sogar einen völlig anderen Weg einzuschlagen, um wenigstens die Tendenz der Anlagenpreise und Stromgestehungskosten dieser zwei unterschiedlichen Kernkraftwerkstypen aufzuzeigen.

Als wesentlichstes Ergebnis des technischen Vergleiches kann die Demonstration erstens des Einflusses der Sekundärdampferzeuger auf den thermischen Wirkungsgrad und damit auf die thermische Reaktorleistung des Zweikreis-Siedewasserreaktors und zweitens des unterschiedlichen Regelverhaltens der beiden Kernkraftwerkstypen betrachtet werden.

Für den wirtschaftlichen Vergleich wurde eine vollkommen neue, von KRB unabhängige Basis geschaffen. Dies geschah in der Weise, daß das für den technischen Vergleich konzipierte Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk mit den gleichen Voraussetzungen wie KRB bezüglich Standort etc. so kalkuliert wurde, als wenn es von der AEG als Einzelunternehmer errichtet werden würde. Auf der Basis des so gewonnenen Anlagenpreises konnten anhand der technischen Unterschiede der Anlagenkomponenten von Einkreis- und Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk Mehr- und Minderkosten ermittelt werden, die summiert schließlich auf den Preis des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes führten. Die Stromgestehungskostenberechnung, die den zweiten Teil des wirtschaftlichen Vergleiches bildete, konnte auf der Grundlage der KRB-Stromgestehungskostenrechnung mit den zugehörigen Annahmen aufgebaut werden. Allerdings wurde auch in diesem Teil der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, um die objektive Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu wahren, auf den in diesen Untersuchungen ermittelten Preis für das

Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk zurückgegriffen, d.h. die berechneten Stromgestehungskosten für dieses Kernkraftwerk sind nicht identisch mit den KRB-Stromgestehungskosten.

Das Ergebnis des wirtschaftlichen Vergleiches besteht im wesentlichen einerseits neben dem zahlenmäßig ermittelten Mehrpreis des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes in den Mehr- bzw. Minderkosten der einzelnen Anlagenkomponenten des einen Kernkraftwerkstyps gegenüber dem anderen und andererseits in den Brennstoffkosten, in denen sich der etwas geringere Wirkungsgrad des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes widerspiegelt.

Der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors schlossen sich parallel zum technischen und wirtschaftlichen Vergleich Untersuchungen über das dynamische Verhalten und über den Einfluß des Dampfgehaltes am Reaktorkernaustritt und der Speisewasservorwärmtemperatur an.

Die Stabilitätsuntersuchungen, die entsprechend der ursprünglichen Aufgabenstellung für den Reaktorkern, den Dampfkreislauf und die gesamte Kernkraftwerksanlage durchgeführt werden sollten, wurden schon vor Beginn, d.h. während der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors um die letzten beiden Teiluntersuchungen reduziert. Das geschah, um mit den dadurch freiwerdenden Geldmitteln die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors durch eine genaue Berechnung der Neutronenflußverteilung im Anfangskern zu ergänzen bzw. zu verbessern.

Die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen des Reaktorkerns zeigten, daß der konzipierte Einkreis-Siedewasserreaktor mit seiner Reaktorregelung durch Steuerstäbe in allen Betriebsbereichen stabil bleibt.

Die Untersuchungen des Einflusses von Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt und Speisewasservorwärmtemperatur auf den Einkreis-Siedewasserreaktor wurden besonders für den Reaktorkern durchgeführt, um die Veränderung der Brennstoffkosten und der minimalen burn-out-Sicherheit in Abhängigkeit der zwei Parameter zu studieren. Als umfassendes Ergebnis dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß in dem betrachteten Bereich der Einfluß der beiden Parameter sowohl auf die Brennstoffkosten als auch auf die burn-out-Sicherheit in absoluten Zahlen ausgedrückt sehr gering ist.

Den Abschluß der Arbeiten im Rahmen dieses Vertrages bildete eine kritische Betrachtung der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors unter dem Gesichtspunkt des wirtschaftlichen Optimums, d.h. der geringsten Stromgestehungskosten der gesamten Kernkraftwerksanlage. Dazu wurden die Kapitalkosten als Funktion der Speisewasservorwärmtemperatur bei konstantem Dampfgehalt grob abgeschätzt und den in den Parameterstudien ermittelten Brennstoffkosten gegenübergestellt.

Die Summenkurve aus Brennstoff- und Kapitalkosten zeigte ein Minimum bei einer Speisewasservorwärmtemperatur etwa zwischen 160°C und 150°C .

Ähnliche Untersuchungen über die optimale Speisewassertemperatur bei Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerken, die im anderen Zusammenhang bei der AEG durchgeführt worden sind, führten zum selben Ergebnis.

Bezogen auf die zu Beginn der Arbeiten erfolgte Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors heißt das, daß die gewählte Speisewassertemperatur von 187°C bei dem gegebenen Lastfaktor und im Rahmen der durch die vereinfachenden Annahmen und Voraussetzungen erzielbaren Genauigkeit der durchgeführten Untersuchungen um etwa

30°C zu hoch liegt, was einem Äquivalent in den Anlagekosten von etwa 1 000 000,-- DM entspricht.

I. DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND DEREN ERGEBNISSE

1. Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors

Die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors sowohl in physikalischer wie in technischer Hinsicht bildete den Ausgangspunkt aller weiteren Arbeiten (siehe auch Bericht Nr. 1).

1.1 Physikalische Auslegung

Im Hinblick auf eine gute Vergleichsmöglichkeit mit dem KRB-Reaktor schien es zweckmäßig, die Reaktorkernkomponenten der GE, soweit sie bekannt waren, ungeändert zu übernehmen und lediglich da Änderungen vorzunehmen, wo es aus technischen und wirtschaftlichen Gründen notwendig war.

Für die im Rahmen der physikalischen Auslegung durchzuführenden Rechnungen wurde deshalb die gleiche Reaktorkerngeometrie und Brennelementanordnung, wie sie dem KRB-Reaktor zu Beginn dieser Arbeiten im Frühjahr 1963 zugrunde lag, verwendet.

Bei den ersten Auslegungsrechnungen wurde davon ausgegangen, daß Leistungsverteilung und Heißstellenfaktor von bekannten Siedewasserreaktoren (Kahl, Dresden) übernommen und damit die thermisch-hydraulische Berechnung von der physikalischen separiert werden kann.

Den Rechnungen wurden zwei verschiedene Neutronenflußverteilungen zugrunde gelegt, die mit Fall 1 und Fall 2 bezeichnet sind. Fall 1 ist eine realistische Verteilung, die an einem Siedewasserreaktor gemessen wurde; Fall 2 ist eine sehr unrealistische Verteilung, die sich bei Einfahren einer Bank von Steuerstäben einstellt.

Aufgrund der Ergebnisse einiger Umlaufrechnungen mit diesen zwei angenommenen Neutronenflußverteilungen wurden zunächst zwei verschiedene Einkreis-Siedewasserreaktoren ausgelegt. Die erste Auslegung basierte auf der Annahme fehlender Kühlmittelmischung und resultierte in dem relativ hohen Kühlmitteldurchsatz von 20 000 t/h, der um ca. 70 % über dem von KRB liegt. Die zweite Auslegung mit vollständiger Kühlmittelmischung ergab einen Kühlmitteldurchsatz von 15 600 t/h, der mit Hilfe von drei Umwälzschleifen aufrecht erhalten werden sollte. Diese Auslegung gewährleistete eine minimale burn-out-Sicherheit von mehr als 1,5.

Die Speisewassertemperatur wurde in beiden Fällen mit 180 °C in die Mitte des untersuchten Bereiches gelegt.

Nach Diskussion dieser zwei verschiedenen Auslegungen und aufgrund der starken Abhängigkeit der Auslegungsparameter von der Neutronenflußverteilung und dem Grad der Kühlmittelmischung erschien es der Europäischen Atomgemeinschaft angebracht, zu fordern, daß für eine endgültige Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors die bisher angenommenen zwei Neutronenflußverteilungen durch eine für den frischen Anfangskern exakt berechnete ersetzt wird. Ebenfalls ersetzt werden sollte die auf Messungen an Einzelstäben beruhende burn-out-Berechnungsgrundlage, wobei die neuesten, seinerzeit bekanntgewordenen Ergebnisse für die burn-out-Beziehung zu berücksichtigen waren.

Die Forderung nach der exakten Berechnung der Neutronenflußverteilung, die einen zusätzlichen, im Vertrag nicht vorgesehenen Mehraufwand an Personal- und Rechenmaschinenkosten bedingte, machte es erforderlich, einen Teil der anderen zum Vertrag gehörenden Untersuchungen zu streichen, um den gesteckten Rah-

men der zur Verfügung stehenden Geldmittel nicht zu überschreiten. Es wurde daher zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und den Auftragnehmern vereinbart, auf die bei der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors erforderlichen Stabilitätsuntersuchungen sowie auf die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Dampfkreislaufes und der Gesamtanlage bei den Stabilitätsuntersuchungen des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes zugunsten der Neutronenflußberechnung zu verzichten.

Die exakte physikalische Berechnung der Neutronenflußverteilung führte zur endgültigen Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors (siehe Abb. 1,2,3). Sie zeigte ferner, daß die für die ersten Umlaufrechnungen mit angenommenen Flußverteilungen zugrunde gelegten Annahmen gerechtfertigt waren.

Die Reduzierung der Reaktorleistung von $801 \text{ MW}_{\text{th}}$ auf $760 \text{ MW}_{\text{th}}$ machte trotz Erhöhung der Speisewassertemperatur auf $187 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber der vorläufigen Auslegung eine weitere Senkung des Kühlmittelumlaufes auf $15 \text{ } 100 \text{ t/h}$ möglich.

1.2 Technische Auslegung

Im Anschluß an die physikalische Auslegung des Reaktorkerns erfolgte die technische Durchplanung des gesamten Reaktors. Dies erwies sich als notwendig, da zu diesem Zeitpunkt noch ein Teil der von der GE für KRB zu liefernden Reaktor-Anlagekomponenten wie z. B. Reaktordruckgefäß, Reaktorkerneinbauten, Dampfscheider usw. weder in bezug auf die technische Auslegung und Konstruktion noch in bezug auf die Kosten bekannt waren. Beides stellten jedoch Voraussetzungen dar, die für den technischen und wirtschaftlichen Ver-

gleich grundlegende Bedeutung hatten.

1.2.1 Reaktordruckgefäß

Der Auslegung des Reaktordruckgefäßes (siehe Abb. 4) wurden die gültigen deutschen Vorschriften und Richtlinien wie Werkstoff- und Bauvorschriften, AD-Merkblätter und DIN-Normen zugrunde gelegt, die auch bei der Auslegung des KRB-Druckgefäßes zur Anwendung gekommen sind.

1.2.2 Reaktordruckgefäß-Einbauten

- Brennstoffelemente

36 Brennstoffstäbe, angeordnet in einem quadratischen Gitter von 6 x 6 Stäben, wurden, wie beim KRB-Reaktor, zu einem Brennstoffelement, das von einem Kasten aus Zirkaloy umgeben ist, zusammengefaßt.

Die einzelnen Brennstoffstäbe bestehen aus Rohren (rostfreier Stahl), die den Brennstoff in Form von Sinterkörpern aus Urandioxyd enthalten. Die Wahl der Hüllwandstärke zu 0,3 mm erfolgt in Anlehnung an KRB. Maßgebend für diese Wandstärke sind die Spannungen, die sich aus dem Herstellungsprozeß, dem auftretenden Spaltgasdruck, Temperaturwechseln und Temperaturgradienten sowie durch Einwirkungen der Brennstoffsinterkörper auf die Hülle ergeben. Der Reaktordruck hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Wandstärke, da sich die Hüllen auf den Sinterkörpern abstützen.

- Steuerstäbe

Die 89 kreuzförmigen Steuerstäbe für den Reaktorkern sind analog zu denen der KRB-Anlage ausgelegt worden.

- Neutronenquelle

Zum sicheren Anfahren des Reaktors sind fünf Quellen vorgesehen, die im Inneren des Reaktorkernes zwischen den Brennstoffelementkästen diagonal gegenüber den Steuerstäben angeordnet sind. Die zugehörigen Zählgeräte befinden sich außerhalb des Reaktordruckgefäßes im Beton der biologischen Abschirmung.

- Kerneinbauten

Der Reaktorkern und der ihn umgebende Kernmantel sind auf einem Kerntraggitter aufgelagert, das sich über Tragring und Konsolen an der Druckgefäßwand abstützt. Neben der tragenden Funktion dient dieses Gitter zusammen mit dem oberen Kerngitter der genauen Abstandshaltung der Brennstoffelementkästen, die zu einer sicheren Steuerstabführung erforderlich ist. Zwischen das obere und untere Gitter wird der sogenannte Kernmantel, ein längsnahtgeschweißter Zylinder, eingesetzt, der eine starre und genaue Verbindung zwischen den beiden Gittern herstellt. Das untere Ende des Kernmantels ist durch Absperrbleche mit dem Druckgefäß verbunden, die einen Kurzschluß der Zwangsumlaufpumpen verhindern.

In das Kerntraggitter werden von oben kastenförmige Steuerstabführungen eingehängt, die dafür sorgen, daß die Steuerstäbe zwischen den Antriebsstützen im

Druckgefäßboden und dem Kerntraggitter geführt werden. Innerhalb des Reaktorkernes erfolgt die Führung der Steuerstäbe durch die benachbarten Brennstoffelementkästen. Auf nicht durch Steuerstäbe besetzte Zwischenplätze werden für den Anfangskern Vergiftungsbleche eingehängt, die an den Brennstoffelementkästen befestigt sind.

- Dampf-Grobabscheider

Der Dampf-Grobabscheider besteht im wesentlichen aus vertikal angeordneten Zyklonen, in die das Dampfwassergemisch mit einer ausreichend hohen Geschwindigkeit tangential eintritt. Durch die Wirkung der Zentrifugalkraft sammelt sich der Dampf im Zentrum des Zyklons und strömt nach oben, während das Wasser durch den unteren Abströmteil in den Rückströmraum fließt.

- Dampf-Feinabscheider

Dem aus dem Dampf-Grobabscheider (Zyklone) austretenden Dampf mit einer maximalen Feuchtigkeit von ca. 5 % wird durch mehrmaliges Umlenken an vertikal im Deckel des Druckgefäßes angeordneten Leitblechen die restliche Feuchtigkeit nahezu vollständig entzogen.

- Kondensatverteiler

Über den Kondensatverteiler, der im oberen Teil des Rückströmraumes angeordnet ist, wird das Speisewasser dem umlaufenden Reaktorwasser zugegeben. Die Anordnung der Bohrungen, durch die das Speisewasser aus dem Verteilerring austritt, gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung über den Umfang des Rückströmraumes.

- Einbauten zur Kernnotkühlung

Beim maximal denkbaren Unfall, verbunden mit einem totalen Auslaufen des Reaktorwassers, übernimmt der oberhalb des Reaktorkernes angeordnete Sprühhing die Notkühlung des Kernes und verhindert ein Schmelzen der Brennstoffelemente. Um eine hohe Wirksamkeit der ausgesprühten Wassermenge zu erreichen, ist der Sprühhing so ausgebildet, daß jeweils eine Düse mit schmalen Sprühkegel auf vier Brennstoffelemente gerichtet ist. Dadurch wird vermieden, daß zu große Kühlwassermengen an den Elementkästen unverdampft ablaufen.

- Einbauten zur Kernvergiftung

Zur Sicherheitsabschaltung des Reaktors ist neben dem Steuerstabantriebssystem ein unabhängiges Vergiftungssystem vorgesehen. Neutronenabsorbierende Pentaborat-Lösung kann über einen im Druckgefäßboden angebrachten Verteilerring in das Druckgefäß eingesprüht werden.

- Wärmeschild

Der aus einem zylindrischen Stahlmantel bestehende Wärmeschild schützt das Reaktordruckgefäß in Kernhöhe gegen Gammastrahlen und schnelle Neutronen. Die Auslegung des Wärmeschildes erfolgte aufgrund der zulässigen Wärmespannung in der Druckgefäßwand.

- Einbauten für die Incore-Instrumentierung

Zur Kontrolle der Leistungsverteilung im Reaktor sowie zur Einstellung optimaler Steuerstapelungen wird der Neutronenfluß im Reaktorkern durch Meßinstrumente dauernd verfolgt. Zur Aufnahme die-

ser Instrumente sind an 20 Stellen druckfeste Führungsrohre vom Reaktordruckgefäßboden her in den Reaktorkern eingebracht. Die Führungsrohre sitzen an den Stellen zwischen den Brennstoffelementkästen, die nicht von Steuerstäben besetzt sind.

1.3 Regelung des Einkreis-Siedewasserreaktors

Die Regelung des Einkreis-Siedewasserreaktors wurde in einer eingehenden theoretischen Untersuchung betrachtet. Es wurde weiterhin, soweit es der Umfang dieser Studie zuließ, eine überschlägige Auslegung und die Berechnung einiger Regelfälle durchgeführt.

Alle Methoden zur Regelung und Steuerung basieren auf einer Beeinflussung der Reaktivität des Reaktors. Es muß dabei unterschieden werden zwischen Reaktivitätsänderungen, die direkt von außen in den Reaktorkern eingebracht werden, und Reaktivitätsänderungen, die bei einer Störung des Reaktorzustandes über Reaktivitätskoeffizienten von innen wirksam werden.

Die wichtigsten Methoden, mit denen beim Siedewasserreaktor die Reaktivität beeinflußt und damit die Leistung gesteuert und geregelt werden kann, sind die Änderungen der Unterkühlung, die Änderung des Kühlmitteldurchsatzes und das Bewegen von neutronenabsorbierenden Steuerstäben.

1.3.1 Unterkühlung

Änderungen der Unterkühlung verschieben bei festgehaltener Steuerstabstellung, konstantem Druck und konstantem Umlauf die Siedegrenze im Reaktorkern,

ändern damit den Dampfblasengehalt und über den Dampfblasenkoeffizienten die Reaktivität. Durch veränderte Leistungserzeugung ändert sich der Dampfblasengehalt so weit, bis die Reaktivität wieder den Wert Null annimmt.

Eine Reduzierung der Unterkühlung (Leistungsabnahme) verändert den Austrittsdampfblasengehalt nur unwesentlich und verschiebt daher das Neutronenflußmaximum im Kern nach oben. Dabei wird die Neutronenflußverteilung auch in horizontaler Richtung, allerdings relativ geringfügig, gestört. Das Verhältnis von Leistungsmaximum zu Leistungsmittelwert nimmt mit abnehmender Leistung ab.

1.3.2 Umlauf

Eine Änderung des Kühlmitteldurchsatzes durch den Reaktorkern verändert die Verweilzeit der Dampfblasen im Kern und damit den mittleren Dampfblasengehalt. Analog zur Unterkühlungsänderung wird durch die Wirkung des Dampfblasenkoeffizienten eine Reaktivitätsänderung verursacht, die zu einer entsprechenden Veränderung des Neutronenflusses führt. Die aus den Brennstoffelementen abfließende Wärmemenge folgt mit kurzer Verzögerung mit gleicher Tendenz. Der Vorgang erreicht einen stationären Endwert, wenn die aus den Brennstoffstäben abfließende Wärme den Dampfblasengehalt so weit verändert hat, daß die Reaktivität wieder den Wert Null erreicht.

Im Gegensatz zur Unterkühlung nimmt mit abnehmender Durchflußmenge (Leistungsabsenkung) der Austrittsdampfblasengehalt während des Übergangsverhaltens beträchtlich zu. Die Flußspitze wird dabei nach unten gedrückt und das Verhältnis von Leistungsmaximum

zu Leistungsmittelwert nimmt zu. Die minimale burn-out-Sicherheit zeigt bei schneller Leistungsabsenkung einen kurzen Abfall durch die schnelle Zunahme des Dampfblasengehaltes und steigt dann über den Ausgangswert hinaus an. Nach Abklingen der Transienten ist die Dampfblasen- und Leistungsverteilung praktisch wieder gleich der Ausgangsverteilung.

1.3.3 Steuerstäbe

Steuerstäbe gestatten auf Grund ihrer hohen Reaktivitätswirkung Leistungsänderungen über den gesamten Leistungsbereich, Große Laständerungen erfordern die Bewegung vieler Steuerstäbe zur Einstellung optimaler und sicherer Leistungsverteilungen. Die Stäbe beeinflussen die Neutronenflußverteilung lokal. Relativ geringe Unterschiede in der Stabanordnung können zu einer merklichen Verschiebung der Leistungsverteilung führen.

Die maximal erzielbare Leistungsänderung wird durch die Forderung nach sicherer Beherrschung des Reglerfalles bestimmt, d.h. durch die maximal zulässige Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit. Dies setzt der Zahl und Geschwindigkeit der an die Regelung angeschlossenen Steuerstäbe gewisse Grenzen.

2. Auslegung des Kernkraftwerkes, ausgerüstet mit einem Einkreis-Siedewasserreaktor

Bei der Auslegung des Kernkraftwerkes wurde entsprechend der Aufgabenstellung soweit wie möglich auf das KRB-Kernkraftwerk zurückgegriffen. So wurde z.B. der Standort sowie die Anordnung und Größe der zur Kraftwerksanlage gehörenden Gebäude nicht geändert, obwohl sich beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk durch den Fortfall und die Umdimensionierung einiger Anlagekomponenten zum Teil etwas andere Raumanforderungen ergeben als beim Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk (s. auch Bericht Nr. 1).

Modifikationen wurden nur dort vorgenommen, wo die neue Reaktorauslegung zu entscheidenden und sowohl in technischer als auch in kostenmäßiger Hinsicht klar erfassbaren Abweichungen führte, bzw. wo auf Grund der seiner Zeit noch nicht bekannten Auslegung von GE-Anlagekomponenten AEG-eigene Konzeptionen eingeplant werden mußten (s. Abb. 5). Dies war z.B. der Fall bei den Steuerstabantrieben, dem Schnellabschaltsystem und, wie bereits beschrieben, bei den einzelnen Reaktorkomponenten.

2.1 Steuerstabantrieb

Der im normalen Betrieb für das Ein- und Ausfahren der Steuerstäbe zuständige elektro-mechanische Antrieb besteht aus einer routierenden Schraubenspindel mit axial verstellbarer Gewindemutter, auf welcher ein für die Schnellabschaltung benötigter Hohlkolben sitzt, der die Regelbewegung auf den Steuerstab überträgt. Am unteren Teil der Gewindespindel befindet sich an der Verlängerungswelle eine Dichtung zur Absperrung des Reaktorwassers gegen den unteren Teil des Steuerstabantriebes.

Bei Schnellabschaltung tritt unter dem Druck eines Stickstoffpolsters stehendes Wasser, das in einem Druckspeicher bereitgehalten wird, in das Antriebsgehäuse unter den Hohlkolben, so daß dieser von der Gewindemutter abgehoben und zusammen mit dem Steuerstab mit großer Geschwindigkeit nach oben bewegt wird. Am Ende des Weges werden die bewegten Massen durch eine Tellerfedersäule und einen progressiv ansteigenden Gegendruck im oberen Teil des Antriebsgehäuses abgebremst.

Nach der Schnellabschaltung herrscht unter dem Hohlkolben lange genug ein ausreichender Druck, um den Steuerstab in der obersten Position so lange zu halten, bis die Gewindemutter mit der normalen Regelgeschwindigkeit dem Hohlkolben gefolgt ist und die Verbindung des Gestänges wieder hergestellt hat. Zusätzlich ist eine mechanische Verriegelung vorhanden. Vor der Abwärtsbewegung des Steuerstabes mit Hilfe des Spindelmutternantriebes muß der unter dem Hohlkolben herrschende Treibdruck durch Spaltverluste abgebaut und die mechanische Verriegelung des Hohlkolbens gelöst sein.

2.2 Schnellabschaltsystem

Um den Reaktor im Gefahrenfall aus jedem Betriebszustand schnell und sicher abschalten zu können, werden alle Steuerstäbe gleichzeitig in den Reaktorkern eingeschossen. Die Auslösung hierfür erfolgt durch das Reaktorsicherheitssystem bzw. durch Handauslösung.

Die für das Einschießen der Steuerstäbe erforderliche Energie wird im Schnellabschaltsystem für jeden einzelnen Steuerstab getrennt bereitgehalten. Das Schnellabschaltsystem besteht für jeden Steuerstab im wesentlichen aus einem Druckspeicher, dessen Speiseleitung, der Zuleitung zum Steuerstabantrieb und zwei elektropneumatisch vorgesteuerten, hydraulisch betätigten Schnellabschaltventilen.

Die Druckspeicher, die unter einem Druck von ca. 110 atü stehen, sind zu etwa 20 % mit Wasser und zu etwa 80 % mit Stickstoff gefüllt, der von einer elastischen Blase umschlossen wird, um sein Lösen in Wasser zu verhindern. Von einer Stickstoffflaschenbatterie wird die Speicherblase über einen Anschluß ständig auf Druck gehalten.

3. Kostenermittlung für das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

Die Kostenermittlung für das Kernkraftwerk, ausgerüstet mit einem Einkreis-Siedewasserreaktor, erfolgte auf der gleichen Basis, wie sie für die Anlagenkomponenten durchgeführt worden ist, die von der AEG im Rahmen der Errichtung des Kernkraftwerkes KRB geliefert werden. Diese Basis beinhaltet im wesentlichen den Standort (Gundremmingen/Donau), den Lieferumfang (schlüsselfertige Errichtung), die Behördenauflagen (soweit zur Zeit der Ermittlung bekannt) und die Bauzeit (4 Jahre) (s. auch Bericht Nr. 2).

Die ursprüngliche Aufgabenstellung ließ frei, zur Kostenermittlung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes den bekannten Gesamtpreis des KRB-Kernkraftwerkes als Grundlage zu nehmen und entsprechende Korrekturen in den Positionen durchzuführen, in denen sich infolge der speziellen Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes Preisänderungen ergaben.

Dieses Verfahren erwies sich jedoch aus folgenden Gründen als unzweckmäßig:

- wie bereits erwähnt, waren bei Durchführung dieser Untersuchungen noch nicht alle Auslegungsdetails der von der GE zu liefernden Anlagekomponenten bekannt. Das gleiche galt für die Preisaufteilung des GE-Lieferumfangs. Allein schon aus diesem Grunde wäre eine Kostenermittlung nach dem oben angeführten Verfahren zum Scheitern verurteilt gewesen.
- der Gesamtpreis für das KRB-Kernkraftwerk ist entsprechend dem Lieferumfang der drei an der Erstellung des Kraftwerkes beteiligten Firmen GE, HT und AEG aus einem amerikanischen und zwei deutschen Preisen gemischt, der jeder wiederum auf Grund der

Gesellschaftsformen der Firmen auf einer anderen Basis entstanden ist. Diese unterschiedlichen Voraussetzungen hätten eine echte Extrapolation der KRB-Preise unmöglich gemacht.

- seit Abgabe des KRB-Preises und Beginn dieser Untersuchungen war es durch die technische Weiterentwicklung und den konjunkturellen Fortschritt zu wesentlich neueren, günstigeren Preisbildungen im Kernkraftwerksbau gekommen, so daß die Kosten nicht eindeutig auf der gleichen Grundlage ermittelt worden wären.

Nach Herausarbeitung dieser, dem oben angeführten Verfahren anhaftenden Unzulänglichkeiten, wurde mit der Europäischen Atomgemeinschaft vereinbart, den Preis des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes durch eine genaue Kalkulation auf rein deutscher Grundlage mit der eingangs erwähnten Basis zu ermitteln, wobei gleichzeitig die neuesten technischen Erkenntnisse berücksichtigt werden sollten.

Der auf diese Weise gewonnene Anlagenpreis, der einen Festpreis zum Dezember 1963 darstellte, beläuft sich auf 174.500.000,-- DM.

Nuklearer Anlagenteil	67.000.000,-- DM
Konventioneller Anlagenteil	71.000.000,-- DM
Bauteil	36.500.000,-- DM
<hr/>	
Anlagenpreis	174.500.000,-- DM =====

In diesem Preis enthalten sind:

- Planung des gesamten Kernkraftwerkes
- Lieferung und Montage der kompletten nuklearen, konventionellen und elektrotechnischen Anlageteile
- Erstellung des Bauteils
- Vorprüfung der Systeme und Anlageteile

- Kritisches Experiment
- Probetrieb

Nicht in diesem Preis enthalten sind:

- Reaktorkern
- Geländegestellung und Geländeerschließung
- Ausbildung von Betriebspersonal
- Kosten für Genehmigungsverfahren
- Bauzinsen

4. Technischer Vergleich

Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk /
Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

Auf der Grundlage der im Rahmen dieses Vertrages erarbeiteten Unterlagen und Ergebnisse über die Auslegung eines Kernkraftwerkes, ausgerüstet mit einem Einkreis-Siedewasserreaktor, wurde anhand der vorhandenen Projektunterlagen über das KRB-Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk ein technischer Vergleich der beiden Kernkraftwerkstypen ausgearbeitet (s. auch Bericht Nr.1). Eine Gegenüberstellung der wichtigsten Anlagendaten findet sich in der Datenliste am Schluß dieses Abschnittes.

4.1 Reaktorkern

Der Reaktorkern wurde, wie bereits bei der physikalischen Auslegung des Reaktors erwähnt, in bezug auf seine Geometrie ungeändert von KRB übernommen. Unter Zugrundelegung der gleichen burn-out-Sicherheit wie bei KRB und mit den gleichen Annahmen bezüglich der Mischung des Dampfwassergemisches im Brennstoffelement wurde eine Kühlmitteldurchsatzmenge von 15 000 t/h ermittelt. Diese Erhöhung der Kühlmitteldurchsatzmenge um etwa 23 % gegenüber KRB ist bedingt durch die größere Primärdampferzeugungsmenge und durch die geänderte Unterkühlung des in den Reaktorkern eintretenden Speisewassers.

Während bei KRB zur Erzeugung einer elektrischen Nettoleistung von 237 MW 1020 t/h Primärdampf und 449 t/h Sekundärdampf der Turbine zuströmen, werden beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk für die gleiche Leistung nur 1375 t/h Primärdampf benötigt.

Der Fortfall der Sekundärdampferzeuger beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk macht sich damit bezüglich der thermischen Reaktorleistung in einer Reduzierung derselben von 801 MW auf 760 MW und entsprechend in der Verbesserung des Netto-Wirkungsgrades von 29,6 % auf 31,2 % bemerkbar.

4.2 Dampf-Grobabscheider

Die bei KRB verwendeten GE-Dampf-Grobabscheider mit axialer Einströmung von unten wurden beim Einkreis-Siedewasserreaktor durch solche mit tangentialer Einströmung am oberen Ende ersetzt, wie sie im Abschnitt "Technische Auslegung" näher beschrieben sind.

4.3 Reaktordruckgefäß

Die Erhöhung der Kühlmitteldurchsatzmenge von 12 300 t/h bei KRB auf 15 100 t/h beim Einkreis-Siedewasserreaktor bedingt eine Vergrößerung des Rückströmraumes und damit eine Vergrößerung des Reaktordruckgefäß-Innendurchmessers von 3 710 mm auf 3 730 mm.

Der Vergrößerung des Reaktordruckgefäß-Innendurchmessers steht eine Verkürzung des Reaktordruckgefäßes um etwa 3 410 mm gegenüber, die sich durch den Einbau der anderen Dampf-Grobabscheider ergibt.

4.4 Reaktorregelung

Entsprechend den Anforderungen an die Regelung eines Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes war es erforderlich, auch das Regelsystem gegenüber KRB zu ändern. Die bei KRB verwendeten Steuerstäbe mit hydraulischen Antrieben wurden beim Einkreis-Siedewasser-

reaktor durch solche mit elektro-mechanischen Antrieben, wie sie im Abschnitt 2.1 näher beschrieben sind, ersetzt, da mit solchen Antrieben eine feinstufigere und empfindlichere Regelung möglich ist. Die Forderung nach einer sehr sensiblen Regelung beim Einkreis-Siedewasserreaktor ergibt sich aus der Tatsache, daß jede Leistungsänderung des Systems sofort mit einer Verstellung der Steuerstäbe beantwortet werden muß.

4.5 Zwangsumlauf

Für die Umwälzung wurden drei Zwangsumlaufpumpen mit einer Fördermenge von je $6\,770\text{ m}^3/\text{h}$ gegenüber $5\,590\text{ m}^3/\text{h}$ bei KRB vorgesehen. Die Förderhöhe der Zwangsumlaufpumpen konnte durch den Fortfall der Sekundärdampferzeuger von $43,5\text{ m FLS}$ auf 30 m FLS gesenkt werden.

Die Nennweite der zugehörigen Rohrleitungen und Armaturen wurde von NW 600 auf NW 700 erhöht.

4.6 Frischdampfsystem

Der Primärkreislauf beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk ändert sich gegenüber KRB insofern, als die bei KRB vorhandenen Sekundärdampferzeuger und die dazugehörigen Sekundärdampfrohrleitungen und Armaturen entfallen. Entsprechend der größeren Primärdampfmenge von $1\,375\text{ t/h}$ gegenüber $1\,020\text{ t/h}$ bei KRB ist eine Vergrößerung der Frischdampfleitung von NW 600 auf NW 700 notwendig gewesen.

4.7 Turbine

Als Dampfturbinenanlage für das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk ist wie bei KRB ein 1500-touriger Turbosatz vorgesehen. Der Aufbau dieses Turbosatzes entspricht im wesentlichen dem der für KRB konstruierten Maschine. Änderungen ergeben sich lediglich durch den Entfall der Sekundäreinspeisung und durch die entsprechend der Speisewasservorwärmtemperatur geänderte Stufenfolge der Anzapfungen (s. Abb. 6).

4.8 Kondensator und Kondensatreinigungsanlage

Als Folge der kleineren Abdampfmenge von 804 t/h gegenüber 858 t/h bei KRB könnte die Kühlfläche des Kondensators um ca. 6 % verkleinert werden, was jedoch im Hinblick darauf, daß der Turbosatz ungeändert von KRB übernommen wurde, nicht geschehen ist. Stattdessen wurde die Kühlwassermenge von 46 000 m³/h bei KRB auf 45 000 m³/h beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk reduziert.

Die Kondensatreinigungsanlage erfuhr in ihrem Aufbau ebenfalls keine Änderung, wodurch sich infolge des geringeren Durchsatzes die Standzeit der Harze um ca. 7 % vergrößert.

4.9 Speisewasservorwärmung und Reaktoreinspeisung

Die Vorwärmung des Reaktorspeisewassers erfolgt wie bei KRB in einer 5-stufigen Vorwärmanlage. Da jedoch beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk die Wärmesenken in Form der drei Sekundärdampferzeuger nicht vorhanden sind, wird das Reaktorspeisewasser, um eine genügende Unterkühlung im Reaktor zu haben,

nur auf eine Temperatur von 187°C gegenüber 199°C bei KRB vorgewärmt. Entsprechend dieser niedrigeren Temperatur und der kleineren Durchsatzmenge konnte der letzte der fünf Vorwärmer gegenüber KRB etwas verkleinert werden.

Die drei Kondensatpumpen wurden, obwohl die Fördermenge um ca. 7 % kleiner ist als bei KRB, nicht geändert, da diese geringe Mengenänderung innerhalb des Typensprungs des Pumpenmodells liegt.

4.10 Hauptkühlkreis

Die Fördermenge der drei Kühlwasserpumpen reduziert sich von $23\,500\text{ m}^3/\text{h}$ bei KRB auf $23\,000\text{ m}^3/\text{h}$ beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk. Gleichzeitig sinkt die Förderhöhe von 14 mFlS auf 13 mFlS.

4.11 Leistungsregelung

Die Leistungsregelung beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk unterscheidet sich wesentlich von der Leistungsregelung bei KRB, da die Möglichkeit der Lastanpassung über den Sekundärdampfdurchsatz wegfällt. Die Drehzahlregelung der Turbine, die bei KRB den Sekundärdampfdurchsatz und gleichgerichtet dazu in bestimmten Grenzen die Reaktorleistung verändert, beeinflusst beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk den Primärdampfdurchsatz und über den Druck entgegengesetzt die Reaktorleistung, was durch ein Bewegen der Steuerstäbe ausgeglichen werden muß. Die Turbinenregelung für das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk ist demzufolge so aufgebaut, daß die Drehzahlregelung der Turbine den Dampfdurchsatz in der Weise beeinflusst, daß die vom Netz geforderte Leistung bei Nenndrehzahl erzeugt wird.

4.12 Bypass-Reinigungsanlage

Der Durchsatz durch die Bypass-Wasserreinigungsanlage mußte gegenüber KRB um ca. 25 % vergrößert werden. Die Erhöhung des Durchsatzes ergibt sich aus der Summe der Einflüsse zweier gegenläufiger Effekte, die auf dem Wegfall der drei Sekundärdampferzeuger, der Verkleinerung des Reaktordruckgefäßes und der Vergrößerung der Zwangsumlaufleitungen und der Reaktorspeiseleitung beruhen.

4.13 Reaktorgebäude

Das Reaktorgebäude wurde in seiner Grundkonzeption trotz Wegfalls der drei Sekundärdampferzeuger gegenüber KRB nicht geändert, da eine Reihe anderer Kriterien für Höhe und Durchmesser bestimmend sind.

Eine wesentliche Änderung des Sicherheitsbehälters ergibt sich durch die Wahl eines Materials geringerer Festigkeit, aus dem der Stahl-Behälter hergestellt wird. Die Ursache dafür liegt in der um 13 % kleineren Wassermenge beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk, die bei einem Bruch des Primärkreises frei werden kann.

4.14 Vergiftungssystem

Entsprechend der geringeren Wassermenge im Primärkreis beim Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk von 95 t gegenüber 109 t bei KRB kann die bereitzustellende Vergiftungslösungsmenge unter Voraussetzung einer gleichgroßen Konzentration im Reaktorwasser wie bei KRB von $7,5 \text{ m}^3$ bei KRB auf $6,6 \text{ m}^3$ reduziert werden.

4.15 Datenzusammenstellung

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
<u>Kraftwerkshauptdaten</u>			
Elektrische Bruttoleistung	MW	250	
Elektrische Nettoleistung	MW	237	
Thermische Reaktorleistung	MW	801	760
Dampfdruck Austrittsflansch Reaktor	ata	70,3	
Dampfmenge Austrittsflansch Reaktor	t/h	1020	1375
Mittlere Kühlwasserjahres- temperatur	°C	8,2	
Kondensatordruck	ata	0,03	
Speisewasservorwärmtemperatur	°C	199	187
ζ ges	%	31,2	32,9
<u>Anlagedaten</u>			
1. Reaktor			
- Reaktorkern			
aktive Kernhöhe	mm	3660	
äquivalenter Durchmesser	mm	2750	
umschriebener Durchmesser	mm	2900	
Zahl der Brennelement- bündel		368	
Zahl der Steuerstäbe		89	
Zahl der Vergiftungsbleche		-	156
Brennstoff		UO ₂	
Anfangsanreicherung Erstkern norm./spez.	%U ²³⁵	2,72/1,86	
Abbrand Erstkern	MWd/t	16500	
mittlere Leistungsdichte im Kern	MW/m ³	36,9	35,1

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
mittlere spez.-Brennstoffbelastung	MW/t _U	15,7	14,9
mittlere Heizflächenbelastung	W/cm ²	39,5	37,5
maximale Heizflächenbelastung	W/cm ²	115,2	116,3
Unterkühlung am Kerneintritt	kcal/kg	25,7	10,1
Kühlmitteldurchsatz durch den Kern	t/h	12300	15100
mittlere Eintrittsgeschwindigkeit	m/s	1,6	2,05
mittlere Austrittsgeschwindigkeit Wasser	m/s	3,76	4,28
mittlere Austrittsgeschwindigkeit Dampf	m/s	5,92	7,03
mittlerer Dampfblasengehalt im Moderator des Kerns	Vol.-%	20	25,2
mittlerer Dampfblasengehalt am Kernaustritt	Vol.-%	60	56,9
mittlerer Dampfgehalt am Kernaustritt	Gew.-%	8,4	9,47
Umlauffaktor		12,06	10,3
minimale burn-out-Sicherheit			≥ 1,5
Gesamtdruckverlust im Druckgefäß ohne Dampfabscheider	at	1,0	0,45
Gesamtdruckverlust im Druckgefäß mit Dampfabscheider	at	1,76	1,63
- Dampfgröbabscheider (Zyklone)			
Anzahl		69	56
Innendurchmesser	mm	-	170
Abscheidelänge	mm	-	1000
Bauhöhe	mm	1400	1650
Durchsatz je Zyklon	t/h	177	270

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
Druckverlust Dampfgrob- und Dampffeinabscheider	at	0,76	1,18
- Reaktordruckgefäß mit Einbauten			
Druckgefäß:			
Außendurchmesser	mm	3965	4000
Wandstärke	mm	121	129
Plattierung	mm	6,5	6,0
lichte Höhe innen	mm	16400	13000
Gewicht	t	207	165
Kühlwassereintritts- stutzen			
Anzahl			3
Nennweite	mm	600	700
Kühlwasseraustritts- stutzen			
Anzahl			3
Nennweite	mm	600	700
Dampfaustrittsstutzen			
Anzahl			4
Nennweite	mm	300	350
Speisewassereintritts- stutzen			
Anzahl			2
Nennweite	mm	200	250
Thermischer Schild:			
Außendurchmesser	mm	3657	3640
Dicke	mm	25	40
Höhe	mm	5690	4800
Kernmantel:			
Außendurchmesser	mm	3200	3000
Dicke	mm	25,4	16
Höhe	mm	4800	4170
Gesamtgewicht der Ein- bauten	t	ca. 40	ca. 60

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
- Steuerstabantriebe und Schnellabschaltsystem			
Anzahl der Steuerstabantrieb			89
Art des Antriebes			
Regelbewegung		hydraul.	Spindel
Schnellabschätzung		hydraul.	hydraul.
Verfahrbarkeit		stufenw.	kontin.
Anzahl der Schnellabschaltbehälter			89
Treibmedium		Wasser, Stickstoff	
Treibdruck	atü	98,5	110
- Zwangsumlauf			
Zwangsumlaufpumpen			
Anzahl			3
Fördermenge je Pumpe	m ³ /h	5590	6770
Förderhöhe	mFIS	43,5	30
Nennweite der Rohrleitungen	mm	600	700
2. Primärkreis			
- Frischdampfsystem			
Primärdampfleitung, Nennw.	mm	600	700
Anzahl Reaktoraustritt			4
Anzahl Turbineneintritt			2
Nennweite Reaktoraustritt	mm	300	350
Nennweite Turbineneintritt	mm	400	450
Sekundärdampfleitung			
Anzahl Dampferzeuger		3	-
Anzahl Turbineneintritt		2	-
Nennweite Turbineneintritt	mm	350	
- Turbine			
Leistung	MW		250
Drehzahl	min ⁻¹		1500

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
Dampfmenge zur Turbine			
Primärdampf	t/h	1020,6	1375,5
Sekundärdampf	t/h	449,1	-
Dampfdruck am Turbinen- eintritt			
primär	ata		67
sekundär	ata	32,7	-
Dampfzustand am Turbi- neneintritt		satt, trocken x = 0,994	
Zahl der Anzapfungen		5	
Generatorleistung	MVA	317	
Generatorspannung	kV	21 ± 5 %	
Abdampfmenge	t/h	858	804
Endfeuchte	%	9,8	
- Kondensator und Kondensat- reinigungsanlage			
Kondensatorkühlfläche	m ²	18500	
Kühlwassermenge	m ³ /h	46000	45000
mittlere Kühlwasserjahres- temperatur	°C	8,2	
Kondensatordruck	ata	0,03	
Anzahl der Mischbettfilter		5 (1 Reserve)	
Durchsatz je Mischbett- filter	t/h	370	350
Standzeit	ca. h	240	257
- Speisewasservorwärmung und Reaktoreinspeisung			
Anzahl der Vorwärmer		5	
Gesamte Austausch- fläche	ca. m ²	9250	8150
Entnahmen			
1.	ata	16,5	13,0
2.	ata	8,4	8,2
3.	ata	3,6	3,6
4.	ata	1,4	1,4
5.	ata	0,35	0,288

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
Nennweite der Reaktor- einspeiseleitung	mm	450/350	400
Nennweite der Leitung zwischen Druckerhöhungs- pumpen und Vorwärmer	mm	450	400
- Hauptkühlkreis			
Durchsatz	m ³ /h	47000	46000
Pumpen, Anzahl		3 (1 Reserve)	
Fördermenge je	m ³ /h	23500	23000
Förderhöhe	mFlS	14	13
3. Hilfssysteme			
- Notkühlanlage			
Thermische Reaktorleistung	MW	801	760
Wassermenge im Primärkreis	m ³	146	127
Durchsatz	t/h		365
Nennweite der Rohrlei- tungen	mm		200
- Bypassreinigungsanlage			
Durchsatz	t/h	72,5	90
Pumpen, Anzahl			2
Fördermenge je	t/h	36,3	45
Förderhöhe	mFlS	70	80
Mischbettfilter			
Anzahl			2
Durchsatz je	t/h	36,3	45
Harzmenge je	m ³	3,1	3,85
Verhältnis			
Kationen/Anionen			2/1
Anzahl Regenerativwärme- tauscher		2 (1 Baueinheit)	
Anzahl Nichtregenerativ- wärmetauscher			1

	Dim.	Zweikreis- Anlage KRB	Einkreis- Anlage
Durchsatz	t/h	36,3	45
Austauscherfläche			
Regenerativwt.	m ²	148	183
Nichtregenerativwt.	m ²	103,5	128
Feststoffgehalt im Reak- torwasser	ppm	max. 0,5	
Feststoffgehalt am Misch- bettfilteraustritt	ppm	max. 0,05	
4. Sicherheitseinrichtungen			
- Sicherheitsbehälter			
Durchmesser	m	30	
Höhe			
zylindrischer Teil	m	30	
gesamt	m	60	
Auslegungsdruck	atü	4,2	3,6
Wandstärke	mm	26,5	
Material			
Bruchfestigkeit	kg/mm ²	65-80	55-70
Streckgrenze	kg/mm ²	51	43
Anzahl der Rohrleitungs- durchführungen		36	33
- Vergiftungssystem			
Borkonzentration im Reak- torwasser	ppm	1800	
Wassermenge im Primärkreis	m ³	146	127
Erforderliche Vergiftungs- lösungsmenge	m ³	7,5	6,6
Pumpen, Anzahl		2	
Fördermenge je	m ³ /h	22,6	19,7
Förderhöhe	mF15	880	900
Nennweite der Rohrleitun- gen	mm	50	

5. Wirtschaftlicher Vergleich

Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk/
Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

Der wirtschaftliche Vergleich sollte eine Gegenüberstellung der Anlagekosten sowie der Kernkosten der beiden Kraftwerkstypen enthalten. Ferner sollte ein Vergleich der Stromgestehungskosten durchgeführt werden (s. auch Bericht Nr. 2).

Da das ursprünglich vorgesehene Verfahren des wirtschaftlichen Vergleiches aus den in Abschnitt 3. genannten Gründen nicht durchführbar war, wurde der zum Vergleich heranzuziehende Preis des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes auf der Grundlage der technischen Unterschiede zwischen den beiden Kernkraftwerkstypen ermittelt.

Die Mehrkosten für das Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk betragen danach etwa 7.500.000,-- DM, so daß sich ein Anlagenpreis von 182.000.000,-- DM ergibt.

Im einzelnen lassen sich anhand der technischen Unterschiede der beiden Kernkraftwerkstypen folgende Mehraufwendungen oder Minderaufwendungen in den Anlagekomponenten ableiten:

Anlageteil, System	Ein- kreis- Anlage TDM	Zwei- kreis- Anlage TDM	Änderung gegenüber Einkreis- Anlage %	Bemerkungen
1. <u>Reaktor</u>				
Dampfabscheider	648	615	-5,10	
Reaktordruck- gefäß	5.350	5.025	-6,07	
Reaktorregelung und Instrumen- tierung	5.720	7.450	+30,02	
Zwangsumlauf	5.900	5.260	-10,85	
2. <u>Primärkreis</u>				
Frischdampf- system	4.160	9.400	+125,70	Rohrleitungen und Armaturen einschl. Sekundärdampf- erzeuger
Turbosatz	33.800	34.550	+ 2,22	
Speisewasser- vorwärmung u. Reaktoreinspei- sung	6.360	6.990	+ 9,90	Rohrleitungen, Ar- maturen, Pumpen und Vorwärmer
Hauptkühlkreis	2.370	2.410	+ 1,69	
Leistungsregelung	1.050	1.197	+14,00	nur Turbinenregelung und Instrumentierung
3. <u>Hilfssysteme</u>				
Bypassreini- gungsanlage	1.760	1.395	-20,75	
4. <u>Sicherheits- einrichtungen</u>				
Sicherheits- behälter	4.790	5.440	+13,60	
Vergiftungs- system	359	393	+ 9,47	

Die Stromgestehungskostenrechnungen wurden in Analogie zu der dem KRB-Kernkraftwerk zur Zeit der Durchführung dieser Untersuchungen zugrunde liegenden Stromgestehungskostenrechnung mit der seinerzeit bekannten Kernauslegung der GE durchgeführt.

Da die Rechnungen einerseits auf dem durch die Kalkulation gewonnenen Preis für das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk und andererseits auf dem durch Extrapolation über die technischen Unterschiede ermittelten Preis für das Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk basieren, sind die zahlenmäßigen Werte der Stromgestehungskosten nicht identisch mit denen der KRB-Anlage.

	Einkreis- Anlage	Zweikreis- Anlage
Kapitalkosten-Anteil	1,865	1,939
Betriebskosten-Anteil	0,347	0,356
Brennstoffersatzkosten-Anteil	1,114	1,172
Brennstoffeinsatzkapitalkosten-Anteil	0,348	0,347
Stromgestehungskosten Dpf/kWh	3,674	3,814

Diese Zahlen, besonders der Kapitalkosten-Anteil und der Brennstoffersatzkosten-Anteil, verdeutlichen noch einmal den apparativen Mehraufwand des Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes und die mit diesem Mehraufwand verbundenen Wärmeverluste gegenüber dem Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk.

6. Stabilitätsuntersuchungen über das Einkreis-
Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk

Die ursprüngliche Aufgabenstellung sah vor, unter dem Kapitel "Stabilitätsuntersuchungen über das Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk" erstens das dynamische Verhalten des Reaktorkerns, zweitens das dynamische Verhalten des Dampfkreislaufes und drittens das dynamische Verhalten der gesamten Kernkraftwerksanlage zu betrachten. Wie jedoch bereits im Abschnitt 1.1 erwähnt, wurde nach Übereinkunft mit der Europäischen Atomgemeinschaft auf die letzten beiden Untersuchungen verzichtet, um mit den dadurch frei werdenden Geldmitteln die genaue Neutronenflußverteilung im Reaktorkern des Einkreis-Siedewasserreaktors zu berechnen.

Aufbauend auf die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors wurde das dynamische Verhalten des Reaktorkerns, insbesondere die Kinetik der Neutronenvervielfachung, die Wärmeübertragung aus dem Brennstoff und das Verhalten des Kühlmittels untersucht (s. auch Bericht Nr. 3).

Als erstes wurde dazu, zeitlich parallel zur Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors, eine Literaturstudie der neuesten auf dem Gebiet der Kinetik von Siedewasserreaktoren erschienenen Veröffentlichungen durchgeführt. Nach Bewertung der einzelnen sich anbietenden Verfahren hinsichtlich der Verwendbarkeit für die Untersuchungen im Rahmen dieses Vertrages wurden eine Berechnungsmethode und ein Rechenprogramm ausgewählt bzw. ausgearbeitet, die die Grundlage der weiteren Arbeiten bildeten.

Das Programm ist für die Berechnung des dynamischen Verhaltens eines mittleren Kanals des konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktors mit Zwangsumlauf zugeschnitten.

Den Untersuchungen lagen die vier folgenden unabhängigen und in ihrer Form unterschiedlichen Störungen zugrunde:

- Störung der Reaktivität
- Störung des Reaktordruckes
- Störung der Enthalpie (Temperatur) des Kühlmittels am Kanaleintritt
- Störung des Kühlmitteldurchsatzes am Kanaleintritt

6.1 Verhalten bei Änderung der von den Steuerstäben induzierten Reaktivität

Bei der ersten Rechnung wurde davon ausgegangen, daß die Steuerstäbe während 1 Sekunde eine Reaktivitätserhöhung mit der Geschwindigkeit $7 \cdot 10^{-4}/\text{sec}$ einführen. Die Leistung des betrachteten Kanals im Gleichgewichtszustand wird mit 50 kW angesetzt (s. Abb. 7).

Die Ergebnisse dieser Rechnung zeigen:

- Als Folge der sich aufbauenden Gegenreaktivität zunächst durch den Dopplereffekt und später in weitaus stärkerem Maße durch die Dampfblasen erreicht die Gesamtreaktivität des Kernes nach einer Sekunde nur einen Wert von etwa $4 \cdot 10^{-4}$ und fällt dann schnell ab auf weniger als $0,2 \cdot 10^{-4}$ nach 5 Sekunden.
- Die Neutronenleistung erreicht ihren Höchstwert von 8 % nach 1 Sekunde, um danach schnell abzufallen und am Ende von 5 Sekunden einen Gleichgewichtswert von etwa 1,6 % zu erreichen.
- Infolge der thermischen Trägheit der Brennstoffelemente folgt die an das Kühlmittel übertragene Leistung

entsprechend langsamer und erreicht ihren Gleichgewichtswert, ohne diesen zu überschreiten.

- Auch die Temperatur im Zentrum des Brennstoffes, der Dampfdurchsatz am Ende des Kanals und der mittlere Dampfblasengehalt im Kanal steigen auf einen Gleichgewichtswert an, ohne diesen zu überschreiten.

Zusammenfassend ergibt sich also aus dieser ersten Rechnung, daß mit Ausnahme der Neutronenleistung alle anderen Einflußgrößen, die das Verhalten des Kanals charakterisieren, ihre Gleichgewichtswerte schnell und ohne irgendein Überschwingen erreichen.

Es wurden zwei weitere Rechnungen mit ungünstigeren Eingangswerten durchgeführt, die zeigten, daß auch in diesen Fällen das Verhalten des Kanals stabil bleibt.

6.2 Verhalten bei Änderung des Reaktordruckes

Diese Rechnung basiert auf der Annahme, daß aus irgendeinem Grund der Reaktordruck linear um $3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ während 1 Sekunde ansteigt und daß er auf diesem Wert bleibt (s. Abbildung 8). Ein Absenken des Druckes würde den gleichen Effekt in umgekehrter Richtung hervorrufen.

Die unmittelbaren Folgen dieses Druckanstieges, d.h. in der ersten Sekunde, sind die Erhöhung der Siedegrenze, die Verminderung des durchschnittlichen Dampfblasengehaltes, die Erhöhung der Reaktivität des Kerns, die Erhöhung der Neutronenleistung und die Erhöhung der dem Kühlmittel übertragenen Leistung. Während der zweiten Sekunde werden die Werte dieser Einflußgrößen als Folge der durch den erhöhten Dampfblasengehalt gebildeten Gegenreaktivität verhältnismäßig schnell wieder

herabgesetzt, um anschließend den Gleichgewichtswerten zuzustreben. Diese Übergangszeit dauert insgesamt etwa zwischen 2 bis 3 Sekunden. In dieser Zeit erreichte die Gesamtreaktivität des Reaktorkerns einen Maximalwert von $3,5 \cdot 10^{-3}$, während die Neutronenleistung einen Maximalwert von 270 % ihres anfänglichen Gleichgewichtswertes erreichte. Die an die Flüssigkeit übertragene Leistung strebt mit einem kaum erkennbaren Überschwingen ihrem Gleichgewichtswert zu.

Dampfblasengehalt, Dampfdurchsatz am Ende des Kanals und Kühlmitteldurchsatz am Ende des Kanals erreichen am Ende der zweiten Sekunde nach einigen Schwingungen ihre Gleichgewichtswerte.

6.3 Verhalten bei Änderung der Enthalpie des Kühlmittels am Kanaleintritt

Als Annahme liegt der Berechnung zugrunde, daß die Enthalpie während 1 Sekunde um $5 \text{ cal/g} \cdot \text{sec}$ zunimmt (s. Abb. 9).

Die Änderung im Verhalten des Kanals folgt mit einer Verzögerung von etwa 1 Sekunde, die etwa der Zeit entspricht, während der das Kühlmittel die unterkühlte Zone durchströmt. Nach dieser Verzögerungszeit sinkt die Siedegrenze, was eine Verringerung der durchschnittlichen Moderator-dichte, der Gesamtreaktivität und der erzeugten Neutronenleistung nach sich zieht.

Nach der dritten Sekunde, in der die Neutronenleistung ihren Niedrigstwert von etwa 50 % ihres anfänglichen Gleichgewichtswertes erreicht, beginnt der Anstieg auf einen Gleichgewichtszustand, der nach Ablauf von etwa 8 Sekunden erreicht wird.

Die an das Kühlmittel übertragene Leistung fällt nach einer Verzögerung von etwa ebenfalls 1 Sekunde ohne Überschwingen auf einen Gleichgewichtszustand ab. Das gleiche geschieht mit der maximalen Temperatur im Brennstoff.

Dampfblasengehalt, Dampfdurchsatz am Ausgang des Kanals und Kühlmitteldurchsatz am Ausgang des Kanals erreichen nach flachem Überschwingen bei etwa 6 Sekunden ihren Gleichgewichtszustand.

6.4 Verhalten bei Änderung des Kühlmitteldurchsatzes am Kanaleintritt

Die Berechnung erfolgte mit der Annahme, daß während 2 Sekunden der Kühlmitteldurchsatz am Kanaleintritt um 5 %/sec ansteigt (s. Abb. 10).

Diese Art der Störung wirkt sich im Übergangsbetrieb auf die Kompressibilität des Dampfwassergemisches aus, und zwar insofern, als die gesamte Kühlmitteldurchsatzmenge am Kanalaustritt nicht genau der Kühlmitteldurchsatzmenge am Kanaleintritt entspricht.

Nach zwei Sekunden erreicht die Neutronenleistung ihren Maximalwert von etwa 130 % ihres anfänglichen Gleichgewichtswertes, um dann schnell auf einen Gleichgewichtszustand abzusinken. Die an die Flüssigkeit übertragene Leistung hat bereits nach 3 Sekunden ihren Gleichgewichtszustand erreicht.

Dampfblasengehalt und Dampfdurchsatz am Kanalaustritt streben ebenfalls sehr schnell einem Gleichgewichtswert zu.

Schon nach Ablauf von etwa 4 Sekunden wird praktisch ein neuer Gleichgewichtswert im gesamten Betriebsverhalten erreicht.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der vorangegangenen Rechnungen haben gezeigt, daß das Verhalten des konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktors mit Zwangsumlauf in dem Maße, wie dieser als einziger mittlerer Kanal angesehen werden kann, im Hinblick auf die vier untersuchten Störungen besonders stabil ist.

Die Reaktorregelung mit Hilfe von Steuerstäben, wie sie beim konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktor vorgesehen ist, scheint, wie sich auf Grund der theoretischen Untersuchungen ergeben hat, nicht zu gefährlichen Schwingungen im Reaktorbetrieb zu führen, doch wurde das Regelverhalten der Gesamtanlage in diesem Rahmen nicht untersucht.

Die Ergebnisse der Rechnungen über den Einfluß des Reaktordruckes auf die Reaktivität zeigen, daß beim Einkreis-Siedewasserreaktor im Gegensatz zum Zweikreis-Siedewasserreaktor jede Leistungsänderung der Turbine, die ja über den Druck mit dem Reaktor gekuppelt ist, zu einer unerwünschten Änderung der Reaktorleistung führt, die sofort durch ein Verstellen der Steuerstäbe ausgeglichen werden muß. Auch dieses Verhalten wurde in der Studie nicht untersucht.

Die Ergebnisse unterstreichen noch einmal die interessante Möglichkeit der Reaktorregelung mit Hilfe der Änderung des Kühlmitteldurchsatzes. Wie sich aus den Rechnungen ergab, wären bei diesem konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktor verhältnismäßig schnelle Leistungsänderungen ohne eine Bewegung der Steuerstäbe möglich, allein durch Veränderung der Kühlmitteldurchsatzmenge, z.B. mit Hilfe von drehzahlgeregelten Zwangsumlaufpumpen oder Regelventilen.

7. Parameterstudien über den Einkreis-Siedewasserreaktor

Anhand des im Rahmen dieses Studienvertrages konzipierten Einkreis-Siedewasserreaktors mit Zwangsumlauf wurde der Einfluß einer Änderung der Speisewasservorwärmtemperatur und des Dampfgehaltes am Reaktorkernaustritt auf den Reaktorkern allgemein und auf die folgenden Parameter speziell untersucht:

- Thermische Reaktorleistung
- Mittlerer Dampfblasengehalt im Reaktorkern
- Abbrand
- Anfangsanreicherung
- Brennstoffkosten
- burn-out-Sicherheit

Diese Untersuchungen wurden für mehrere Werte des Dampfgehaltes und der Speisewasservorwärmtemperatur durchgeführt (s. auch Bericht Nr. 4).

7.1 Änderung der thermischen Reaktorleistung

Die Rechnungen erfolgten für die drei Speisewassertemperaturen 160°C , 187°C und 220°C im Bereich eines Dampfgehaltes zwischen 8 Gew.-% und 14 Gew.-%, und zwar in der Weise, daß die elektrische Nettoleistung des Kraftwerkes auf 237 MW konstant gehalten wurde (s. Abb. 11). Als Ergebnis dieser Rechnungen zeigte sich, daß die Änderungen der thermischen Reaktorleistung in Abhängigkeit des Dampfgehaltes bei den verschiedenen Speisewassertemperaturen nur etwa 0,4 % bis 0,5 % ausmachen. Die Änderungen in Abhängigkeit der Speisewassertemperatur bei den verschiedenen Dampfgehalten ergeben sich zu etwa 1,3 % bis 1,6 %.

Der Einfluß der geringen Änderung der thermischen Reaktorleistung in Abhängigkeit des Dampfgehaltes hat seinen Grund darin, daß nur die Änderung der Leistung der Zwangsumlaufpumpen in die Betrachtungen eingeht, während alle anderen elektrischen Verbraucher in ihrer Leistung praktisch konstant bleiben, da sich die der Turbine zuströmende Dampfmenge in Abhängigkeit der Zwangsumlaufpumpenleistung prozentual nur sehr wenig ändert.

Die Änderung der thermischen Reaktorleistung in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur ergibt sich durch die zwei gegenläufigen Effekte der geringeren in der Turbine benötigten Dampfmenge bei kleinerer Vorwärmtemperatur, die zu einer Verringerung der thermischen Reaktorleistung führt, und der größeren Aufwärmspanne des in den Reaktor eintretenden Speisewassers, die eine Vergrößerung der thermischen Reaktorleistung bedingt.

7.2 Änderung des mittleren Dampfblasengehaltes im Reaktorkern

Diese Rechnungen, die ebenfalls für die drei Speisewassertemperaturen 160°C , 187°C und 220°C im Bereich eines Dampfgehaltes zwischen 8 Gew.-% und 14 Gew.-% durchgeführt worden sind, führten zu folgenden Ergebnissen (s. Abb. 12). Der mittlere Dampfblasengehalt nimmt in Abhängigkeit des Dampfgehaltes am Reaktorkernaustritt bei den betrachteten Speisewassertemperaturen zwischen 22 % und 24 % zu. In Abhängigkeit der Speisewassertemperatur beträgt die Zunahme zwischen 11 % und 12 % bei den verschiedenen Dampfgehalten.

7.3 Änderung des Abbrandes

Es wurde der Einfluß des mittleren Dampfblasengehaltes auf das Abbrandverhalten bestimmt.

Dazu wurden als erstes für drei verschiedene Anfangsanreicherungen des Brennstoffs die Änderungen des effektiven Multiplikationskoeffizienten bei mittleren Dampfblasengehalten zwischen 20 % und 35 % in Abhängigkeit des durchschnittlichen Abbrandes untersucht, um den Einfluß des Dampfblasengehaltes für die Abbrandzeit herauszustellen. Die Ergebnisse zeigen, daß k_{eff} mit zunehmendem mittlerem Dampfblasengehalt auf Grund der kleiner werdenden Moderatorichte abnimmt, und daß der Einfluß des Dampfblasengehaltes während der gesamten Bestrahlung erhalten bleibt.

Als zweite Untersuchung folgte die Berechnung des in dem mit 16 500 MWd/t bestrahltem Brennstoff erzeugten Plutoniums als Funktion des mittleren Dampfblasengehaltes bei verschiedenen Anfangsanreicherungen. In dem betrachteten Bereich des mittleren Dampfblasengehaltes zwischen 0 % und 30 % wirkt sich dieser z.B. bei einer Anfangsanreicherung von 2,55 % in einer Erhöhung der erzeugten Plutoniummenge um etwa 23 % aus. Dieser starke Einfluß könnte sich aus der Tatsache erklären, daß bei Zunahme des mittleren Dampfblasengehaltes eine Verhärtung des thermischen Neutronenspektrums eintritt und durch die Vergrößerung des Anteils der epithermischen Neutronen der Konversionsfaktor verbessert wird.

Die dritte Berechnung diente zur Bestimmung der Änderung der Endanreicherung des mit 16 500 MWd/t bestrahlten Brennstoffes als Funktion des mittleren Dampfblasengehaltes bei verschiedenen Anfangsanreicherungen. Diese Berechnungen zeigen, daß die Endanreicherung mit wachsendem Dampfblasengehalt zunimmt, und zwar um etwa 0,13 % bis 0,15 % absolut im Bereich zwischen 0 % und

30 % mittlerem Dampfblasengehalt. Die Begründung für diesen Einfluß ist der mit wachsendem Dampfblasengehalt größer werdende Anteil von schnellen Spaltungen des erzeugten Plutoniums auf Kosten der thermischen Spaltungen von U 235, wie die Verringerung des im Brennstoff verbleibenden U-238-Anteils als Funktion des Dampfblasengehaltes zeigt.

7.4 Änderung der Anfangsanreicherung des Gleichgewichtsbrennstoffes

Im Gleichgewichtszyklus ändert sich die verfügbare Reaktorreaktivität entsprechend den Brennstofferneuerungen periodisch von einem maximalen Wert unmittelbar nach dem Brennstoffwechsel auf einen minimalen Wert, der für den Reaktorbetrieb erforderlichen Mindestreaktivitätsreserve entspricht, unmittelbar vor dem Brennstoffwechsel. Wenn die Zeit zwischen zwei Brennstoffwechseln festliegt, hängt also die Mindestreaktivitätsreserve von der Anfangsanreicherung und dem mittleren Dampfblasengehalt im Reaktorkern ab. Die Berechnung dieser Abhängigkeit auf Grund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen über den effektiven Multiplikationskoeffizienten zeigte, daß sich z.B. bei Herabsetzung des mittleren Dampfblasengehaltes von 25 % auf 20 % die Mindestreaktivitätsreserve von $1 \cdot 10^{-2}$ auf $1,7 \cdot 10^{-2}$ erhöht oder, wenn diese auf dem anfänglichen Wert festgehalten wird, die Anfangsanreicherung von 2,55 % auf 2,49 % gesenkt werden kann.

7.5 Änderung der Brennstoffkosten

Unter der Voraussetzung, daß der Reaktorkern in seinem technischen Aufbau (z.B. Brennstoffumhüllung) unverändert bleibt, bestimmen folgende dem Einfluß von Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt und Speisewasservorwärm-

temperatur unterliegenden Parameter die Brennstoffkosten:

- thermische Reaktorleistung
- Anfangsanreicherung des Brennstoffes
- Endanreicherung des verbrauchten Brennstoffes
- Zusammensetzung des verbrauchten Brennstoffes.

Die thermische Reaktorleistung wurde bereits als Funktion von Dampfgehalt und Speisewassertemperatur berechnet. Mit Hilfe der gefundenen Abhängigkeit der Anfangsanreicherung, der Endanreicherung und der Plutoniumerzeugung vom Dampfblasengehalt und der ebenfalls ermittelten Funktion des Dampfblasengehaltes von Dampfgehalt am Reaktoraustritt und Speisewassertemperatur konnten auch diese Parameter als Funktion des Dampfgehaltes und der Speisewassertemperatur dargestellt werden (s. Abb. 13, 14, 15, 16).

Auf der Basis dieser funktionalen Zusammenhänge und in Anlehnung an die ausgeführten Stromgestehungskostenrechnungen wurden die Brennstoffkosten des Gleichgewichtskernes berechnet.

Die laufenden Brennstoffersatzkosten fallen in dem untersuchten Bereich zwischen 8 Gew.-% und 14 Gew.-% Dampfgehalt bis etwa 12,5 % schwach ab, um dann bis 14 % konstant zu bleiben. Die Verminderung macht bei den drei betrachteten Speisewassertemperaturen 160°C, 187°C und 220°C jeweils etwa nur 0,3 % aus.

Einen im Verhältnis wesentlich größeren Einfluß hat die Speisewassertemperatur. Bei Erhöhung derselben von 160°C auf 220°C sinken die Brennstoffersatzkosten um etwa 1,4 %.

Der geringe Einfluß des Dampfgehaltes auf die Brennstoffersatzkosten läßt sich folgendermaßen erklären:

Wenn der Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt zunimmt, verringert sich infolge abnehmender Leistung der Zwangsumlaufpumpen die thermische Reaktorleistung ein wenig. Die daraus und aus der größeren Endanreicherung und Plutoniummenge resultierende Verbilligung des Brennstoffersatzes wird jedoch fast durch die als Folge des größeren Dampfblasengehaltes notwendige höhere Anfangsanreicherung des Brennstoffes kompensiert.

Die Erhöhung der Speisewassertemperatur wirkt sich in erster Linie auf die Verbesserung des Kraftwerkswirkungsgrades aus. Da die Brennstoffersatzkosten diesem umgekehrt proportional sind, ergibt sich also eine Verbilligung dieser Kosten. Außerdem steigen mit der Speisewassertemperatur auch die Endanreicherung sowie der Plutoniumgehalt des verbrauchten Brennstoffes und damit der Wiederverkaufswert. Demgegenüber steht die Verteuerung des Brennstoffes durch die erforderliche höhere Anfangsanreicherung. Diese drei Einflüsse ergeben im Endeffekt die nur absolut geringe Verbilligung der Brennstoffersatzkosten bei Erhöhung der Speisewasservorwärmtemperatur.

Die Brennstoffeinsatzkapitalkosten und die Brennstoffreservekosten zeigen die entgegengesetzte Tendenz wie die Brennstoffersatzkosten, d.h. sie nehmen mit steigender Speisewassertemperatur und mit wachsendem Dampfgehalt zu.

In dem untersuchten Bereich zwischen 8 Gew.-% und 14 Gew.-% macht das bei den Brennstoffeinsatzkapitalkosten etwa zwischen 4 % und 6 % aus. Der Einfluß der Temperaturerhöhung von 160°C auf 220°C bei den verschiedenen Dampfgehalten wirkt sich in einer Verteuerung etwa zwischen 2 % und 4 % aus.

Die Erhöhung der Brennstoffreservekosten geschieht in denselben Relationen.

Zurückzuführen ist diese Tendenz der Verteuerung bei steigender Speisewasservorwärmtemperatur und wachsendem Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt im wesentlichen auf die mit zunehmendem mittleren Dampfblasengehalt erforderlich werdende höhere Anfangsanreicherung des Brennstoffes.

Aus den Abhängigkeiten der Brennstoffersatzkosten und der Brennstoffeinsatzkapital- und Brennstoffreservekosten wurden zwei Funktionen der Gesamtbrennstoffkosten gebildet, die die Abhängigkeit einmal vom Dampfblasengehalt und einmal von der Speisewasservorwärmtemperatur wiedergeben.

Die Darstellung des Einflusses der Speisewasservorwärmtemperatur auf die Gesamtbrennstoffkosten mit den Dampfgehalten 8 Gew.-%, 10 Gew.-%, 12 Gew.-% und 14 Gew.-% als Parameter zeigt, daß die Gesamtbrennstoffkosten unterhalb eines Dampfgehaltes von 10 Gew.-% bei Ansteigen der Speisewasservorwärmtemperatur von 160°C auf 220°C in Form einer stetig flacher werdenden Kurve abnehmen; oberhalb eines Dampfgehaltes von 12 Gew.-% weisen die Kurven etwa zwischen 190°C und 200°C Speisewasservorwärmtemperatur ein Minimum auf.

Die Darstellung des Einflusses des Dampfgehaltes auf die Gesamtbrennstoffkosten mit den Speisewasservorwärmtemperaturen 160°C , 187°C und 220°C als Parameter zeigt den vorherrschenden Einfluß des mittleren Dampfblasengehaltes im Reaktorkern auf die Anfangsanreicherung des Brennstoffes (s. Abb. 17). Mit wachsendem mittlerem Dampfblasengehalt nimmt die erforderliche Anfangsanreicherung und damit der Preis des Brennstoffes stark zu, so daß trotz sinkender Leistung der Zwangsumlaufpumpen bei Erhöhung des Dampfgehaltes von 8 Gew.-% auf 14 Gew.-% eine Verteuerung der Gesamtbrennstoffkosten um etwa 0,7 % bei 160°C Speisewasservorwärmtemperatur und um

etwa 1,2 % bei 220°C Speisewasservorwärmtemperatur erhalten bleibt.

7.6 Änderung der burn-out-Sicherheit

Es wurden für die der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors zugrunde liegende Neutronenflußverteilung, für die Dampfgehalte am Reaktorkernaustritt von 8 Gew.-%, 10 Gew.-%, 12 Gew.-% und 14 Gew.-% und für die Speisewasservorwärmtemperaturen von 160°C, 187°C und 220°C jeweils berechnet:

- als Funktion des radialen Abstandes vom Zentrum des Reaktorkerns (r/R) die Verteilung der Kühlmittelgeschwindigkeit am Eingang der verschiedenen Kanäle und die Änderung der minimalen burn-out-Sicherheit in den verschiedenen Kanälen.
- als Funktion des axialen Abstandes vom unteren Ende des Reaktorkerns (h/H) die Änderung der burn-out-Sicherheit in dem Kanal, in dem diese den kleinsten Wert hat.

Als Ergebnisse der Berechnungen der Verteilung von Kühlmittelgeschwindigkeit und burn-out-Sicherheit über den Querschnitt des Reaktorkerns zeigten sich (s. Abb. 18):

- die Kühlmiteleintrittsgeschwindigkeit nimmt für die untersuchte Neutronenflußverteilung von der Mitte des Reaktorkerns bis zur Zone, von der ab die Drosselung einsetzt, um etwa 10 % ab.
- die Erhöhung des Dampfgehaltes von 8 Gew.-% auf 14 Gew.-% bei den betrachteten Speisewasservorwärmtemperaturen macht sich in einer Herabsetzung der Kühlmiteleintrittsgeschwindigkeiten um etwa 50 % bemerkbar.

- die Erhöhung der Speisewasservorwärmtemperatur von 160°C auf 220°C zieht eine Erhöhung der Kühlmittel-eintrittsgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Dampfgehalten zwischen etwa 20 % und 30 % nach sich.
- die burn-out-Sicherheit hat in allen untersuchten Fällen zwei Zonen, in denen sie ein Minimum aufweist; die eine Zone liegt bei etwa $r/R = 0,4$ und die andere bei etwa $r/R = 0,8$.
- die burn-out-Sicherheit in der Drosselzone liegt in allen untersuchten Fällen über dem Minimalwert, obwohl das Auslegungsziel für die Drosselzone - etwa gleicher Dampfgehalt am Kernaustritt wie in der ungedrosselten Zone - durch etwas zu starke Drosselung nicht ganz erreicht wurde.
- das Minimum bei $r/R = 0,4$ liegt in der oberen Kernhälfte und ist durch die Form des Steuerstabmusters bedingt, während das Minimum bei $r/R = 0,8$ in der unteren Kernhälfte durch die größere Reaktivität im unterkühlten Bereich hervorgerufen wird.
- die Erhöhung des Dampfgehaltes von 8 Gew.-% auf 14 Gew.-% bei den drei Speisewasservorwärmtemperaturen führt zu einer Verringerung des Minimums der burn-out-Sicherheit zwischen etwa 3 % und 7 % in der Zone $r/R = 0,4$ und zwischen etwa 7 % und 9 % in der Zone $r/R = 0,8$.
- die Erhöhung der Speisewassertemperatur von 160°C auf 220°C bei den betrachteten Dampfgehalten ergibt auf der einen Seite eine Herabsetzung des Minimums der burn-out-Sicherheit bei $r/R = 0,4$, und zwar um etwa 7 % bis 8 % und auf der anderen Seite eine Heraufsetzung des Minimums bei $r/R = 0,8$ um etwa 4 % bis 1 %.

Die Berechnung des Einflusses von Dampfgehalt und Speisewasservorwärmtemperatur auf die burn-out-Sicherheit im heißesten Kanal führte zu folgenden Resultaten (s. Abb. 19):

- auch die Verteilung der burn-out-Sicherheit längs des Kanals weist in allen untersuchten Fällen zwei Minima auf, von denen das eine zwischen $h/H = 0,2$ bis $0,3$ und das andere am Ausgang des Kanals zwischen $h/H = 0,8$ bis $0,9$ liegt. Das erste Minimum, bei dem die burn-out-Sicherheit den niedrigsten Wert annimmt, fällt zusammen mit dem Maximum des Neutronenflusses. Es ist die Stelle, an der der örtliche Dampfgehalt einen Wert von 5 Gew.-% bis 6 Gew.-% erreicht und die damit in dem Bereich liegt, in dem nach Janssen und Lévy die burn-out-Heizflächenbelastung unabhängig ist vom Dampfgehalt.
- eine Erhöhung des Dampfgehaltes von 8 Gew.-% auf 14 Gew.-% macht sich bei den drei Speisewasservorwärmtemperaturen in einer Erniedrigung der minimalen burn-out-Sicherheit zwischen 6 % und 9 % bemerkbar.
- die Erhöhung der Speisewasservorwärmtemperatur von 160°C auf 220°C führt dagegen zu einer Vergrößerung
- der minimalen burn-out-Sicherheit um etwa 4 % bis 1 % bei Dampfgehalten von 8 Gew.-% bis 14 Gew.-%.

7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die auf Grund der durchgeführten Untersuchungen und der diesen Untersuchungen zugrunde liegenden vereinfachten Annahmen bzw. Voraussetzungen gewonnenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- der Einfluß einer Änderung von Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt und Speisewasservorwärmtemperatur auf die thermische Reaktorleistung, den mittleren Dampfblasengehalt, den Abbrand, die Anfangsanreicherung und über diese Anlagenparameter schließlich auf die Brennstoffkosten des Einkreis-Siedewasserreaktors ist in den betrachteten Grenzen von 8 Gew.-% bis 14 Gew.-% Dampfgehalt und 160°C, 187°C, 220°C Speisewasservorwärmtemperatur sowie im Rahmen der erzielten Genauigkeit sehr gering. Zumindest läßt sich jedoch die Tendenz erkennen, daß nämlich die Brennstoffkosten mit zunehmender Speisewasservorwärmtemperatur und abnehmendem Dampfgehalt sinken.

- die burn-out-Sicherheit hängt nicht in so bedeutendem Maß von Dampfgehalt und Speisewasservorwärmtemperatur ab, wie dies angenommen wurde. Dagegen hat der Neutronenflußverlauf und damit die Anordnung der Steuerstäbe entscheidenden Einfluß. Für den Reaktorbetrieb muß zu jeder Zeit durch Verwendung geeigneter Steuerstabmuster gewährleistet sein, daß die Neutronenflußverteilung und die damit zusammenhängende burn-out-Sicherheit nicht ungünstiger als die hier berechneten Werte sind. Es wurde in der Studie nicht untersucht, ob diese Forderung über den ganzen Abbrandzyklus aufrechterhalten werden kann.

8. Kritische Betrachtung über die Auslegung des
Einkreis-Siedewasserreaktors

Da sich weder aus den Stabilitätsuntersuchungen noch aus der Abhängigkeit der minimalen burn-out-Sicherheit von den untersuchten Parametern Gesichtspunkte für eine Änderung der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors ergaben, wurde diese Betrachtung ausschließlich unter dem Gesichtspunkt des wirtschaftlichen Optimums des gesamten Kernkraftwerkes durchgeführt.

Ausgehend von der ermittelten Abhängigkeit der Brennstoffkosten von Dampfgehalt und Speisewasservorwärmtemperatur ließe sich die Vermutung anschließen, daß durch eine Erhöhung der Speisewasservorwärmtemperatur und durch Herabsetzung des Dampfgehaltes gegenüber den zugrunde gelegten Werten die gesamten Stromgestehungskosten des Kraftwerkes, wenn auch nicht beträchtlich, so doch um einige Prozent gesenkt werden könnten.

Diese Betrachtungsweise ist jedoch nicht gerechtfertigt, da einerseits die Brennstoffkosten des Einkreis-Siedewasserreaktors nur etwa 40 % an den gesamten Stromgestehungskosten ausmachen, wie die Stromgestehungskostenrechnung gezeigt hat, und da andererseits die Kapitalkosten des Kernkraftwerkes, die mit etwa 51 % einen wesentlich größeren Anteil darstellen, ebenfalls von einer Veränderung der beiden Parameter beeinflußt werden, und zwar im entgegengesetzten Sinne wie die Brennstoffkosten.

Der Einfluß auf die Anlagekosten ergibt sich bei Veränderung des Dampfgehaltes hauptsächlich infolge der Änderung des Kühlmitteldurchsatzes durch den Reaktorkern und bei Veränderung der Speisewasservorwärmtemperatur in erster Linie infolge der Änderung des Dampf-durchsatzes und in zweiter Linie infolge der Änderung des Kühlmitteldurchsatzes.

Das heißt, um den Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt herabzusetzen, muß der Kühlmitteldurchsatz entsprechend erhöht werden, was erstens eine Vergrößerung des Druckgefäßdurchmessers und der am Druckgefäß vorhandenen Zwangsumlaufstutzen, zweitens eine Vergrößerung der Dampfabscheider und drittens eine Vergrößerung der Zwangsumlaufpumpen hinsichtlich Fördermenge und Förderhöhe sowie der zugehörigen Rohrleitungen und Armaturen bedingt und damit zu einer Verteuerung dieser Anlagenkomponenten führt. Bei Erhöhung der Speisewasservorwärmtemperatur ergeben sich primär Verteuerungen infolge der größeren Dampfmenge im wesentlichen in der Turbine, in den Dampf- und Kondensatleitungen sowie den zugehörigen Armaturen, in den Kondensat- und Speisepumpen, in der Kondensatreinigung und infolge der an das Speisewasser zu übertragenden größeren Wärmemenge in der Vorwärmanlage. Sekundär entstehen Mehrkosten durch die bei konstantem Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt und vergrößerter Dampferzeugung erforderliche erhöhte Kühlmitteldurchsatzmenge.

Um einerseits diese theoretischen Betrachtungen mit Zahlenwerten zu untermauern und um andererseits festzustellen, inwieweit die Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes hinsichtlich der Stromgestehungskosten der optimalen Auslegung nahe kommt, wurden die Änderungen der Kapitalkosten als Funktion der Speisewasservorwärmtemperatur im Bereich 160°C bis 200°C grob abgeschätzt und den Brennstoffkosten gegenübergestellt. Der Dampfgehalt am Reaktorkernaustritt wurde dabei konstant gehalten, und zwar auf dem Wert, der der Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors zugrunde liegt.

Die Abschätzung der Anlagekosten erfolgte in der Weise, daß anhand der bekannten Preise des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes Mehr- oder Minderkosten für diejenigen Anlagekomponenten ermittelt wurden, die sich preislich

einigermaßen erfaßbar mit der Speisewassertemperatur in dem verhältnismäßig kleinen betrachteten Bereich ändern. Das sind die Turbine, die Kondensat- und Speisepumpen, die Kondensatreinigung, die Vorwärmanlage und das Zwangsumlaufsystem.

Das Ergebnis der Gegenüberstellung bzw. der Addition der beiden dargestellten Kurven zeigte für den den Parameterstudien zugrunde liegenden Bereich der Speisewasservorwärmtemperatur von 160°C bis 220°C kein Minimum in der Summenkurve, d.h. die optimale Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktors liegt noch unterhalb einer Speisewasservorwärmtemperatur von 160°C (s. Abb. 20).

Es wurden deshalb die Kurven der Brennstoff- und Kapitalkosten von 160°C zu niedrigeren Speisewasservorwärmtemperaturen extrapoliert. Dabei bildete sich schon knapp unterhalb 160°C das gesuchte Minimum aus. Bei 150°C Speisewasservorwärmtemperatur steigt die Summenkurve bereits infolge der stärker ansteigenden Brennstoffkosten wieder an.

Das bedeutet also, daß die optimale Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes bei dem gegebenen Lastfaktor und unter Berücksichtigung der zahlreichen vereinfachenden Annahmen und Voraussetzungen eine Speisewasservorwärmtemperatur zwischen 150°C und 160°C bedingt, da in diesem Bereich die Stromgestehungskosten am kleinsten sind und das Kernkraftwerk damit in diesem Bereich am wirtschaftlichsten arbeitet. Bezogen auf die zu Beginn dieses Studienvertrages erfolgte Auslegung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes heißt das, daß die gewählte Speisewasservorwärmtemperatur von 187°C um etwa 30°C zu hoch liegt.

Die sich bei einer Herabsetzung der Speisewasservorwärmtemperatur auf den der optimalen Auslegung entsprechenden Wert ergebende Verbilligung des Anlagenpreises

würde etwa 1.000.000,-- DM ausmachen, womit der Preis für die schlüsselfertige Errichtung des Einkreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerkes von 174.500.000,-- DM auf 173.500.000,-- DM sinken und die Differenz in den Anlagenpreisen zum Zweikreis-Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk von 7.500.000,-- DM auf 8.500.000,-- DM steigen würden.

II. ÄNDERUNGEN IM STAND DER SIEDEWASSERREAKTORTECHNIK

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen, zwischen dem Beginn der im Rahmen dieses Studienvertrages durchgeführten Untersuchungen und dem heutigen Zeitpunkt aufgetretenen Neuerungen in der Siedewasserreakorteknik dargestellt, soweit sie für den Stand dieser Technik als charakteristisch gelten können.

1. Kreislaufsystem

Wesentliche Vorzüge des Zweikreis-Siedewasserreaktors sind sein ausgezeichnetes Regelverhalten im oberen Leistungsbereich sowie die gegenüber dem Einkreis-Siedewasserreaktor gleicher Leistung erheblich verringerte Dampfraumbelastung. Dies gestattet, größere Leistungseinheiten in Druckgefäßen bei vorgegebenen Transportabmessungen unterzubringen.

Dem stehen als Nachteile der bauliche Aufwand des zweiten Kreises und die größere Primärwassermenge gegenüber.

Durch den Übergang von der Steuerstabregelung zur Umlaufregelung ist es gelungen, den Einkreis-Siedewasserreaktor ebenfalls in einem großen Lastbereich regelbar zu machen, ohne dazu die Steuerstäbe bewegen zu müssen. Das ist von Bedeutung für das Aufrechterhalten günstiger Leistungsverteilungen im Kern, da bereits geringe Steuerstab-Verschiebungen bei großen Kernen erhebliche Veränderungen der Leistungsverteilung bewirken können.

Deshalb wird heute allgemein dem derart umlaufgeregelten Einkreis-Siedewasserreaktor bis hin zu den größten Leistungseinheiten der Vorzug gegeben.

Das Abgehen von der Steuerstabregelung bringt Vereinfachungen der Steuerstabantriebe durch den Fortfall des Feinregelmechanismus mit sich. Die Steuerstäbe werden nur noch als Trimm- und Abschaltstäbe benötigt und brauchen demzufolge nur in Stufen verstelbar zu sein, wie es z.B. beim KRB-Reaktor der Fall ist.

Neuere Entwicklungen zielen darauf hin, den Strom des Kühlmittels nicht durch Umwälzschleifen zu führen, sondern mit Hilfe von Wasserstrahlpumpen aus dem Rückströmraum des Reaktors direkt vor den Kerneintritt zu fördern. Die Vorzüge dieser druckgefäßinternen Umwälzmethode liegen im Fortfall der Zwangsumlaufschleifen und auf sicherheitstechnischem Gebiet. An der Entwicklung des Systems wird zur Zeit gearbeitet.

2. Physikalische und thermodynamische Kernausslegung

Bei der Wahl der Leistungsdichte im Kern muß zwischen den Anlagekosten und den dazu gegenläufigen Brennstoffelementherstellungskosten optimiert werden. Die dabei ermittelte optimale Leistungsdichte hängt vom jeweiligen Stand der Technik (insbesondere Brennelementherstellungskosten) ab. Im Rahmen des "High Power Density Development Project" wird zur Zeit von GE untersucht, wie weit eine Steigerung der Leistungsdichte technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Bei einer Erhöhung der Leistungsdichte über 40 MW/m^3 hinaus begrenzt nur noch die burn-out-Heizflächenbelastung den zulässigen Stabdurchmesser, während die Stabmittentemperatur stets unter dem maximal zulässigen Wert bleibt. Im Big Rock Point Reactor wurde bisher eine maximale Leistungsdichte von etwa 60 MW/m^3 erreicht. Theoretische Berechnungen lassen Leistungsdichten bis zu 77 MW/m^3 möglich erscheinen.

Neuere burn-out-Untersuchungen haben ergeben, daß kurzzeitiges Auftreten von Filmverdampfung an den Brennstoffstäben nicht unbedingt zur Zerstörung führen muß. Man geht daher neuerdings schon dazu über, für bestimmte Transienten kurzzeitig minimale burn-out-Sicherheiten von weniger als 1,5 zuzulassen.

Die Bestrebungen, zu höheren Abbränden zu gelangen, erfordern auch verbesserte Methoden der Reaktivitätsbindung. Einerseits soll die Vergiftung möglichst homogen verteilt sein, um den mikroskopischen Heißstellenfaktor nicht zu vergrößern, andererseits möchte man durch Variation der Vergiftungsstärke eine Abflachung der makroskopischen Leistungsverteilung vornehmen können. Die bisher verwendeten Vergiftungsbleche erfüllen nur die zweite Forderung gut. Lösliche chemische Vergiftungen gestatten dagegen keine Beeinflussung der makroskopischen Leistungsverteilung. Als Kompromiß bietet sich der Einsatz von Vergiftungsstäben in einigen ausgewählten Stabpositionen jedes Brennstoffelementbündels an. Diese Methode der Reaktivitätsbindung befindet sich zur Zeit in der Entwicklung.

3. Konstruktive Kernausslegung

Eine wesentliche Neuerung auf dem Gebiet der Siedewasserreaktortechnik ist die Vergrößerung des Steuerstababstandes von bisher 254 mm auf 304,8 mm. Die Zahl der Brennstoffstäbe pro Brennstoffelementbündel wurde entsprechend von 6 x 6 auf 7 x 7 bzw. 8 x 8 Stäbe erhöht. Durch diese Maßnahme ergibt sich eine beträchtliche Verringerung der leistungsbezogenen Anzahl von Steuerstäben und Steuerstabantrieben.

Die Entwicklung geeigneter Abstandhalterungen ermöglichte den Bau von durchgehenden Brennstoffstäben.

Die Gefahr der Reibkorrosion an den Auflagestellen der Abstandhalter auf den Hüllen besteht hierbei nicht mehr.

Als Hüllenwerkstoff wird gegenwärtig Zircaloy-2, wie es auch bei KRB jetzt vorgesehen ist, bevorzugt, da durch Sinken des Zircaloy-Preises dieses Material im Vergleich zu Stahl ökonomischer geworden ist. Außerdem liegen mit Zircaloy bessere Betriebserfahrungen als mit Stahl vor.

4. Berechnungsverfahren

Eine sorgfältige physikalische Kernausslegung erfordert die Variation einer großen Zahl von Auslegungsparametern. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl von Rechenoperationen, deren Eingabe von Hand einen großen Aufwand darstellt. Außerdem besteht beim Verarbeiten großer Datenmengen von Hand stets die Gefahr, daß Fehler auftreten. Es befinden sich daher Programmsysteme in der Bearbeitung, deren Kennzeichen es ist, daß die Ausgabe eines Programmteils sofort als Eingabe eines anderen Programmteils verwendet werden kann. Die einzelnen Bausteine dieses Systems lassen sich durch ein flexibles Steuerprogramm vom Benutzer in der gewünschten Weise aneinander anschließen. Das Aufbereiten größerer Datenmengen von Hand entfällt vollständig.

Neben der organisatorischen Neugestaltung enthält dieses Programmsystem wesentliche Verbesserungen der physikalischen Berechnungsmethoden.

5. Reaktordruckgefäß und Sicherheitsbehälter

Dem Bestreben, große Leistungseinheiten zu bauen, stellen sich von der Transportmöglichkeit des Reaktordruckgefäßes her Schwierigkeiten entgegen.

Der Eisenbahntransport von Druckgefäßen ist nur bis zu Leistungsgrößen von etwa 300 MWe durchführbar. Für größere Leistungseinheiten kann bei günstiger Lage sowohl der Fertigungsstelle wie auch des Kraftwerkes an einem schiffbaren Gewässer der Schifftransport gewählt werden. Wenn diese Voraussetzungen nicht zutreffen (in Europa haben bislang nur wenige Fertigungsstellen eine dafür geeignete Lage), muß von der kompletten Werkstattfertigung zur Baustellenfertigung übergegangen werden. Dabei werden möglichst viele Arbeiten bereits in der Werkstatt durchgeführt und die Baustellenarbeiten auf ein Minimum reduziert.

Nach bisherigen Untersuchungen ist die Herstellung von Reaktordruckgefäßen für Siedewasserreaktoren bis 1500 MWe mit vertretbarem Aufwand möglich. Darüber hinaus erscheint die Herstellung von Druckgefäßen für Leistungsgrößen bis etwa 2500 MWe nach dem heutigen Stand der Schweißtechnik durchführbar (Wandstärke bis zu 300 mm), wenn auch über die Wirtschaftlichkeit noch keine Aussagen gemacht werden können.

Es wird an der Entwicklung höherfester Stähle gearbeitet, durch die sich die obigen Herstellungsgrenzen wegen der Verringerung der Wandstärken zu höheren Reaktorleistungen hin verschieben werden.

Für große Reaktoren mit hoher Primärkreisenergie werden heute vielfach Druckabbausysteme vorgesehen, bei denen der bei einem Bruch des Primärkreises in der Druckkammer entstehende Druck das entstehende Dampf-Wasser-Luft-Gemisch über Fallrohre in teilweise mit kaltem Wasser gefüllte Kondensationskammern preßt, in denen der Dampf kondensiert und der Druck im System somit abgebaut wird.

Das Druckabbausystem hat bei großen Reaktoren technische und wirtschaftliche Vorzüge gegenüber der trockenen Druckschale. Es kann mit einer minimalen Leckrate sowohl in Stahl wie auch in Stahlbeton ausgeführt werden.

6. Prozeßrechner

Prozeßrechner werden in zunehmendem Maße in Siedewasserreaktor-Kernkraftwerken eingesetzt. Ihr Einsatz bringt auf folgenden Gebieten Nutzen:

- Optimierung des Reaktorbetriebes

Sie kann z.B. im Hinblick auf Abbrand, Leistungsdichte und Kühlwassermenge erfolgen und gestattet, unter Verwendung von Incore- und Kühlmittelmeßwerten denjenigen Betriebszustand zu ermitteln, der unter den gegebenen Bedingungen optimal ist und die vorgegebenen Grenzwerte einhält (burn-out-Sicherheit). Ein wesentlicher Vorzug des Prozeßrechners bei der Unterstützung der externen Planung ist, daß er die zum Rechenzeitpunkt tatsächlich vorliegenden Verhältnisse berücksichtigen kann, während eine Vorausberechnung stets mit Unsicherheiten durch die getroffenen Annahmen belastet ist.

- Erhöhung der Sicherheit der Anlage

Durch die laufende Überwachung der Grenzwerte wird die Sicherheit der Anlage erhöht. Die Vielzahl der einlaufenden Meßwerte wird auf ihren Informationsgehalt hin gesichtet und damit für den Operateur übersichtlicher und wertvoller. Bei Fehlhandlungen des Operateurs erfolgt sofortige Warnung.

- Verringerung von Stillstandszeiten

Sie wird durch halbautomatisches Anfahren und durch

besseres Ausnutzen von Reserven, z.B. beim Aufwärmen von Turbine und Reaktor und beim Ziehen der Steuerstäbe im unterkritischen Zustand erreicht. Die Flexibilität in Störfällen wird durch schnellen, optimalen Entwurf neuer Steuerstabsfahrprogramme verbessert.

- Organisatorische Erleichterungen

Der Prozeßrechner kann das Erstellen von Tages-, Wochen- und Monatsberichten übernehmen und ein exaktes Protokoll führen. Er ermöglicht die zeitliche Auflösung der einzelnen Ereignisse beim Auftreten von Störfällen und erleichtert so das Ermitteln der Ursache. Er steht darüber hinaus auch für kaufmännische Aufgaben zur Verfügung.

Der Prozeßrechner kann im offenen oder im geschlossenen Kreis an die Anlage gekoppelt sein. Im ersteren Fall gibt er dem Operateur lediglich Anweisungen und gegebenenfalls Warnmeldungen. Im zweiten Fall greift er selbsttätig in den Betrieb der Anlage ein.

Beim Kernkraftwerk KRB sind alle Vorleistungen für den späteren Einbau eines Prozeßrechners erbracht, so daß dieser ohne Schwierigkeiten zum gegebenen Zeitpunkt in den Kraftwerksbetrieb eingefügt werden kann.

7. Datenliste

Die endgültige Auslegung des KRB-Reaktors unterscheidet sich in einigen Punkten von der alten Auslegung, die den durchgeführten Untersuchungen zugrunde lag. So wurde z.B. die Kernausslegung dahingehend geändert, daß statt der Stahl- eine Zircaloy-Umhüllung für den Brennstoff verwendet wird, was eine Senkung in den Brennstoffkosten bedeutet. Im folgenden werden die alten und die neuen Daten, soweit sie sich im Laufe der Zeit geändert haben, einander

gegenübergestellt bzw. neu bekannt gewordene Auslegungswerte mitgeteilt.

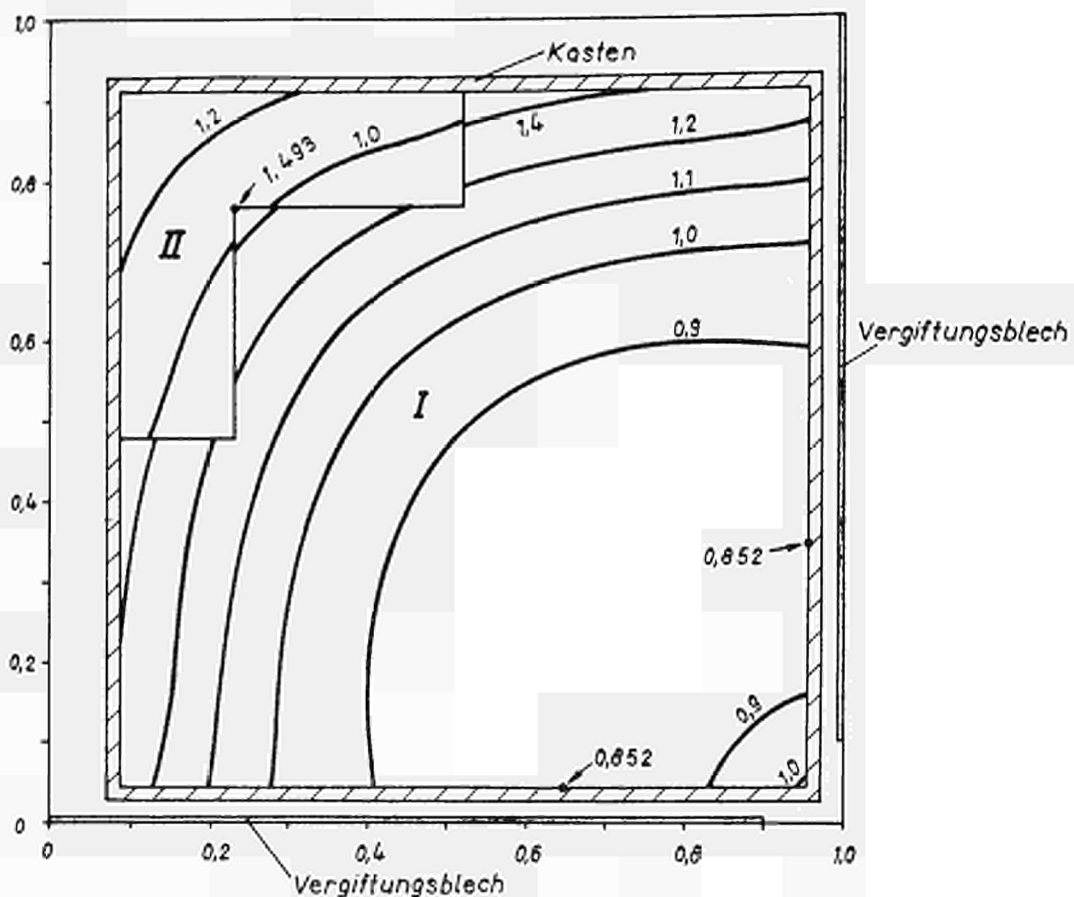
	Dim.	KRB - alte Auslegung	KRB - endg. Auslegung
<u>Kraftwerkshauptdaten</u>			
Elektrische Bruttoleistung	MW	250	252
Speisewasserendtemperatur	°C	198,6	200
<u>Reaktordaten</u>			
- Reaktorkern			
Aktive Kernhöhe	mm	3660	3302
Zahl der Abstandshalterungen		-	6
Zahl der Vergiftungsbleche		-	156
- Aufbau der Steuerstabzelle			
Zahl der Stäbe pro Bündel normal/spezial		-	29/7
Durchmesser der Pellets	mm	12,18	12,24
Spalt zwischen Pellet und Hülle	/ ^u	15	136
Wandstärke der Hüllen	mm	0,30	0,889
Hüllmaterial		rostfreier Stahl	Zircaloy-2
Abstand der Stäbe im Bündel	mm	18,4	17,93
Bündelkästen:			
Lichte Weite	mm	-	110,46
Wandstärke	mm	-	1,53
Spaltbreiten zwischen den Kästen:			
bei Steuerstab	mm	-	17,44
bei Vergiftungsblech	mm	-	9,52
Steuerstäbe:			
Blattweite	mm	213	198,88
Blattstärke	mm	9,28	6,86

	Dim.	KRB - alte Auslegung	KRB - endg. Auslegung
Vergiftungsbleche:			
Blattweite	mm	228	152,4
Blattstärke	mm	1,59	1,6
Borgehalte, Mittelzone/Randzonen	Gew.-%	0,45/0,25	0,57/0,37
Volumenverhältnis Moderator zu Brennstoff		ca 2,5	2,30
- Physikalische Daten			
Anfangsanreicherung U235 Erstkern normal/spezial	Gew.-%	2,72/1,86	2,34/1,67
Reaktivitätskoeffizienten Anfangskern:			
Doppler, kalt, ohne Dampf	$\Delta k/k^{\circ C}$	$-2,1 \cdot 10^{-5}$	$-2,3 \cdot 10^{-5}$
Doppler, heiß, ohne Dampf	$\Delta k/k^{\circ C}$	$-1,4 \cdot 10^{-5}$	$-2,0 \cdot 10^{-5}$
Doppler, heiß, mit 30 Vol.-% Dampf	$\Delta k/k^{\circ C}$	-	$-2,5 \cdot 10^{-5}$
Temperatur, kalt	$\Delta k/k^{\circ C}$	$-9,0 \cdot 10^{-5}$	$-2,7 \cdot 10^{-4}$
Temperatur, heiß	$\Delta k/k^{\circ C}$	$-4,1 \cdot 10^{-4}$	$-4,8 \cdot 10^{-4}$
Dampfblasen, heiß	$\Delta k/k \text{ Vol.-%}$	$-2,0 \cdot 10^{-3}$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$
Leistungsüberhöhungsfaktoren:			
makroskopisch, radial)	1,30
makroskopisch, axial) 2,04	1,50
Steuerstabunsymmetrie		1,10	1,15
mikroskopisch		1,30	1,30
Total bei Nennlast		2,92	2,92
Überlast		1,20	1,20
Total bei Überlast		3,50	3,50
- Thermodynamische Daten			
Gesamte Heizfläche im Kern	m^2	≈ 1944	1962,5
Mittlere Leistungsdichte im Kern	MW/m^3	36,9	40,9
Mittlere spezifische Brennstoffbelastung	MW/t_u	15,7	17,1

	Dim.	KRB - alte Auslegung	KRB - endg. Auslegung
Maximale Brennstofftemperatur bei Nennlast	°C	ca. 1800	2121
Maximale Brennstofftemperatur bei 120 % Nennlast	°C	ca. 2100	2732
Unterkühlung am Kerneintritt	kcal/kg	25,7	25,0
- Hydraulische Daten			
Kühlmittelquerschnitt pro Bündel	mm ²	ca. 7610	6360
Hydraulischer Durchmesser des Bündels	mm	16,1	12,3
Kühlmitteldurchsatz durch Kern	t/h	12300	12250
Zoneneinteilung für Drosselung		2 Zonen	2 Zonen (r/R=0,794)
Mittlerer Dampfblasengehalt im Kern	Vol.-%	ca. 20	18,9
Maximaler Dampfblasengehalt am Kernaustritt (lokal)	Vol.-%	< 80	69,8
Umlauffaktor		12,6	12,01
Druckverluste im Kern für die innere/äußere Drosselzone:			
in den Blenden	at	-	0,35/0,70
durch Reibung	at	-	0,25/0,11
durch Querschnittsverengungen	at	-	0,27/0,11
durch Beschleunigung	at	-	0,03/0,01
durch geodätische Höhe	at	-	0,19/0,16
Gesamtdruckverlust im Kern	at	1,0	1,09/1,09
- Druckgefäß mit Einbauten			
Druckgefäß:			
Grundwerkstoff		-	20 NiMoCr 36
Plattierungswerkstoff		-	Thermanit 2110

	Dim.	KRB - alte Auslegung	KRB - endg. Auslegung
Kühlwassereintrittsstutzen			
Nennweite	mm	600	550
Kühlwasseraustrittsstutzen			
Nennweite	mm	600	550
Entwässerungsstutzen			
Anzahl		-	1
Nennweite	mm	-	40
Instrumentierungsstutzen			
Anzahl		-	2
Nennweite	mm	-	100
Instrumentierungsstutzen			
Anzahl		-	10
Nennweite	mm	-	40
Neutronenflußmessungsstutzen			
Anzahl		-	20
Nennweite	mm	-	40
Kernnotkühlungsstutzen			
Anzahl		-	2
Nennweite	mm	-	100
Vergiftungsstutzen			
Anzahl		-	1
Nennweite	mm	-	50
Entlüftungsstutzen			
Anzahl		-	1
Nennweite	mm	-	40
Abdichtungsentl.-Stutzen			
Anzahl		-	2
Nennweite	mm	-	25
Steuerstabdurchführungen			
Anzahl		-	89
Durchmesser	mm	-	133,5

	Dim.	KRB - alte Auslegung	KRB - endg. Auslegung
Brennelementbündel:			
Aktive Länge	mm	3660	3302
Gesamtlänge	mm	4230	3861
Urangewicht	kp	138	127
Gesamtgewicht	kp	181	198
Steuerstäbe:			
Blattweite	mm	213	198,88
Blattstärke	mm	9,3	6,86
Länge des Vergiftungs- teils	mm	3660	3251,2
Gewicht einschließlich der beweglichen An- triebsteile	kp	-	91
Außendurchmesser der Röhrchen	mm	6,02	4,7
Wandstärke der Röhrchen	mm	0,51	0,64
Dichte des B_4C in den Röhrchen	% der theor. Dichte	75	70



Dampfblasengehalt innerhalb des Kastens $\alpha = 34 \text{ Vol. - \%}$

Dampfblasengehalt im Spalt $\alpha = 0 \text{ Vol. - \%}$

Vergiftungsbleche mit 0,25 % Bor

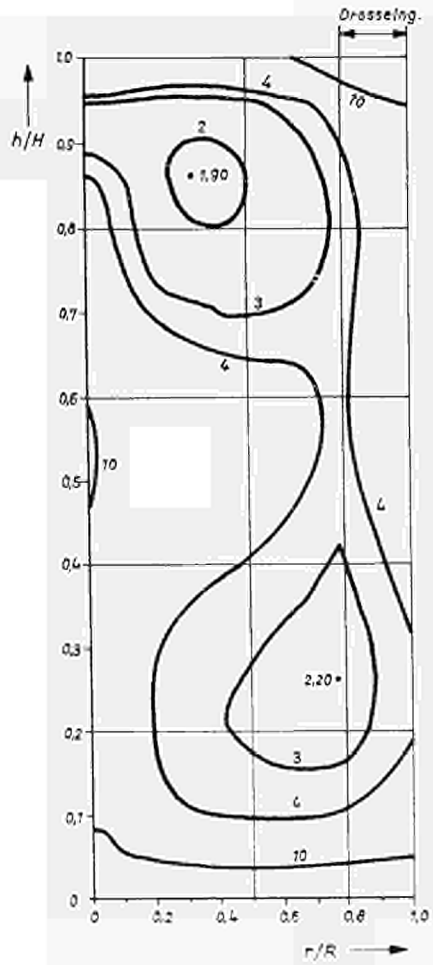
Regelstäbe ausgefahren

Zone I: 2,72 Gew. - % U 235

Zone II: 1,86 Gew. - % U 235

Abb.1

Euratom-
Vergleich **Leistungsdichte im
Brennelementbündel**



Flußverlauf nach Abb.2

Abb.3

Euratam-Vergleich
Verteilung der
Burn-out-Sicherheit

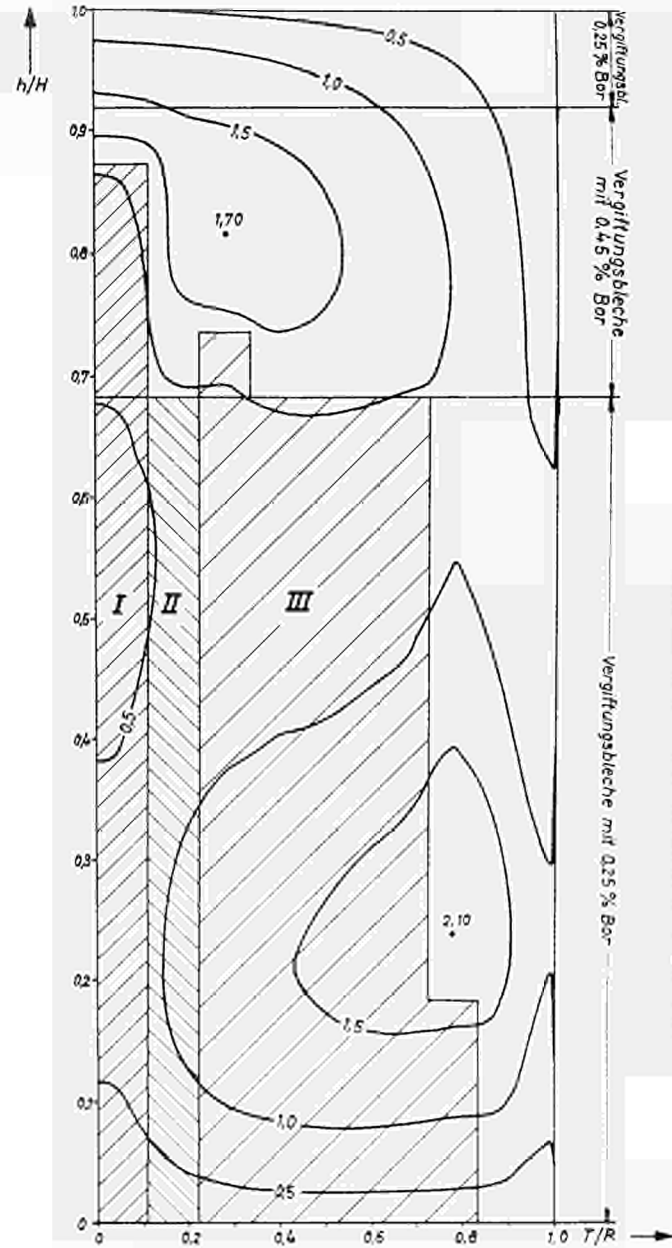


Abb.2

Euratam-Vergleich
Therm. Neutronenfluß
im Reaktor Kern

Xe - Vergiftung und Dopplereffekt
örtlich variabel angenommen.

Zone I: Alle Steuerstäbe eingefahren
Zone II: Jeder zweite Steuerstab eingefahren
Zone III: Jeder vierte Steuerstab eingefahren

Pos.	Bezeichnung	Menge	Maßstab
1	Reaktorhülse	1	1:100
2	Reaktorhülse	1	1:100
3	Reaktorhülse	1	1:100
4	Reaktorhülse	1	1:100
5	Reaktorhülse	1	1:100
6	Reaktorhülse	1	1:100
7	Reaktorhülse	1	1:100
8	Reaktorhülse	1	1:100
9	Reaktorhülse	1	1:100
10	Reaktorhülse	1	1:100
11	Reaktorhülse	1	1:100
12	Reaktorhülse	1	1:100
13	Reaktorhülse	1	1:100
14	Reaktorhülse	1	1:100
15	Reaktorhülse	1	1:100
16	Reaktorhülse	1	1:100
17	Reaktorhülse	1	1:100
18	Reaktorhülse	1	1:100
19	Reaktorhülse	1	1:100
20	Reaktorhülse	1	1:100
21	Reaktorhülse	1	1:100
22	Reaktorhülse	1	1:100
23	Reaktorhülse	1	1:100
24	Reaktorhülse	1	1:100
25	Reaktorhülse	1	1:100
26	Reaktorhülse	1	1:100
27	Reaktorhülse	1	1:100
28	Reaktorhülse	1	1:100
29	Reaktorhülse	1	1:100
30	Reaktorhülse	1	1:100
31	Reaktorhülse	1	1:100
32	Reaktorhülse	1	1:100
33	Reaktorhülse	1	1:100
34	Reaktorhülse	1	1:100
35	Reaktorhülse	1	1:100
36	Reaktorhülse	1	1:100
37	Reaktorhülse	1	1:100
38	Reaktorhülse	1	1:100
39	Reaktorhülse	1	1:100
40	Reaktorhülse	1	1:100
41	Reaktorhülse	1	1:100
42	Reaktorhülse	1	1:100
43	Reaktorhülse	1	1:100
44	Reaktorhülse	1	1:100
45	Reaktorhülse	1	1:100
46	Reaktorhülse	1	1:100
47	Reaktorhülse	1	1:100
48	Reaktorhülse	1	1:100
49	Reaktorhülse	1	1:100
50	Reaktorhülse	1	1:100

Thermische Reaktorleistung 760 MW
 Auslegungsdampfdruck 25 atü
 Auslegungstemperatur 320 °C
 Werkstoffe Grundwerkstoff 20 Mn Mo 55
 Auflegewerkstoff Ni-Cr-50
 Einbauten Nr. 4302 bzw. = 4358

Dampftrockner

Kondensatlauf

56 Zykline
Großabscheider

Niederhalterfilter

Regelventilsteuerung für Kernreaktion

Zuführungsstellung für Kernreaktion

Überes Führungsfilter

Kondensatmessung

Steuerstab

Thermoschild

Kernmantel

350 Brennelementbündel

Vergiftungsbleche

Unteres Führungsfilter

Tragring

Steuerung für Vergiftungsbleche

Steuerstabtrieb

Reaktorhülse
10° vert. ger.

Mittl. Kern

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

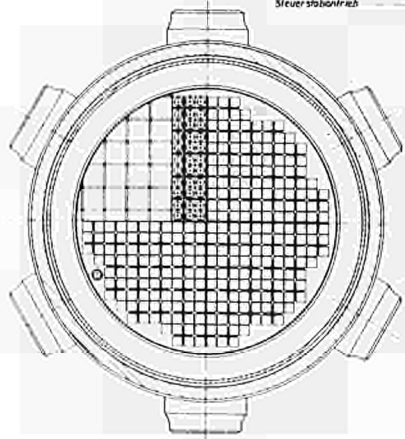
1000 mm

1000 mm

1000 mm

1000 mm

Schnitt A-B



277
 AEG
 K125 - II - 2

Abb. 4

Autoren Nr. 4235

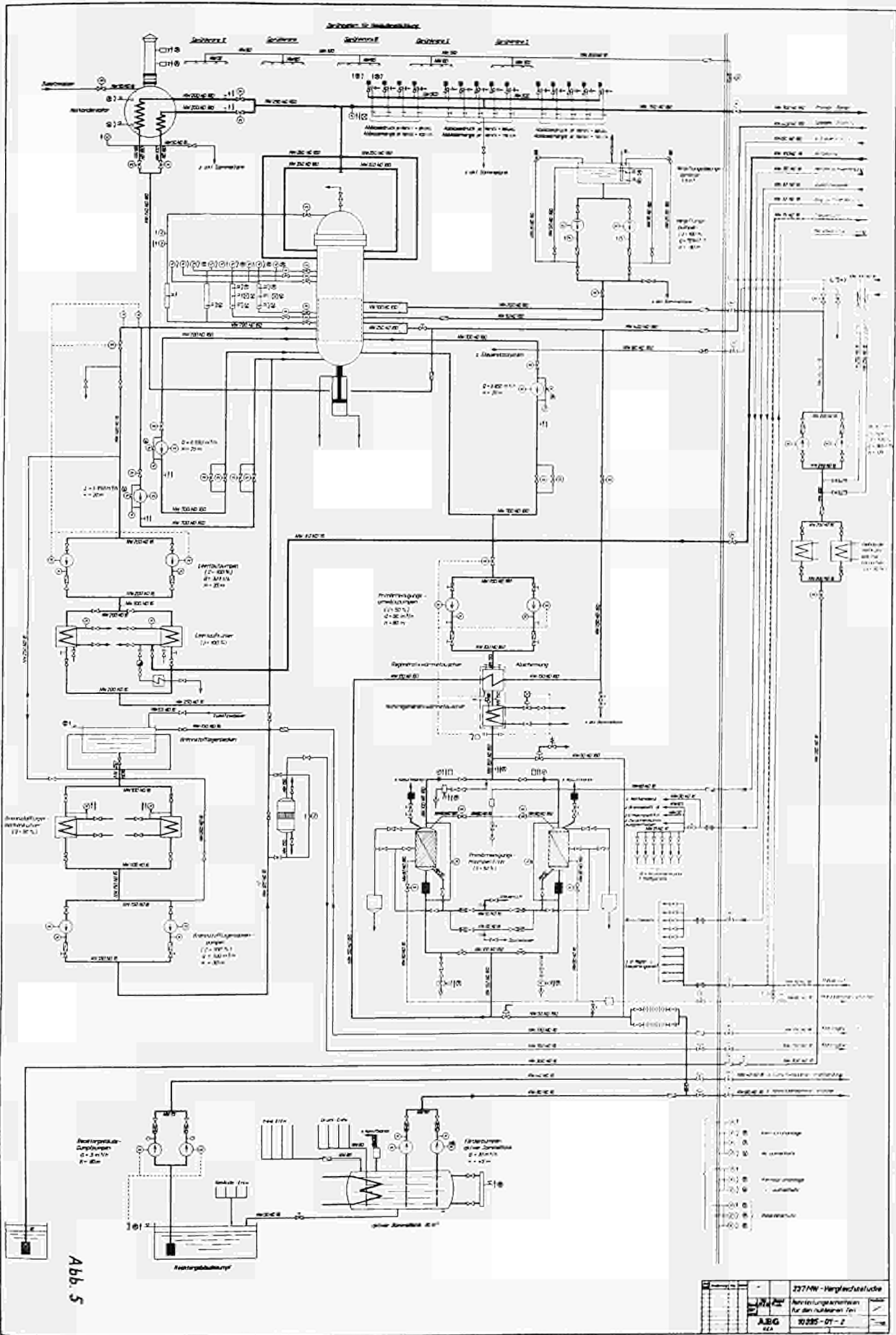
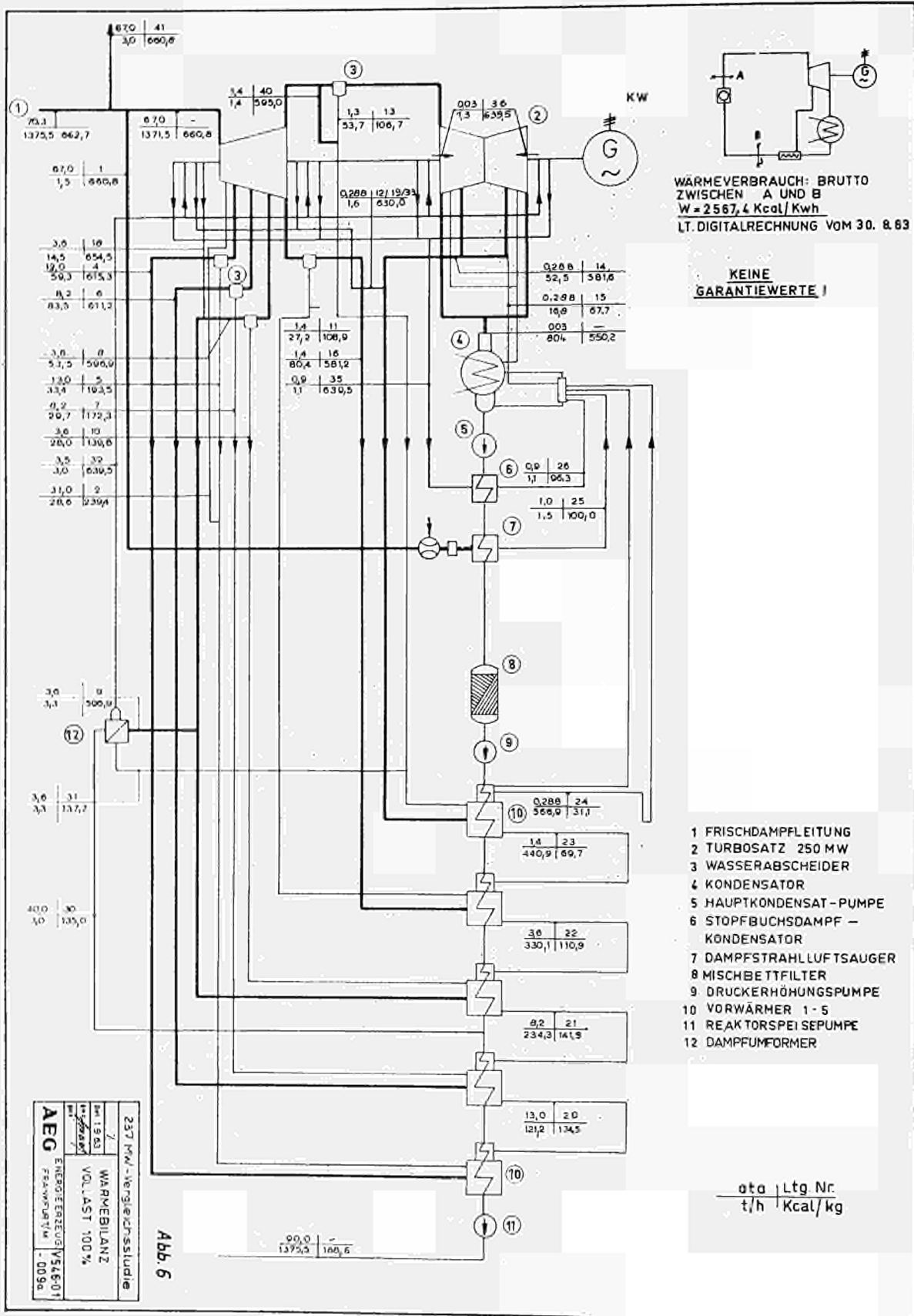


Abb. 5

227 MW - Gasturbinen-Löschung	
ABB	Rechen-Logiksystem für den Notlauf des Turbinen
ABB	10295-01-2



WÄRMEVERBRAUCH: BRUTTO
 ZWISCHEN A UND B
 $W = 2567,4 \text{ Kcal/Kwh}$
 LT. DIGITALRECHNUNG VOM 30. 8. 83

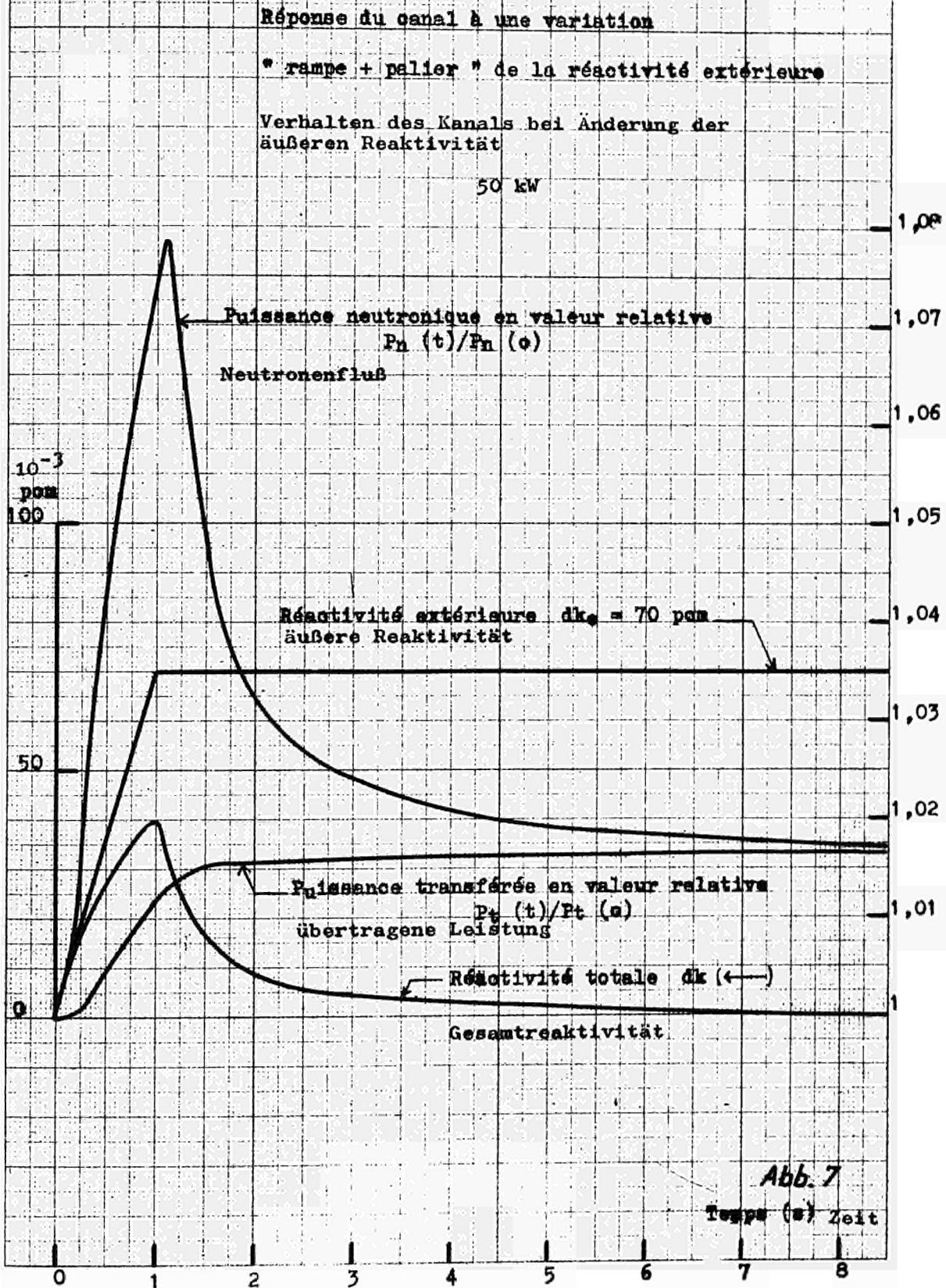
**KEINE
 GARANTIEWERTE !**

- 1 FRISCHDAMPFLEITUNG
- 2 TURBOSATZ 250 MW
- 3 WASSERABSCHIEDER
- 4 KONDENSATOR
- 5 HAUPTKONDENSAT - PUMPE
- 6 STOPFBUCHSDAMPF - KONDENSATOR
- 7 DAMPFSTRAHL LUFTSAUGER
- 8 MISCHBETTFILTER
- 9 DRUCKERHÖHUNGSPUMPE
- 10 VORWÄRMER 1 - 5
- 11 REAKTORSPEISEPUMPE
- 12 DAMPFUMFORMER

AEG	ENERGIEVERB FRANZFATIM - 0090
	VOLLAST 100%
	WÄRMEBILANZ
	237 MW - Vergleichsstudie

Abb. 6

$\frac{ata}{t/h} \quad \frac{Ltg. Nr.}{Kcal/kg}$



Réponse du canal à une variation
" rampe + palier " de la pression
moyenne

Verhalten des Kanals bei Änderung
des Reaktordruckes
57 kW

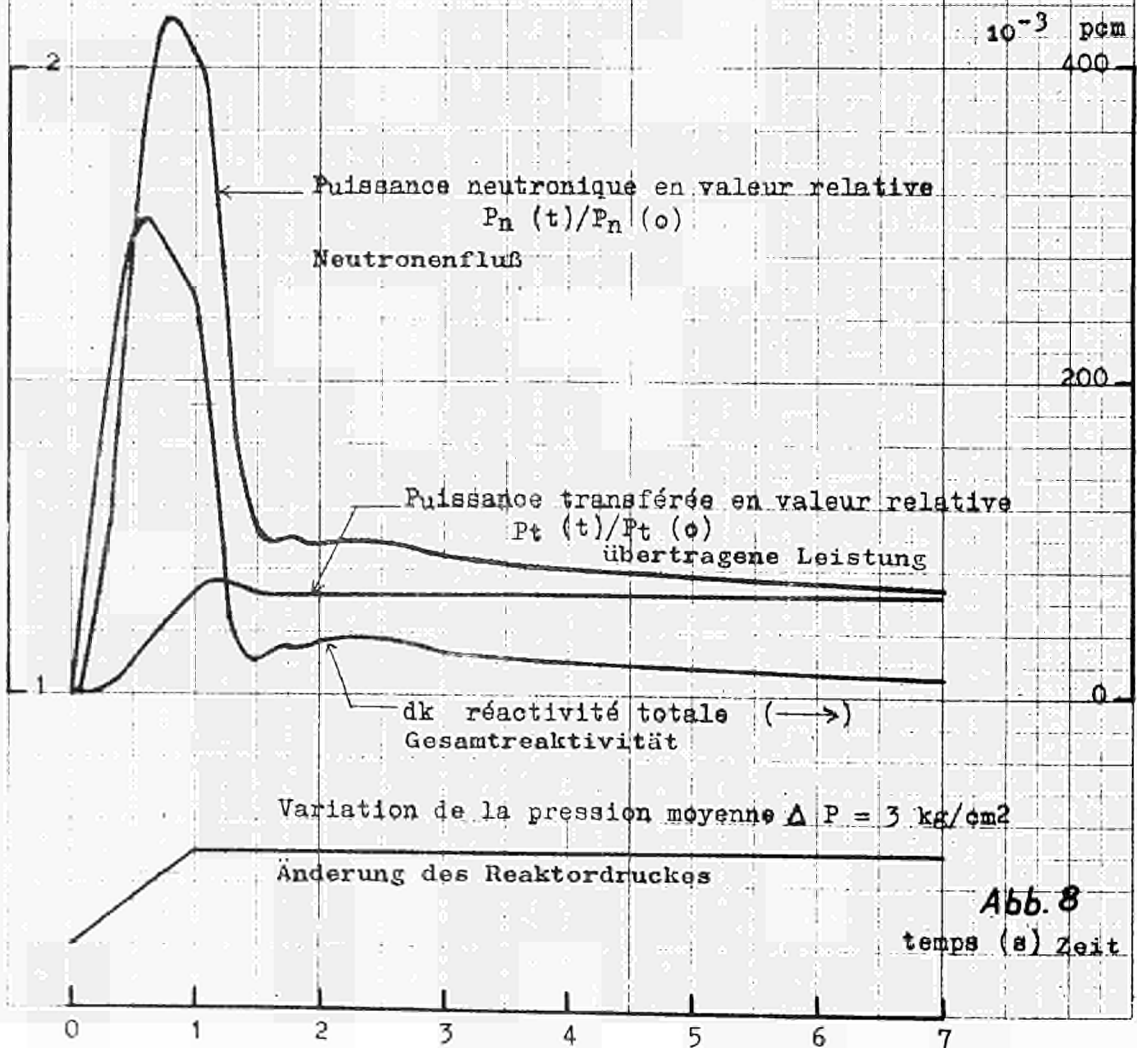


Abb. 8

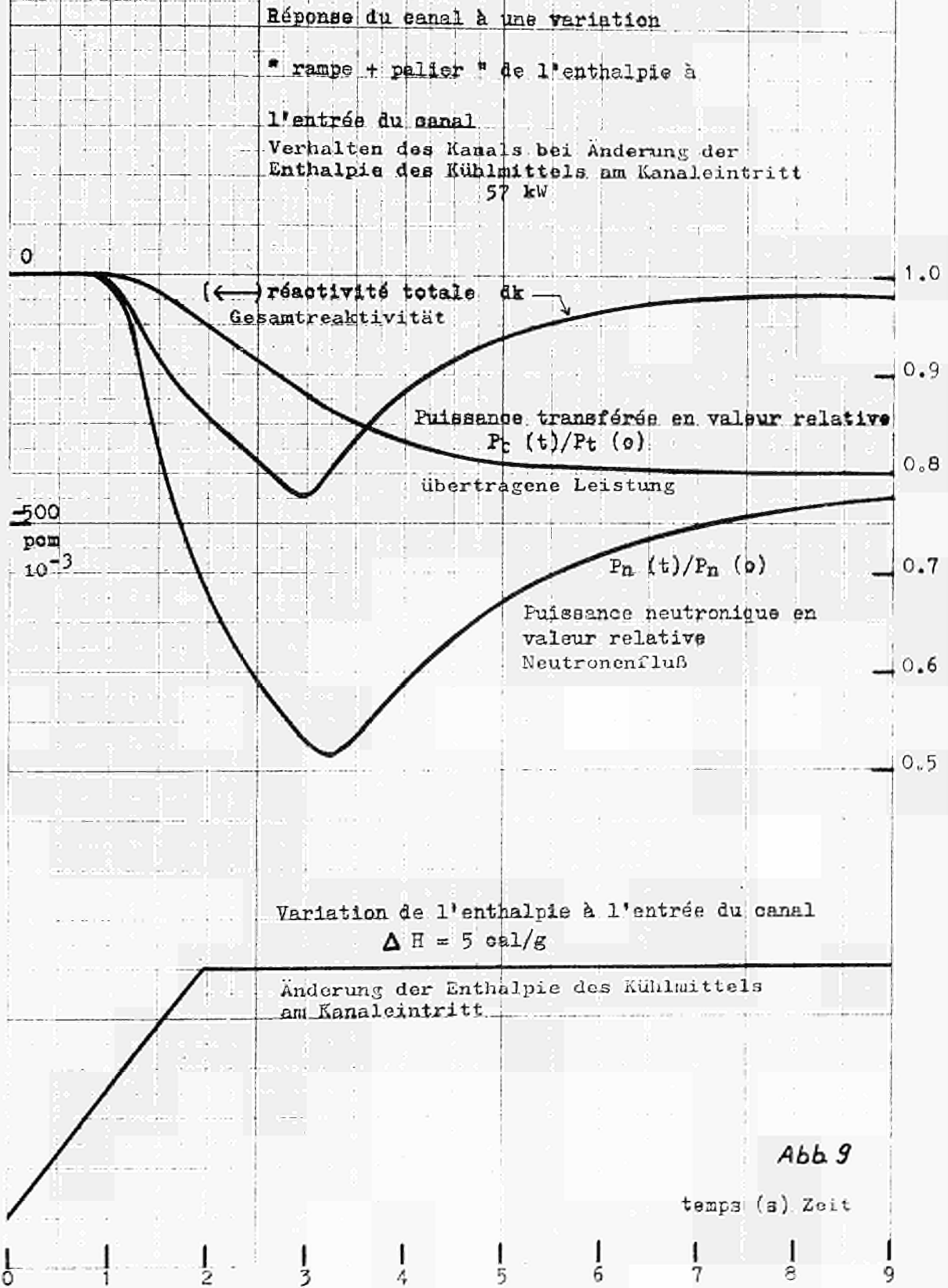


Abb 9

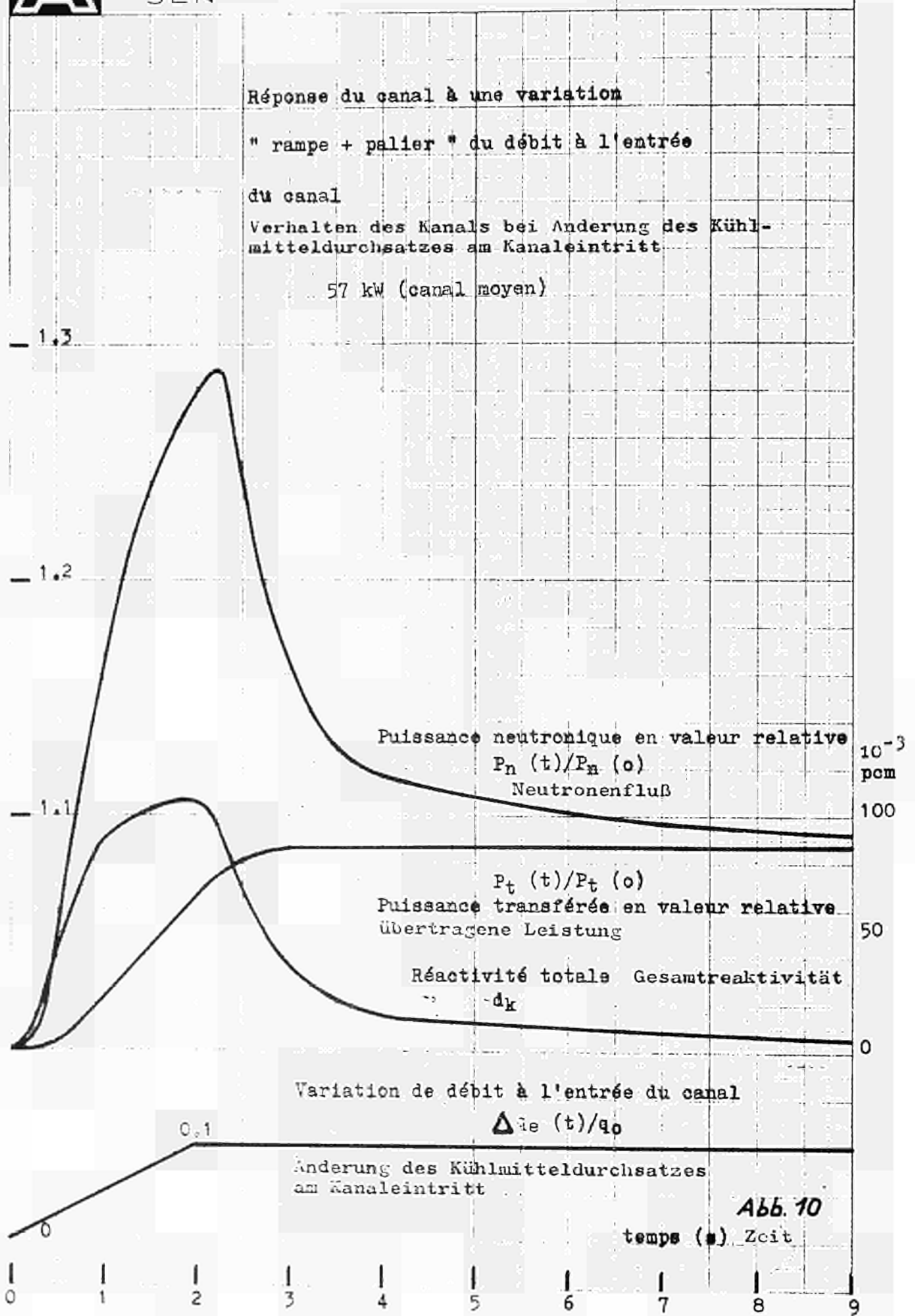


Abb. 10

Variation de la puissance thermique
du réacteur W_{tr}

Thermische Reaktorleistung als
Funktion von X_s und T_r

MW
800

750

700

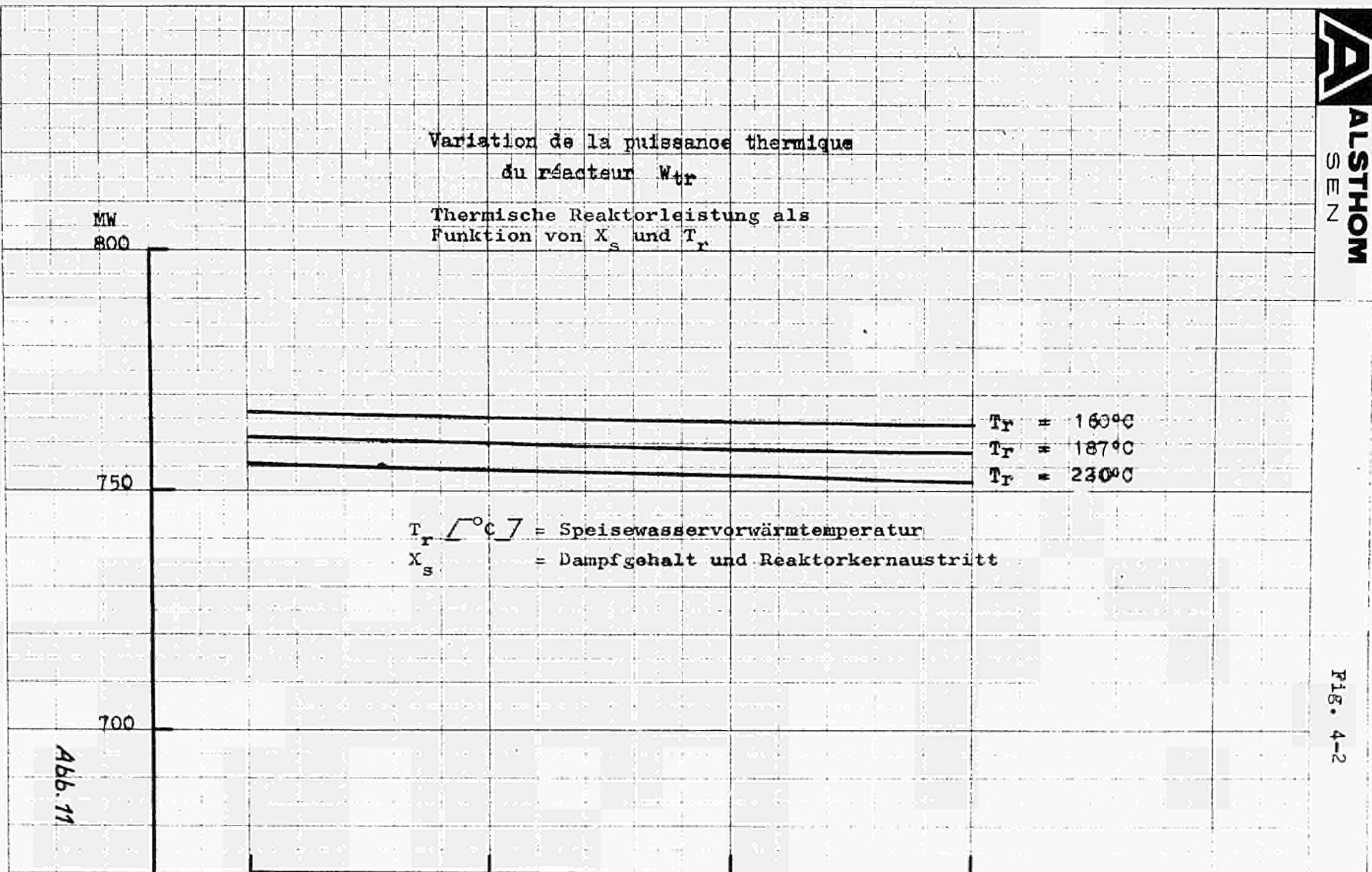
$T_r = 160^\circ\text{C}$
 $T_r = 187^\circ\text{C}$
 $T_r = 230^\circ\text{C}$

$T_r [^\circ\text{C}]$ = Speisewasservorwärmtemperatur
 X_s = Dampfgehalt und Reaktorkernaustritt

0.08 0.10 0.12 0.14 x_s

Abb. 11

Fig. 4-2





ALSTHOM
S E N Z

Fig. 4-3

Fraction moyenne de vapeur
en fonction de X_B et T_r

Mittlerer Dampfblasengehalt als
Funktion von X_B und T_r



Abb. 12

Enrichissement initial E_1 en fonction de X_S et T_r

- Taux d'irradiation moyen du combustible déchargé : 16 500 MWJ/t
- Renouvellement du combustible : par fraction de 1/5

Anfangsanreicherung E_1 als Funktion von X_S und T_r

- mittlerer Abbrand: 16 500 MWd/t
- Brennstofferneuerung: jeweils 1/5 Kern

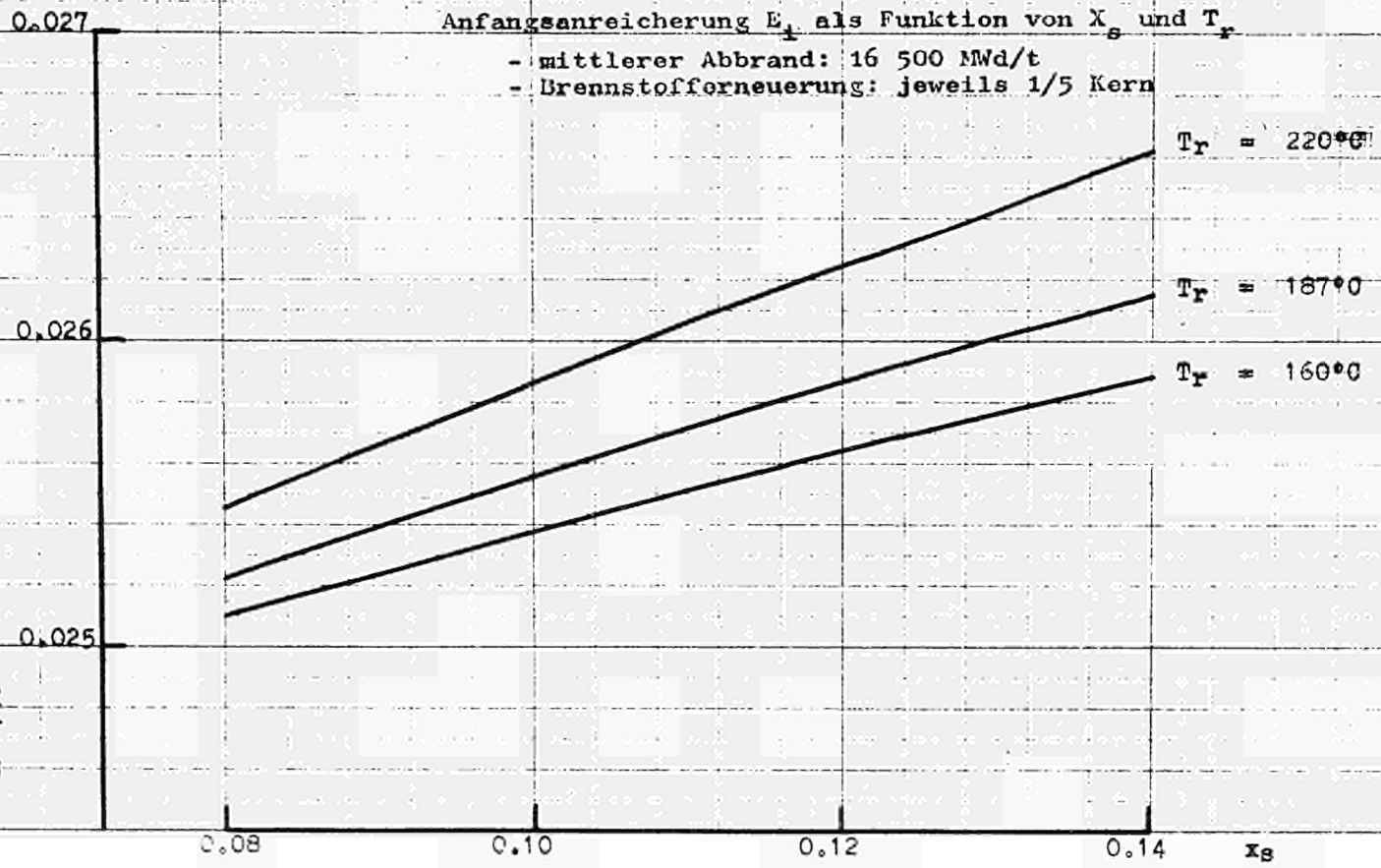


Abb. 13

Fig. 4-13

Enrichissement final du combustible à l'équilibre en
 fonction de X_S et de T_r
 Endanreicherung im Gleichgewichtskern als Funktion
 von X_S und T_r

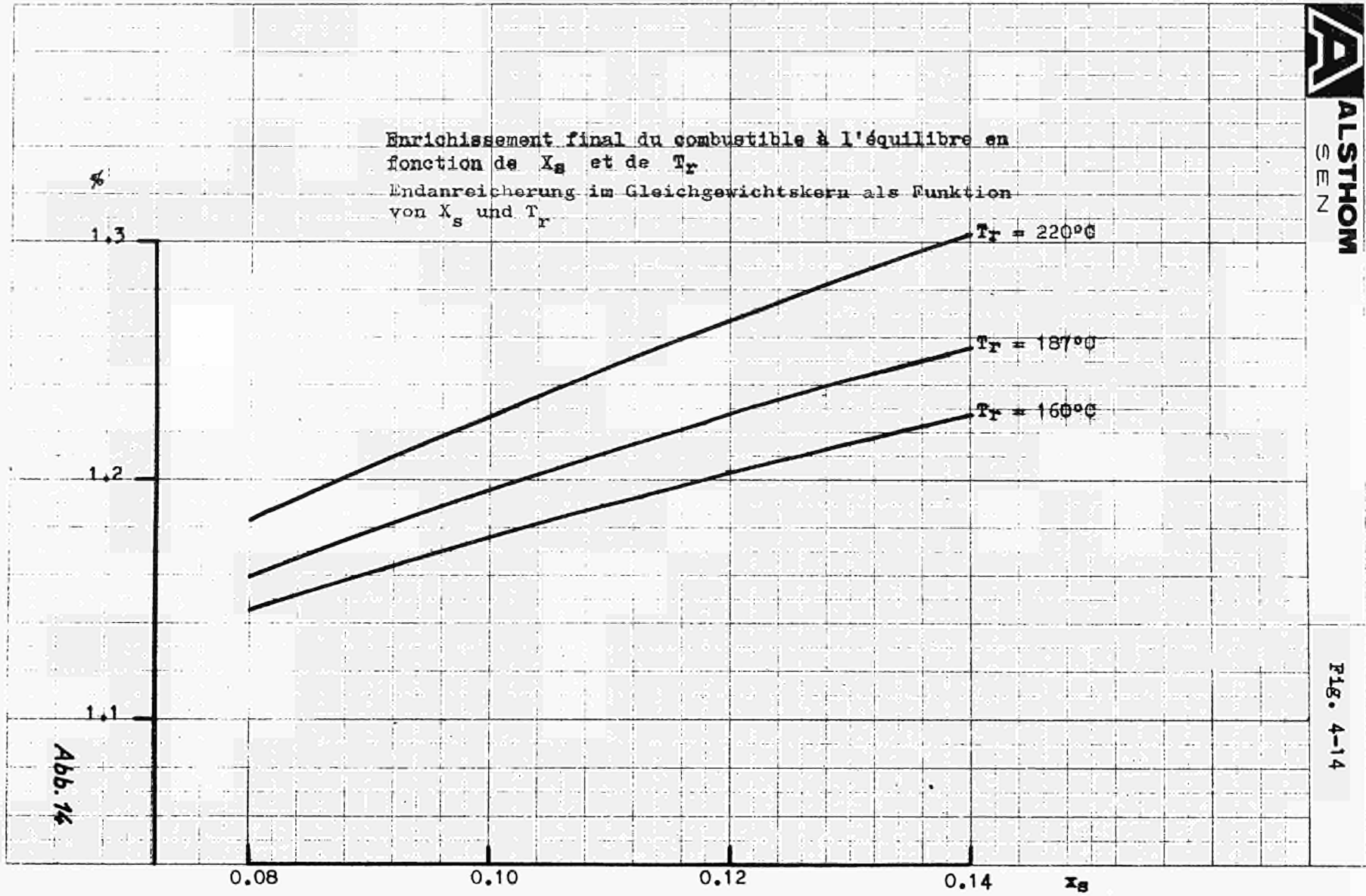


Abb. 14

Fig. 4-14

Pourcentage de Plutonium dans le combustible irradié
 en fonction de X_B et T_r
 Plutoniumgehalt im bestrahlten Brennstoff als
 Funktion von X_B und T_r

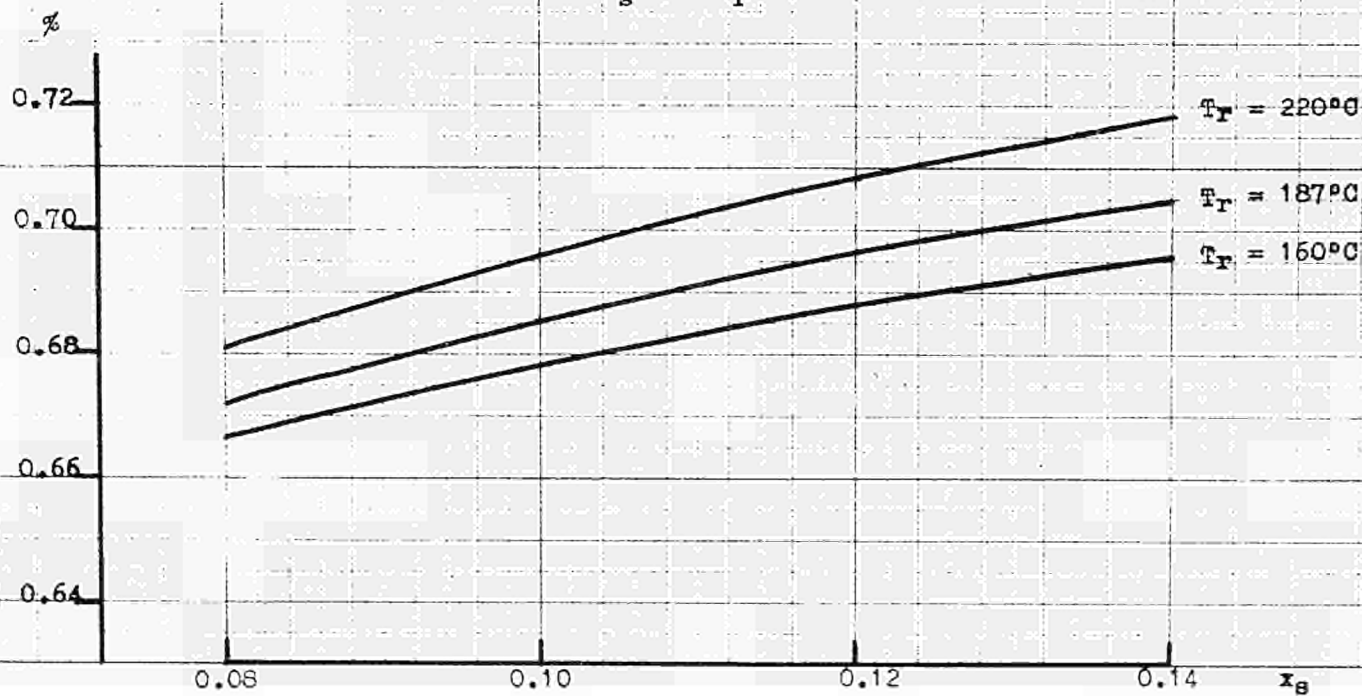


Abb. 15

FIG. 4-15

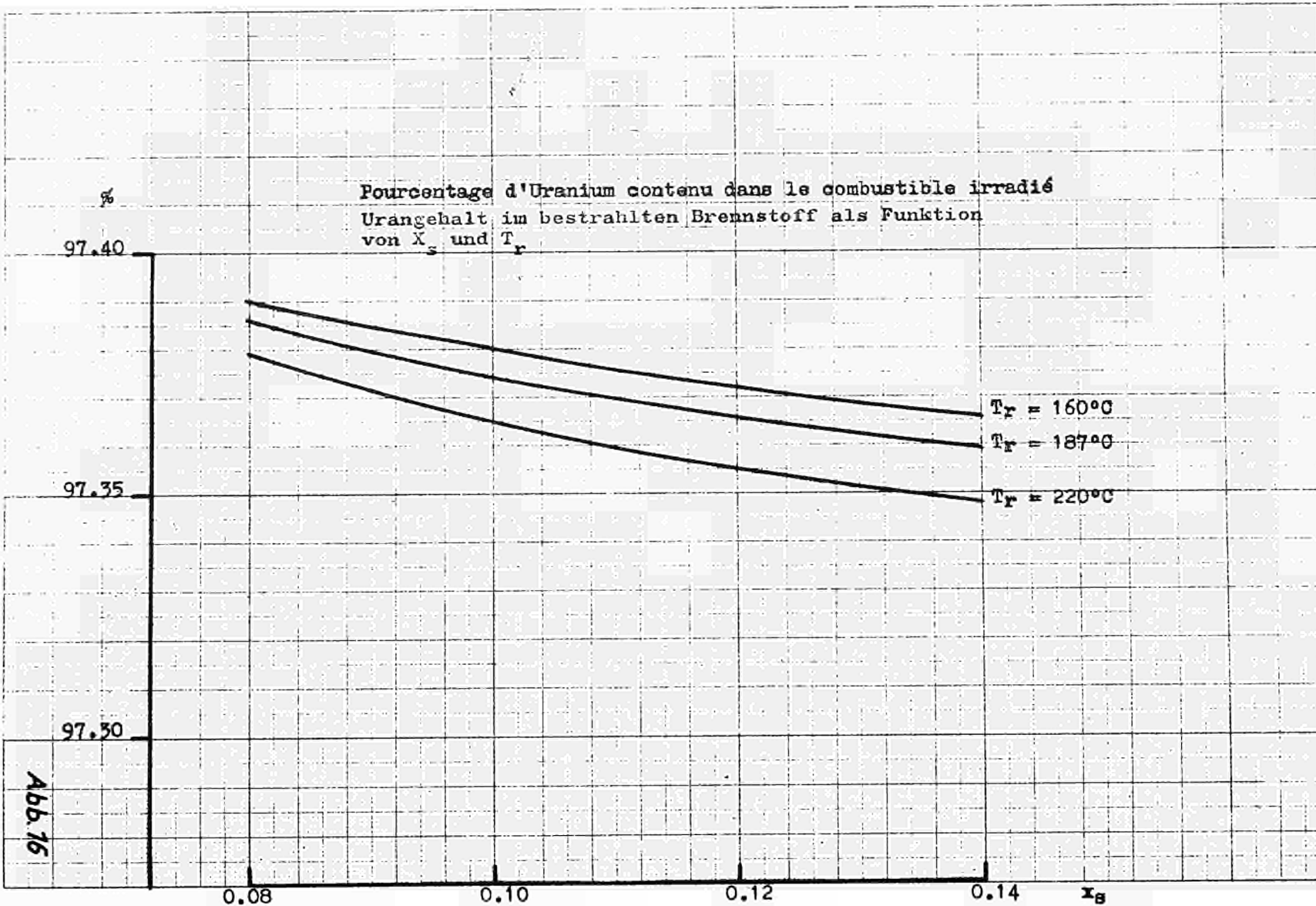


Abb. 76

Fig. 4-16

Coût de combustible du kWh électrique
Brennstoffkosten als Funktion von
 X_g und T_r

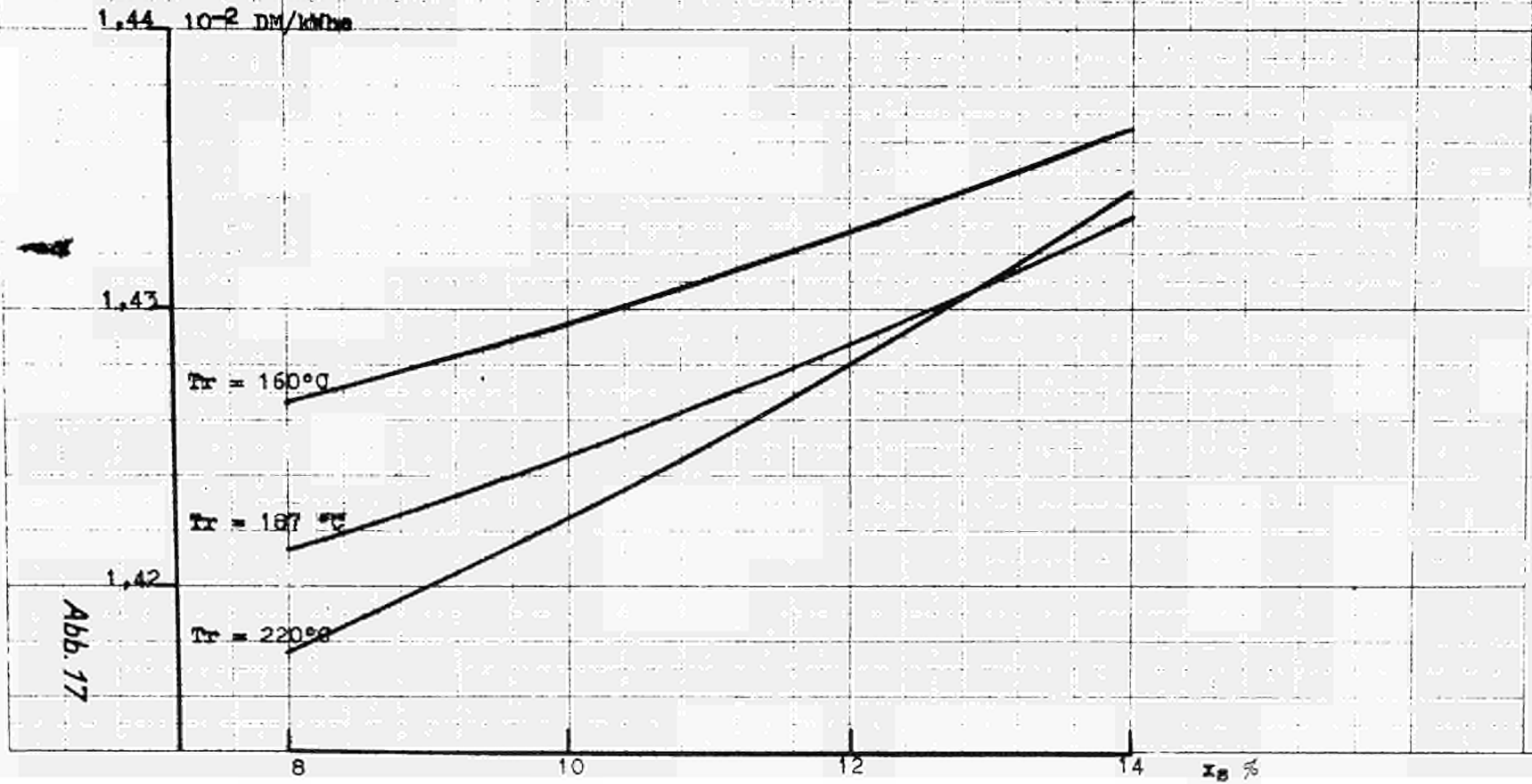


Abb. 17

FIG. 4-20

Distribution radiale du facteur de sécurité minimum f_s
contre le burn-out et

Distribution de la vitesse à l'entrée du cœur W_e

$$T_r = 160^\circ\text{C}$$

$$X_S = 8\%$$

Radiale Verteilung der minimalen burn-out-Sicherheit und
der Kühlmiteleintrittsgeschwindigkeit

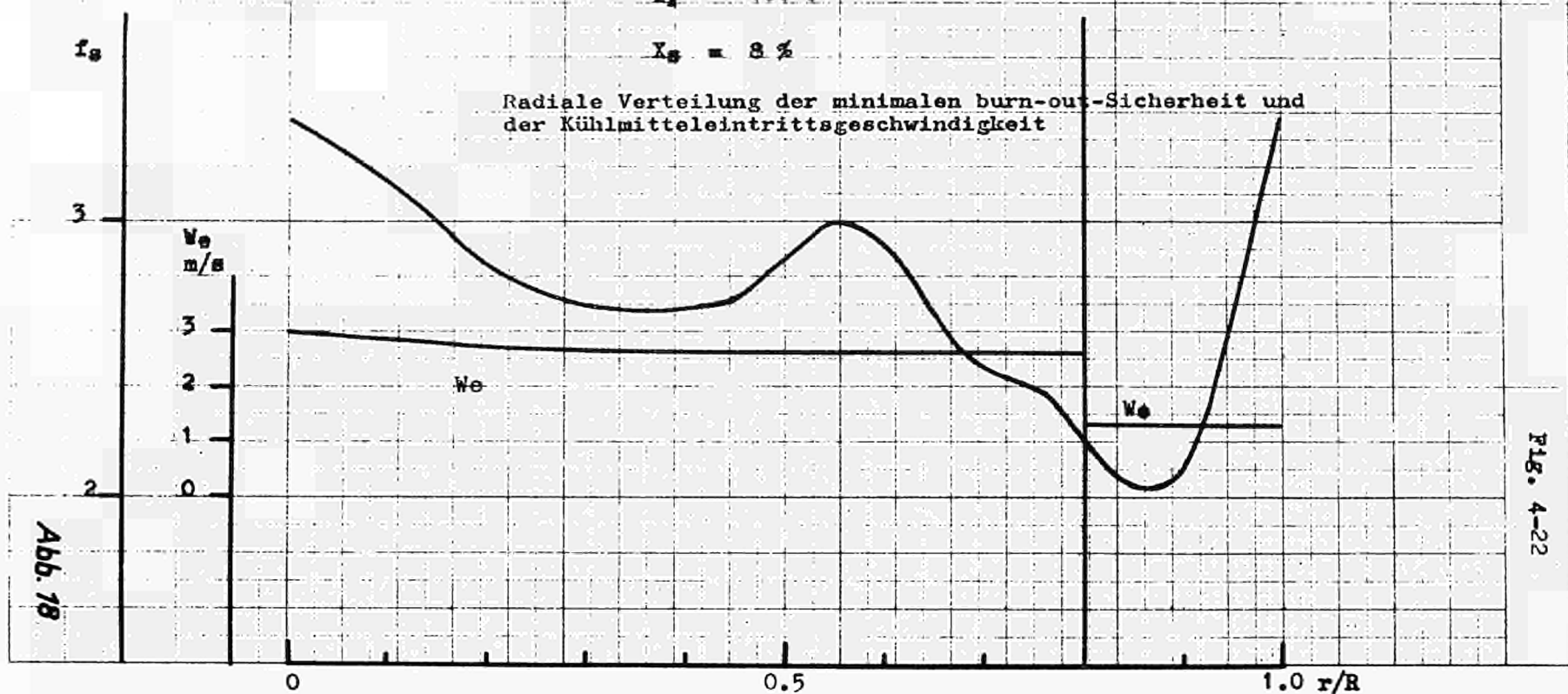


Abb. 18

FIG. 4-22



ALSTHOM
SEN

Fig. 4-23

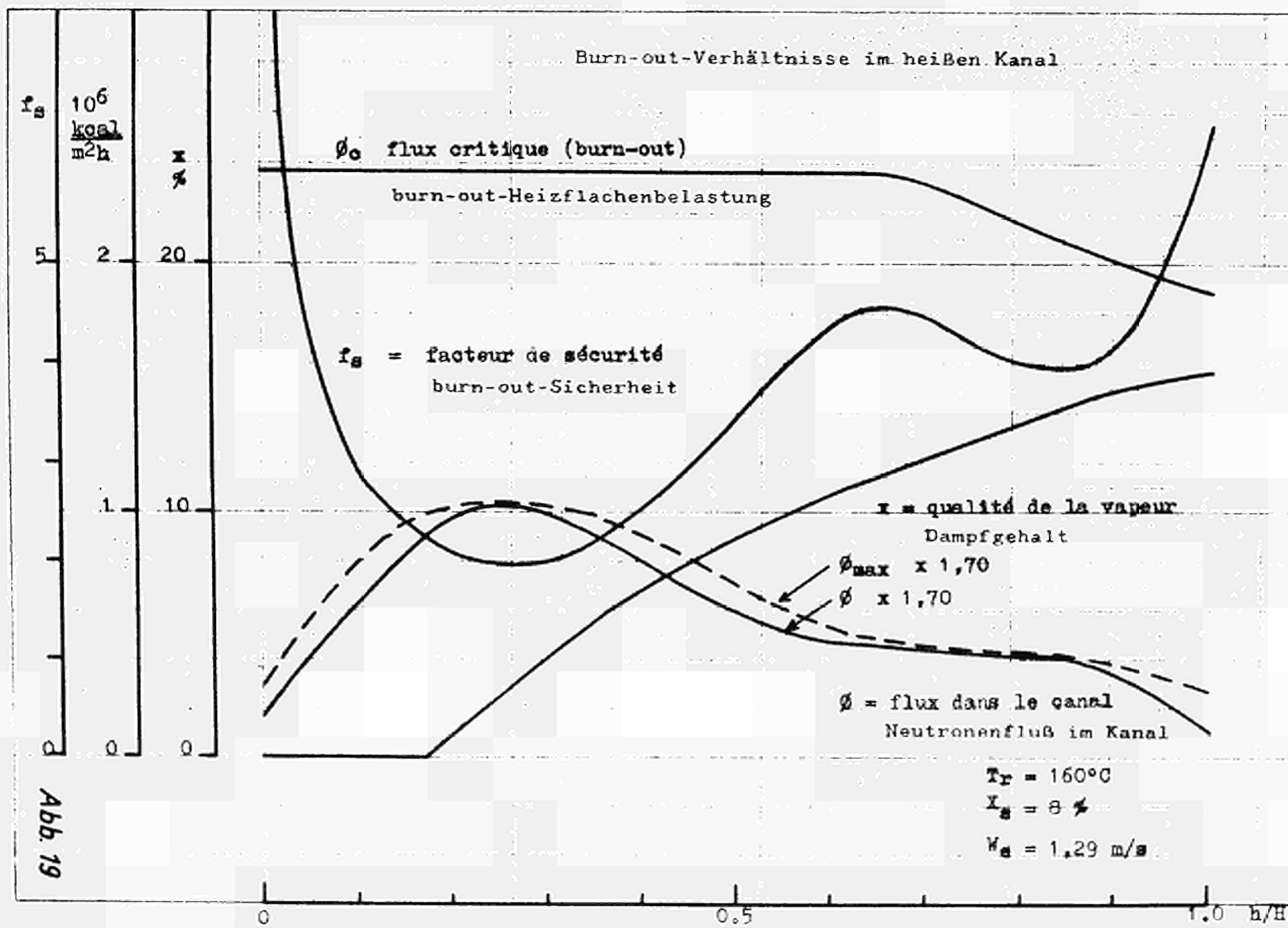


Abb. 19

[Dpf/kWh] ↑

III	II	I
3.33	1.88	1.49
3.32	1.87	1.48
3.31	1.86	1.47
3.30	1.85	1.46
3.29	1.84	1.45
3.28	1.83	1.44
3.27	1.82	1.43
3.26		1.42

Abhängigkeit der Kapital- und Brennstoffkosten
von der Speisewasservorwärmtemperatur T_r

$$X_s = 0.0947$$

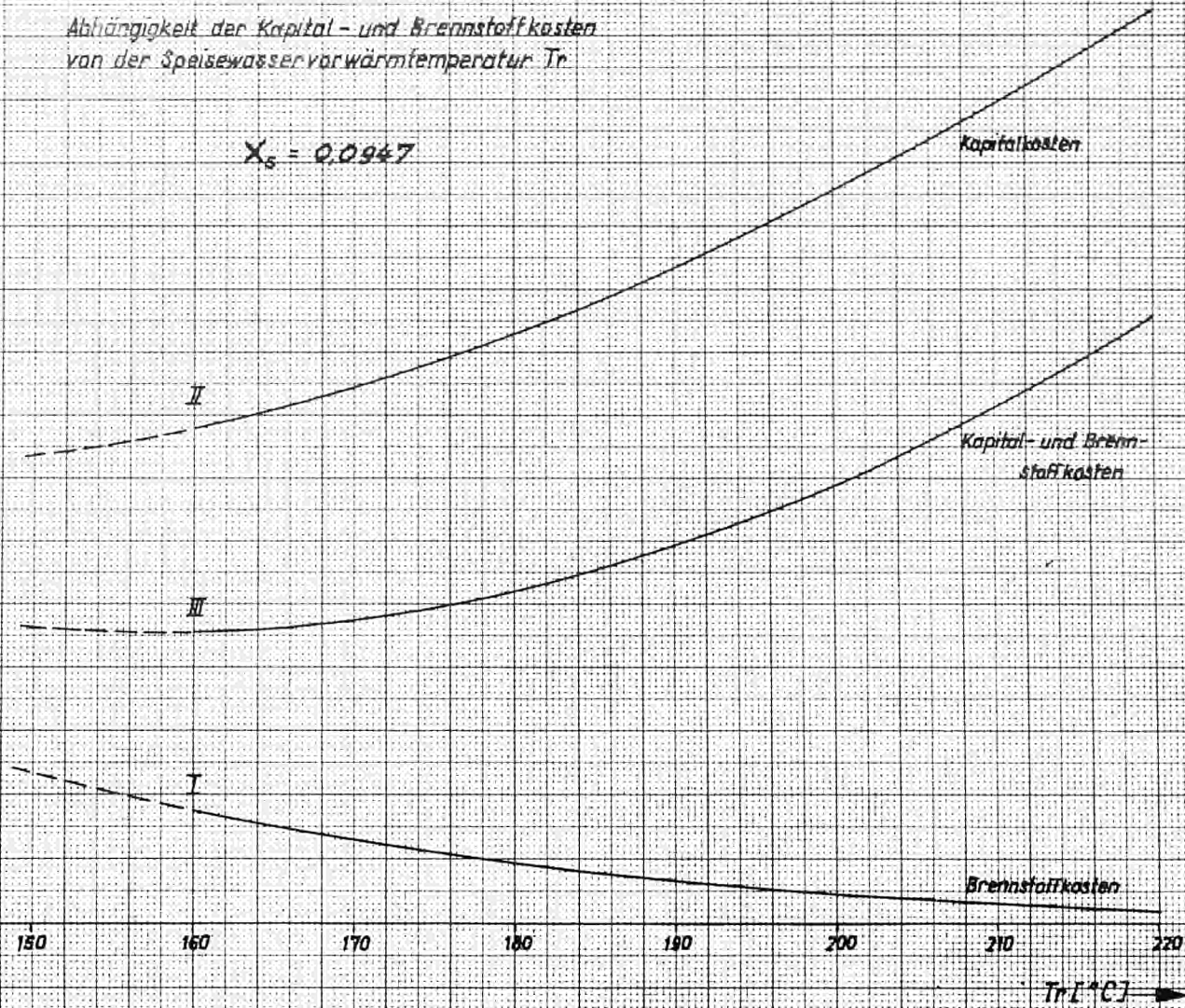
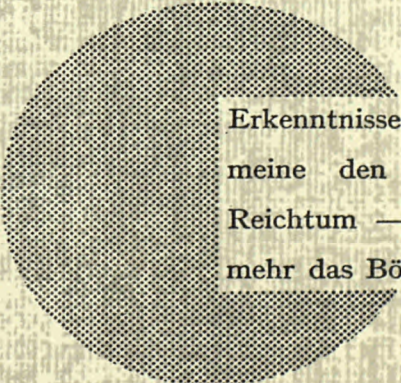


Abb. 20

AEG E32 J 26.10.65 764



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

VERTRIEBSSTELLEN

Alle Euratom-Berichte sind bei folgenden Stellen zu den auf der Rückseite des Umschlags angegebenen Preisen erhältlich (bei schriftlicher Bestellung bitte die EUR-Nummer und den Titel, die beide auf dem Umschlag jedes Berichts stehen, deutlich angeben).

PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles
compte N° 964.558,

Banque Belgo Congolaise - Bruxelles
compte N° 2444.141,

Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,

Belgian American Bank and Trust Company - New York
compte No. 22.186,

Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,
Postcheckkonto - Köln - Nr. 160.861.

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLED
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)