

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Oktober 1967

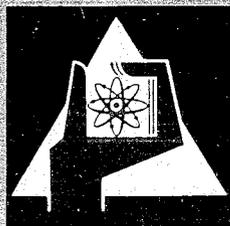
KFK 644
EUR 3705 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

"BAKO"

Ein Programm zur Kosten- und Strategienberechnung bei
Brüterkraftwerken nach der Barwertmethode

P. Jansen



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1967

KFK 644

EUR 3705 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

"BAKØ"

Ein Programm zur Kosten- und Strategienberechnung bei Brüter-
kraftwerken nach der Barwertmethode *)

P.Jansen

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

*) Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

QUESTION 1

1.1.1

1.1.2

1.1.3

1.1.4

1.2.1

1.2.2

1.3.1

1.3.2

1.4.1

Die allgemein für die Berechnung der spezifischen Energieerzeugungskosten von Kernkraftwerken benutzten Methoden [1] müssen für den ausführlichen ökonomischen Vergleich von Schnellbrüterkraftwerken in einigen Punkten erweitert werden. Dies geschieht in der folgenden Beschreibung des Programms BAKØ vor allem in Hinblick auf das unterschiedliche Einbrennverhalten, abhängig vom Core-Blanket-Management während der ersten Teilladungsstandzeiten, in denen sich meist erst eine Gleichgewichts-Plutonium-Menge des Blankets aufbauen muß, ferner durch Berücksichtigung der Abhängigkeit der Fabrikations- und Wiederaufarbeitungskosten von den Eigenschaften des jeweiligen Brütertyps.

Darüber hinaus wurde die Eingabe so gestaltet, daß sie sich leichter an Reaktorkonzept-Berechnungen anschließen läßt; beispielsweise können langwierige Abbrandrechnungen umgangen werden, da pauschale Bilanzen im Kostenprogramm mit eingebaut sind. Das Programm wurde in erster Linie dafür gestaltet, eine ausführliche Parametervariation leicht möglich zu machen. Die Eingabe für verschiedene Typen ist auf ein Minimum beschränkt, der Ausdruck ebenfalls, einige Parameter: Blanketdicke und -Standzeiten sowie die Teilladungszahl können vom Programm automatisch variiert werden.

Um eine Definition der Symbole umgehen zu können, werden die wichtigsten Formeln erst nach der nun folgenden Eingabebeschreibung angegeben.

Das Programm BAKØ benötigt als Ausgangsdaten die im allgemeinen aus zweidimensionalen Rechnungen erhältlichen Daten; das sind die Geometrie der Zonen, die Zusammensetzung sowie die Brutratenverteilung. Es berechnet dann für verschiedene Dicken des axialen und radialen Blankets, sowie verschiedenen Standzeiten des radialen Blankets, neben Detailkosten die spezifischen Energieerzeugungskosten in DPf/kWh und spezifische Größen für das Verhalten dieses Typs in einer anwachsenden gemischten Kernenergiewirtschaft.

Karte 1

Umweltdaten

Daten für einen Kon- verter	NN	30 α-Bezeichnung für diese Umweltdaten
	DPU	Entladefaktor Plutonium in t/GW · a
	DN	Verbrauch Natururan oder Trennleistung in t/GW · a
	EPU	Abbaufaktor Plutonium in t/GW
	EN	Natururan- oder Trennleistungsinventar in t/GW
	DZ	Einbrennzeit in a
	SPE	spezifische Energieerzeugungskosten in DPf/kWh

- ANL Anlagenlebensdauer in a
 CAP Lastfaktor
 A }
 T } Bedarfskurve nach $A \cdot (t-T)^X$ in GW
 X } T als Jahreszahl p.Chr.
 R Zinssatz in Anteilen
 S Steuersatz in Anteilen
 ABW Bauzinsfaktor
 SV Sachversicherung in Anteilen
 HV Haftpflichtversicherung in Anteilen
 CPU Plutoniumpreis in DM/g
 CUA Preis des abgereicherten Urans DM/kg
 SPB spezifische Betriebskosten in DPf/kWh
 ZF Fabrikationszeit in a
 ZW Wiederaufarbeitungszeit in a
 CTR Transportkosten in DM/kg
 A1 }
 A2 } Fabrikationskosten für Core in DM/kg
 A3 } $A1 + A2 \cdot \left(\frac{1}{DPIN} + \frac{A3}{DPIN^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{HC}{A4} \right)$
 A4 } DPIN und HC siehe unten
 A5 }
 A6 } Fabrikationskosten für das axiale Blanket
 A7 } nach $A5 + \frac{A6}{DPIN} + \frac{A7}{DPIN^2}$ in DM/kg
 A10 Fabrikationskosten für das radiale Blanket DM/kg
 A8 }
 A11 } $\frac{A9}{\text{Jahresdurchsatz}} + \begin{cases} A8 \text{ oder} \\ A11 \cdot \text{Plutoniumgehalt} \end{cases}$
 A9 }
 PUO Plutonium für Versuchszwecke in t
 BWBJ Barwertbezugsjahr für Strategien
 ØPTJ Jahr bis zu dem die Strategien gerechnet werden

- Karte 2 NO = 0 nur Fehlertest und Ausdruck der Eingabe
 = 1 Ausdruck der Eingabe, Fehlertest und Rechengang
 N1 Anzahl der Reaktorkonzepte ≥ 1
 N2 = 1 Aufarbeitungskostenberechnung mit A8
 = 2 Aufarbeitungskostenberechnung mit A11

Karte 3 α REAKT α

Karte 4 bis Karte 11 N1-mal

- Karte 4
- N3 = 25 α - Name zur Identifikation des Reaktorkonzepts
 - PTH = thermische Leistung in GW
 - WIRK = Wirkungsgrad als Anteil von 1
 - ABBR = Abbrand in MWd/t
 - EPS = Anteil der Energieerzeugung in anderen Kernen als Pu-239 und Pu-241 aus mittlerem Spektrum
 - ALPHA = Σ_c/Σ_f in Pu-239 und Pu-241 aus mittlerem Spektrum
 - DPIN = Innendurchmesser eines Brennstoffpins in mm
 - AD = direkte Anlagekosten in DM/kWe
 - AI = indirekte Anlagekosten in DM/kWe
 - N4 = n Eingabe von n Corezonen ($1 \leq n \leq 6$)
 - N5 = n Eingabe von n Zonen des ($2 \leq n \leq 6$) axialen Blankets
 - N6 = n Eingabe von n Zonen des ($1 \leq n \leq 4$) radialen Blankets
- Karte 5
- N4-mal
 - Die Ergebnisse der einzelnen Corezonen werden immer addiert.
- Karte 5
- N7 = 5 α - Name des Cores
 - HC = Corehöhe in cm
 - RC = äußerer Radius in cm
 - BRC = Brutrate aus mittlerem Spektrum
(Erzeugte spaltbare Kerne in dieser Zone zu verbrauchten spaltbaren Kernen über alles)
 - TPUC = Teilchen pro cm³ von Pu-239 und Pu-241 mal 10⁻²⁴
 - TUC = Teilchen pro cm³ von U-238 und die übrigen schweren Kerne mal 10⁻²⁴
 - HC muß in allen Corezonen gleich sein
 - TPUC und TUC gilt für dasjenige Erstinventar, das unter Berücksichtigung der internen Brutrate und des Spaltproduktaufbaus den vollen Abbrand garantiert.
- Karte 6 mit Karte 7
- N5-mal
 - Die Ergebnisse der einzelnen Zonen des axialen Blankets werden immer addiert.
- Karte 6
- N8 = 5 α - Name der axialen Blanket-Zone
 - RA1 = innerer Zonenradius in cm
 - RA2 = äußerer Zonenradius in cm
 - TPUA = siehe TPUC in Karte 5
 - TUA = siehe TUC in Karte 5
 - N9 = n Es werden n verschiedene Dicken des axialen Blankets untersucht.

Karte 7 N9-mal

Karte 7 HA = jeweils gewünschte Dicke der axialen Blankets in cm

BRA = zu HA gehörige Brutrate des axialen Blankets im Sinne der Definition von BRC in Karte 5

Die Aufteilung in verschiedene HA muß in allen Zonen des axialen Blankets identisch gleich erfolgen.

Karte 8 mit Karte 9 N6-mal

Die Ergebnisse der einzelnen Zonen kommen erst in dem Maße zur Wirkung, wie die zu variierende Dicke des radialen Blankets fortgeschritten ist. Die Schrittfolge gibt die Summe der Karten 9 an. Zu einer letzten Karte 9 einer I-ten radialen Blanketzone wird automatisch das Ergebnis der ersten Karte 9 der (I+1)-ten radialen Blanketzone addiert. Will man also eine Zonengrenze als Schrittweitepunkt, muß die erste Karte 9 der folgenden Zone die Dicke null angeben.

Karte 8 N10 = $\xi\alpha$ - Name der radialen Zone

TPUR = siehe TPUC in Karte 5

TUR = siehe TUC in Karte 5

N11 = n Es werden n verschiedene maximale Reaktorradien angenommen.

Karte 9 N11-mal

Karte 9 BR = äußerer Reaktorradius in cm
(wenn letzte Karte 9 einer Zone gilt der Radius der ersten Karte 9 der nächsten Zone)

BRR(J) = Brutrate im Sinne der Definition von BRC in Karte 5 der jeweiligen radialen Blanketzone bis RR bei einer Höhe, die der Corehöhe und zweimal der momentanen axialen Blankethöhe entspricht.

(BRR(J) = N9-mal angeben, die fortschreitende Dicke des axialen Blankets berücksichtigend)

Karte 10 N12 = n-Teilladungen pro Corebrennelement-Standzeit werden angenommen

(Im allgemeinen ist N12=1, da eine Änderung der Teilladungszahl ein anderes Reaktorkonzept zur Folge hat).

Z(J) = Teilladungszahl

(Z(J) N12-mal angeben)

N13 = n n-Verhältnisse der Brennelementstandzeit der radialen Blankets zu der des Cores und der axialen Blankets werden angenommen

P(J) = Standzeitverhältnis

(P(J) N13-mal angeben)

Karte 11 α ENDE α

Die hintereinander auftretenden Karten 7 und Karten 9 können in der Eingabe als eine Karte angesehen werden.

Es können $J = 1 \dots n$ weitere Umweltdatensätze angefügt werden. Dann werden alle Reaktorkonzepte mit den neuen Umweltdaten durchgerechnet. Dazu ist folgende Konvention notwendig:

Karte 12 bis Karte 14 $J = 1 \dots n$ -mal

Karte 12 α K $\overline{\text{ORR}}$ α) Muß auf eine Karte geschrieben werden
J)

Karte 13 wie Karte 1 mit neuen Daten

Karte 14 α REAKT α

Erläuterung des Ausdrucks:

Zunächst wird die gesamte Eingabe wieder ausgedruckt. Mit jedem Reaktorkonzept beginnt eine neue Seite. Auf eine Seite kommen maximal 6 Variationen. Jede Variation druckt

Name des Reaktorkonzepts

Kritische Masse in t M_{Pu}

Uranmenge in den Cores, axialen Blankets und radialen Blankets entsprechend dem Stand der Blanketdickeänderung.

Im radialen Teil wird nur 1/P der stehenden Masse angegeben \underline{t}
($M_c, M_{ax}, M_{rad}/P$)

Die Dicke aller drei Bereiche in cm und ihre Brutraten P, Z und die Gesamtbrutrate BR_{ges}

In der nächsten Zeile werden als Datenblockdaten nach den Konventionen von KFK-466

die Isotopenvektoren von Pu-239+241 ($x_0^{\text{Pu}}, x_1^{\text{Pu}}$)

und dem Rest für frisches und abgebranntes Core (x_0^u, x_1^u)

sowie Abbrand a in MWd/kg und Rating r bezogen auf

den gesamten Brennstoff angegeben. Es folgt als DR die

Standzeit in Jahren, der Schwund an schweren Kernen GAM

und die Spaltstoffbelastung in MW/kg.

Weitere Ausdruckdaten sind

KF = Fabrikationskosten gemittelt in DM/kg

KW = Wiederaufarbeitungskosten gemittelt in DM/kg

AK = spezifische Anlagekosten in DPf/kWh

In DPf/kWh folgen ferner

FK = Fabrikationskosten

WK = Wiederaufarbeitungskosten

PU = Plutoniumaufwand - Plutoniumerlös

PA = zusätzliche Plutoniumkosten während der Einbrennzeit

PE = Erlös aus dem aufgebauten Blanketplutonium beim
Abbauen des Kraftwerks

Es folgt dann eine Aufteilung in Erstcore- und laufende Kosten und die gesamten Brennstoffkosten.

CPU-APU gibt den Plutoniumausstoß in t/GW · a bei dem vorgesehenen Lastfaktor an

TD ist eine ausführliche Verdopplungszeit des Einzelkraftwerks.

Die letzte Ausdruckzeile gibt zunächst die gesamten spezifischen Energieerzeugungskosten an, in denen auch die Betriebskosten enthalten sind.

Es folgt die Angabe der Anzahl von GW-Einheiten von Brütern und Konvertern, sowie deren Natururanverbrauch in einer Zweitypenstrategie bis zu dem als höchstem angegebenen Zeitpunkt, beginnend von T als Eingabe. Für das angegebene Jahr werden ferner die Kosten, sowie der Barwert der kumulierten Kosten bezogen auf BWBJ als Eingabe und der kumulierte Gewinn der Zweitypenstrategie gegenüber einer Eintypenstrategie in DM ausgedruckt.

Stößt ein Brüterkraftwerk kein Plutonium aus, so werden die Strategien abgeschaltet und eine entsprechende Nachricht gegeben. Gleichzeitig werden die P und Z Variationen übersprungen.

Zur Rechenmethode

Entsprechend dem Stand der Blanketdickenvariation werden die Massen der einzelnen Zonen berechnet. Die Formeln für die Brennstoffdienste richten sich nach [2] und sind in der Eingabebeschreibung angegeben. Die Wichtung der Fabrikationskosten K_{Fi} erfolgt zum Anschluß der Größen an [1] für das Erstinventar nach

$$K_{FE} = \frac{K_{FC} \cdot M_c + K_{Fax} \cdot M_{ax} + K_{Frad} \cdot M_{rad}}{M_c + M_{ax} + M_{rad}}$$

für den laufenden Bedarf nach

$$K_{FL} = \frac{K_{FC} \cdot M_c + K_{Fax} \cdot M_{ax} + K_{Frad} \cdot M_{rad/P}}{M_c + M_{ax} + M_{rad/P}}$$

und wird in Abänderung von $\underline{17}$ bei der Kostenrechnung für die entsprechende Masse getrennt berücksichtigt. Für die wahlweise konzentrationsabhängigen Wiederaufarbeitungskosten berechnet sich der Jahresdurchsatz aus

$$\underline{M}_c \cdot (1 - 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot ABBR) + M_{ax} + M_{rad/P} \quad] / DR$$

Der Anteil von Plutonium in abgebranntem Brennstoff, gemittelt über das Core und die Blankets berechnet sich zu

$$x_1^{Pu} = \frac{\underline{M}_{Pu} + 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot ABBR \cdot M_c \cdot (BR_{ges} - 1) \cdot (1 - EPS) \cdot (1 + ALPHA)}{\underline{M}_c \cdot (1 - 1,05 \cdot 10^{-6}) + M_{ax} + M_{rad/P}}$$

für Uran aus $x_1^u = 1 - x_1^{Pu}$. Den weiteren Anschluß an $\underline{17}$ liefern

$$a = 0,001 \cdot ABBR \cdot M_c / (M_c + M_{ax} + M_{rad/P})$$

$$r = PTH / (M_c + M_{ax} + M_{rad/P})$$

$$GAM = 1 - 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot a$$

Gemäß $\underline{17}$ werden für jede Teilladung alle anfallenden Kosten sowie alle anfallenden Erlöse mit dem vorgegebenen Zinssatz R auf den Einsatzbeginn des Kraftwerkes diskontiert (Barwertmethode) und dort zur Kostenbestimmung verglichen. Dabei werden Verzögerungszeiten und Bearbeitungsverluste berücksichtigt.

Das Einbrennverhalten wird auf folgende Weise im Sinne von $\underline{17}$ als Korrekturterm behandelt. In den ersten zu entladenden Teilladungen eines frischen Cores treten zusätzlich Kosten gegenüber dem betrachteten Gleichgewichts-

fall nach $\sqrt{1}$ auf, die umso größer sind, je größer Z bzw. $P \cdot Z$ ist. Diese Kosten entstehen dadurch, daß sich ein von Z bzw. $P \cdot Z$ abhängiges Plutonium-Niveau im Reaktor, insbesondere den Blankets, erst aufbauen muß, weshalb (noch kein Gleichgewichtsabbrand beim Entladen!) weniger Pu entladen werden kann. Behandelt man diesen Term wie die Erstcorekosten in der Hauptkostenformel, dann zahlt man die ganze Reaktorlebensdauer Zinsen auf das gebundene Plutonium. Der dadurch entstehende Term zur Aufrechnung auf alle Einnahmen ergibt sich durchsichtig zu (FH siehe unten)

$$(k_1 - k_0) \cdot \frac{(BR_{Core} + BR_{ax} - 1)}{BR_{ges} - 1} \cdot \sum_{J=1}^{Z-1} \left(1 - \frac{J}{Z}\right) \cdot \left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-DR \cdot \frac{J}{Z}} \cdot FH$$

$$FH = F1 \cdot Z \cdot \sqrt{1} + \varphi \left(1 - \left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-L}\right) / \frac{R}{100} \sqrt{1}; F1 = \left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-ZW}$$

φ = Reserveelementfaktor

Mit FH wird der Kostenterm wieder auf die kWh umgelegt. Die eckige Klammer stellt den über L rentenmäßig verzinsten Steueranteil des erbrüteten Pu dar. Die Summe, die deutlich bei $Z = 1$ zu null wird, geht von einem linearen Pu-Anstieg im Reaktor aus und ergibt natürlich mit zunehmender Betriebszeit des Reaktors kleinere Zusatzkosten, bis der Reaktor im Gleichgewicht ist. Wie alles bei dieser Art der Kostenbetrachtung werden die einzelnen Terme auf den Einsatzzeitpunkt des Reaktors barwertmäßig umgelegt. Dieser Term gilt für Core und axiales Blanket. Für das radiale Blanket gilt entsprechend

$$FH \cdot (k_1 - k_0) \cdot \frac{BR_{rad}}{BR_{ges} - 1} \cdot \sum_{J=1}^{P \cdot Z - 1} \left(1 - \frac{J}{P \cdot Z}\right) \left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-DR \cdot \frac{J}{Z}}$$

Natürlich bringt dieses erbrütete Plutonium, das sich dauernd im Reaktor befindet, auch einen Gewinn beim Abstellung des Reaktors nach dem Ablauf seiner Lebensdauer. Die zu verrechnenden Beträge sind dieselben wie oben, nur daß in den Summen der Faktor $\left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-DR \cdot \frac{J}{Z}}$ wegfällt und $FH = \left(1 + \frac{R}{100}\right)^{-L} \cdot F1 \cdot Z$ ist.

Strategien

Die Strategien werden im Sinne der Zweitypenstrategien nach $\sqrt{1}$ numerisch berechnet. Vereinfachend wird darauf verzichtet, zwischen einer Verzöge-

rungszeit bis nach dem Bau eines Reaktors der Pu-Ausstoß beginnt und einer Verzögerungszeit bis der Natururanverbrauch im Gleichgewicht einsetzt, zu unterscheiden. Ferner wird die Wiederaufarbeitungszeit vernachlässigt, die angebracht werden müßte, bis nach dem Ersatz eines Konverters durch einen Brüter das erstere Plutonium-Inventar frei wird. Für den Brüter, dessen Daten nicht eingegeben werden, errechnet sich die Verzögerungszeit aus

$$ZPU = P \cdot DR \left(1 - \frac{P \cdot Z + 1}{2 \cdot Z \cdot P} \right) + ZW + ZF$$

und sein Erstinventar mit erster Nachladung aus

$$I = 1,06 \cdot \frac{x_o^{Pu}}{WIRK \cdot r} \cdot \frac{Z + 1}{Z}$$

Zu Anfang der Strategie werden PUO t Plutonium für Versuchszwecke von der Bilanz abgezogen.

Die Berechnung der Verdopplungszeit erfolgt für das Einzelkraftwerk und auf ausführliche Weise nach

$$T_D = \frac{I}{CPU-APU} - \frac{DR}{Z} + ZPU$$

Was die möglichen Variationen betrifft, die vom Programm automatisch ausgeführt werden können, so wurde auf eine selbständige Optimierung bewußt verzichtet, da es wichtig ist, explizit die Tendenzen und ihre Gründe zu erkennen.

Literatur

- /17 H.Grümm, D.Gupta, W.Häfele, P.Jansen, M.Recker, W.Schmidt, J.Seetzen:
"Ergänzendes Material zum Bericht "Kernbrennstoffbedarf und Kosten verschiedener Reaktortypen in Deutschland" (KFK-366)"
KFK-466, September 1966
- /27 D.Gupta, P.Jansen: "Fuel Cycle Economics of Fast Breeders with Plutonium"
KFK-567, Februar 1967