EUR 285.d

REPRINT

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

DIE GESAMTPLANUNG NUKLEARER UND KLASSISCHER KRAFTWERKE IN EINEM VERSORGUNGSNETZ

von

A.A. DE BOER

1963

Sonderdruck aus

Die Atomwirtschaft

Jhrg. 8, Heft 1 - 1963

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 alle in deren Namen handelnden Personen:

1º — 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;

2º — 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.

SONDERDRUCK AUS DER ZEITSCHRIFT
JHRG. 8, HEFT 1, JANUAR 1963

die atom wirtschaft

DIE GESAMTPLANUNG NUKLEARER UND KLASSISCHER KRAFTWERKE IN EINEM VERSORGUNGSNETZ

VON DR. A. A. DE BOER

VERLAG HANDELSBLATT GMBH · DÜSSELDORF · HANDELSBLATTHAUS

DIE GESAMTPLANUNG NUKLEARER UND KLASSISCHER KRAFTWERKE IN EINEM VERSORGUNGSNETZ

VON DR. A. A. DE BOER, BRÜSSEL)*

1. EINLEITUNG

Diese Untersuchung befaßt sich mit der Frage, wie die Kernenergie am vorteilhaftesten für die Stromerzeugung eingesetzt werden kann, das heißt so, daß sie einen optimalen Anteil der gesamten Stromerzeugung übernimmt.

Berechnet man auf der Grundlage der z. Z. zur Verfügung stehenden Daten und unter Zugrundelegung einer langen Betriebsdauer die kWh-Kosten für Atomstrom, so gelangt man zu einem Betrag, der den Kosten des konventionell erzeugten Stroms nahekommt; in Gebieten mit hohen Steinkohlepreisen können die Gestehungskosten des nuklearen Stroms schon jetzt nahezu mit denen des konventionellen Stroms konkurrieren. Es besteht deshalb auch aller Grund für die Annahme, daß sie bei einer Betriebsdauer von jährlich 7000 Stunden vor 1970 unter die Kosten des konventionellen Stroms sinken [1, 2].

Wenn in der Literatur die Gestehungskosten des Atomstroms mit denen des konventionellen Stroms verglichen werden, wird immer nur ein einzelnes Kernkraftwerk einem einzelnen konventionellen Kraftwerk gegenübergestellt und dabei meistens eine Betriebsdauer von jährlich 7000 Stunden zugrunde gelegt.

Die Kostenfrage im Falle einer nuklear-konventionellen Verbundwirtschaft kann an einem Modell untersucht werden, bei dem man von einem aus mehreren nuklearen und konventionellen Kraftwerken aufgebauten Versorgungssystem ausgeht. An Hand eines solchen Modells kann berechnet werden, welche Kombination von Produktionskapazitäten und welche Verteilung der Produktion zu den niedrigsten Kosten für das gesamte Versorgungssystem führen.

Neue Kraftwerke werden vornehmlich zur Erzeugung von Grundlaststrom eingesetzt. Wird das Versorgungsnetz um ein neues Kraftwerk erweitert, so hat dies für die älteren Kraftwerke eine Verkürzung der Betriebsdauer und damit eine Erhöhung der Erzeugungskosten je Einheit zur Folge. Für die Bemessung der Betriebsdauer eines Kernkraftwerkes ist es somit nicht nur wichtig zu wissen, bei welcher Betriebsdauer es mit dem konventionellen Kraftwerk konkurrieren kann, sondern es kommt auch darauf an, wie sich das Hinzufügen eines oder mehrerer Kernkraftwerke auf die Betriebsdauer und die Kosten der übrigen (klassischen) Kraftwerke auswirkt. Es ist also insbesondere zu prüfen, wie hoch die Gestehungskosten der verschiedenen Stromarten in Abhängigkeit von der Betriebsdauer sind und wie die Betriebsdauer der konventionellen Kraftwerke von der der Kernkraftwerke abhängt. Diese Untersuchung kann man an Hand des Modells durchführen.

Will man eine Entscheidung bezüglich der Kapazität und der Erzeugung treffen, so sind also für jeden Zeitpunkt zwei miteinander in Beziehung stehende Größen, nämlich der Anteil der Kernkraftwerks*kapazität* und der Anteil der Kernkraftwerks*erzeugung*, zu bestimmen. Diese Größen sind gleichzeitig für die Bemessung der Kapazität und der Produktion der *konventionellen* Kraftwerke maßgeblich.

*) Euratom-Kommission.

2. MODELL EINES STROMVERSORGUNGSSYSTEMS

Die Stromerzeugung in einem bestimmten Versorgungsgebiet läßt sich bekanntlich durch die *Lastkurve* charakterisieren. Diese zeigt die in einem bestimmten Zeitraum gelieferte Leistung in Abhängigkeit von der Zeit.

Denkt man sich diese Kurve auf ein Kalenderjahr erweitert, so läßt sich daraus eine andere Kurve, nämlich die *Lastdauerkurve,* ableiten, die durch die Gleichung $c = f(t)$ beschrieben wird. Diese ist definiert als die Beziehung zwischen der gelieferten Leistung c und der Zahl der Stunden t eines Jahres, in denen mindestens eine solche Leistung erbracht wird (Abb. 1). Man kann sich diese Kurve als aus der Lastkurve entstanden denken, indem man die Lastkurve in vertikale Streifen teilt und diese nach abnehmender Leistung aneinanderreiht.

Man kann auf der Ordinate an Stelle der gelieferten Leistung auch auftragen, welcher *Bruchteil* der Höchstleistung geliefert wurde. Nennt man diesen Bruchteil v, dann zeigt die Kurve, welcher Bruchteil v der angeforderten Höchstleistung in einem Zeitraum von t Stunden mindestens erbracht wurde. Diese Kurve ist in Abb. 2 dargestellt.

Die gesamte unterhalb der Kurve liegende Fläche, die in Abb. 1 der Gesamterzeugung entspricht, stellt in Abb. 2 die mittlere Betriebsdauer T unter Höchstlast dar.

In Abb. 3 ist die schraffierte Fläche das Maß für die mögliche jährliche Erzeugung (z. B. in kWh) einer bestimmten Zahl von Kraftwerkseinheiten mit der Leistung c (z. B. in kW), die den Grundlaststrom liefern[1]).

Setzt man für diese Erzeugung p, so läßt sich aus der Kurve folgende Gleichung ableiten:

$$\frac{dp}{dc} = t \tag{1}$$

Darin bedeutet t die als Abszisse abgetragene Zeit. Außerdem sei noch festgehalten, daß sich für die mittlere Betriebsdauer der Kraftwerkseinheiten mit der Leistung c ergibt:

$$T = \frac{p}{c} \tag{2}$$

Man kann sich der Lastdauerkurve bedienen, um festzustellen, bei welcher Kernkraftwerkskapazität die niedrigst möglichen mittleren Gestehungskosten pro kWh gegeben sind. Wir denken uns dazu die Kurvenfläche in Abb. 3 so geteilt, daß c die Leistung der Kernkraftwerke darstellt. Ferner gehen wir davon aus, daß die Kostenstruktur für die verschiedenen Kernkraftwerke dieselbe ist; auch die verbleibenden konventionellen Kraftwerke sollen gleiche Kostenstruktur haben. Dann können die Kosten für die Kernkraftwerke und die konventionellen Kraftwerke durch folgende Gleichungen gegeben werden:

$$K_n = p \cdot k_n + c \cdot i_n = p \left(k_n + \frac{i_n}{T_n}\right) \tag{3}$$

$$K_c = (P - p)k_c + (C - c)i_c = (P - p)\left(k_c + \frac{i_c}{T_c}\right) \tag{4}$$

Hierin bedeutet:

K = gesamte jährliche Erzeugungskosten in Pf
k = veränderliche Kosten in Pf pro kWh
i = feste Kosten pro Jahr in Pf pro kW

Die Indizes n und c bezeichnen die nuklearen bzw. die konventionellen Kraftwerke. Ferner stellen p und c die Produktion beziehungsweise die Leistung der die Grundlast liefernden Kernkraftwerke dar. P und C sind die Gesamtproduktion beziehungsweise die Gesamtleistung. P und p sind ausgedrückt in kWh/Jahr, C und c in kW. Das bedeutet, daß

$$T = \frac{P}{C} \tag{2a}$$

$$T_n = \frac{p}{c} \tag{2b}$$

Teilt man $K_n + K_c$ durch die Gesamterzeugung P, so ergibt dies die mittleren Kosten pro kWh (= $\overline{K}$); hiervon wollen wir das Minimum ermitteln. Dies kann in der Weise geschehen, daß man an Hand der Lastdauerkurve die mittleren Kosten in Abhängigkeit von der Kernkraftwerkskapazität c_n oder — entsprechend dem vorstehenden Absatz — von dem Anteil der Kernkraftwerkskapazität v_n graphisch darstellt. Man erhält dabei eine Kurve entsprechend Abb. 4.

Auf der Abszisse ist v_n aufgetragen und auf der Ordinate $\overline{K}$ der Wert für die mittleren Kosten pro kWh. In dieser Figur sind vier Punkte von Bedeutung:

2.1. Der *Schnittpunkt* P_1 *mit der Ordinate* $v_n = 0$; dieser Punkt entspricht den Kosten für den Fall, daß das Gesamtnetz mit *konventionellem* Strom versorgt wird.

2.2. Der *Schnittpunkt* P_2 *mit der Senkrechten durch* $v_n = 1$ ($c = C$); hier entsprechen die mittleren Kosten dem Fall, daß das Gesamtnetz mit Atomstrom versorgt wird.

2.3. *Der Punkt* P_3, *bei dem die Kosten auf der Höhe von* P_1 *liegen.* Dies ist der Fall, wenn die durch eine schraffierte Fläche in Abb. 3 gegebene Produktion eine mittlere Betriebsdauer hat, bei der Atomstrom und konventioneller Strom zu gleichen mittleren Kosten pro kWh erzeugt werden. Unter dieser Voraussetzung hat ein Austausch der einen Stromart durch die andere keinerlei Einfluß auf die mittleren Kosten; diese liegen somit auf der Höhe von P_1.

In Abb. 5 entspricht v_3 dem v-Wert für Punkt P_3 in Abb. 4. Das heißt, daß in Übereinstimmung mit Fußnote 1, $\frac{0}{v_3} = T_a$, wenn wir mit T_a die Betriebsdauer andeuten, bei der Atomstrom und konventioneller Strom zu den gleichen mittleren Kosten pro kWh erzeugt werden. Diese Betriebsdauer T_a ist eine einfache Funktion der Kostenfaktoren, die sich durch Gleichsetzung der aus (2) und (3) zu erhaltenden Größen für die Kosten *pro kWh* und durch Auflösen nach T ergibt.

Man erhält dann:

$$T_a = \frac{i_n - i_c}{k_c - k_n} \tag{5}$$

2.4. *Der Punkt* P_4, *der der optimalen Aufteilung entspricht,* bei dem die Kosten minimal sind.

Nunmehr ist zu untersuchen, wie sich die Kernkraftleistung finden läßt, die dem Optimum, d. h. dem Punkt P_4 entspricht. Zu diesem Zweck wollen wir folgende Behauptung beweisen: Die *Kapazität, bei welcher die Kostenkurve das Minimum durchläuft, ist gleich der Kapazität c oder der relativen Kapazität v, die man in der Lastdauerkurve für den Abszissenwert* ($t = T_a$) *findet.* Dies ist in Abb. 5 dargestellt.

Der in Abb. 5 als v_4 angedeutete Wert für v_n entspricht dem Wert des Punktes P_4 in Abb. 4. Hier ist T_a gleich dem Abszissenwert t. Der als v_3 angedeutete Wert entspricht dem Wert des Punktes P_3 in Abb. 4; dabei ist nicht der Abszissenwert gleich T_a, sondern die Betriebszeit der schraffierten Fläche, d. h. $\frac{0}{v_3} = T_a$ (siehe Absatz 2.3.).

3. BEWEISFÜHRUNG

Man kann die Behauptung wie folgt beweisen: In der optimalen Situation wird das Austauschen der marginalen Kapazitätseinheit $\triangle c$ (Abb. 6) des einen Typs durch eine Einheit des anderen Typs keinen Einfluß auf die mittleren Kosten haben.

Die Betriebsdauer dieses marginalen Kraftwerks ist somit t; da aber für diese marginale Einheit K_c gleich K_n sein muß, entspricht t genau der Größe T_a.

Dieses Ergebnis stimmt überein mit anderen Studien über die optimale Verteilung einer Produktionskapazität, wie z. B. im Hinblick auf die Gasversorgung [3].

Es liegt auf der Hand, daß sich dieses Resultat aus den Gleichungen der vorausgehenden Absätze ergeben muß.

[1]) Ist die Größe der schraffierten Fläche in Abb. 3 0, dann ist die Betriebsdauer für die Einheiten, die den Grundlaststrom liefern, gleich $\frac{0}{c}$ bzw. $\frac{0}{v}$.

Die niedrigsten Kosten sind gegeben, wenn die erste Ableitung der Kosten nach der Kernkraftwerkskapazität c (oder dem Bruchteil v) den Wert 0 ergibt.

Für die Minimalkosten gilt daher:

$$\frac{d(K_n + K_c)}{dc} = 0 \tag{6}$$

Aus (3) und (4) folgt, daß

$$\frac{dK_n}{dc} = k_n \frac{dp}{dc} + i_n \tag{7}$$

$$\frac{dK_c}{dc} = -k_c \frac{dp}{dc} - i_c \tag{8}$$

Nach (1) gilt ferner

$$\frac{dp}{dc} = t$$

Aus (1), (7), (8) und (6) folgt, daß

$$t = \frac{i_n - i_c}{k_c - k_n} = T_a \tag{9}$$

was mit der oben aufgestellten Behauptung übereinstimmt. Dieses Ergebnis bedeutet insbesondere, daß Änderungen in i_n, i_c, k_c und k_n sich in dem Maß auswirken, wie dadurch T_a geändert wird.

Nimmt man nunmehr an, daß sich die Größe T_a infolge von Änderungen der Kostenfaktoren k_n und i_n (und gegebenenfalls k_c und i_c) ändert, während die Nachfrage, das heißt die Belastungskurve $c = f(t)$, keine Änderung erfährt. In diesem Falle wird sich die — optimale — Kernkraftwerkskapazität c ändern, und diese Änderung kann, wenn man nach Gleichung (9) rechnet und T_a für t setzt, einfach aus der Belastungskurve abgelesen werden.

4. FOLGERUNGEN

Die aus einer gegebenen Lastdauerkurve bestimmbare Größe T liefert die Größe für die optimale Kapazität als Funktion von T_a.

Die optimale Kernkraftwerkskapazität hängt mit T_a nach Gleichung (9) von den Kostenfaktoren i und k und nach Abb. 5 von der Gestalt der Lastdauerkurve ab. T und T_a stellen dabei die Nachfrage bzw. das Angebot dar.

Kehren wir nunmehr zu der Kostenkurve (Abb. 4) zurück: Aus Vorstehendem ergibt sich, daß die Abszisse der Punkte P_1, P_2, P_3 und P_4 nur von den obengenannten, die optimale Kernkraftwerkskapazität bestimmenden Parametern T_a, T_n und T abhängt.

Da die Lastdauerkurve für eine gegebene Größe T nicht stark veränderlich ist, hängt die Lage des Optimums bei gegebenem T_a in erster Annäherung nur von T ab. In bezug auf die Ordinate der Kostenkurve ist die Lage jedoch auch von den Kostenfaktoren abhängig.

Ändert sich also die Größe T_a, so ist die Lage der neuen Kurve von den Kostenfaktoren selbst abhängig. Für die Lage des die optimale Kernkraftwerkskapazität anzeigenden Punktes ist diese Kurve aber maßgeblich. Dies kann auf folgende Weise illustriert werden:

Die Abb. 7 zeigt die Kurve P_1P_2 für eine bestimmte Situation. Wird nun T_a kleiner, so kann dies zwei Ursachen haben: eine Erhöhung der Kosten für konventionellen Strom ($P_1'P_2'$) oder eine Senkung der Kosten für Atomstrom ($P_1''P_2''$). Ist die Größe T_a für diese zwei neuen Kurven *gleich* (und kleiner als für P_1P_2), so liegt $P_1'P_2'$ *über* und $P_1''P_2''$ *unter* P_1P_2. Die wesentlichen Punkte P_4' und P_4'' liegen aber — und zwar unabhängig von den Kostenfaktoren — bei dem gleichen durch T_a bestimmten Abszissenwert.

Bei der Kostenkurve wurde davon ausgegangen, daß ausschließliche Versorgung mit Atomstrom ohne konventionelle Kraftwerke teurer ist. Es sind jedoch folgende drei Fälle denkbar, die in Abb. 8 wiedergegeben sind. Im ersten Fall (a) sind die Kosten bei ausschließlicher Ver-

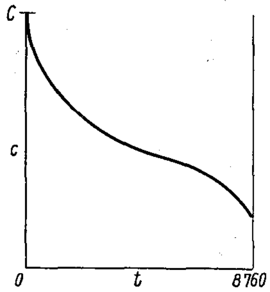


Abb. 1: Lastdauerkurve.
c = Kapazität
C = Höchstlast

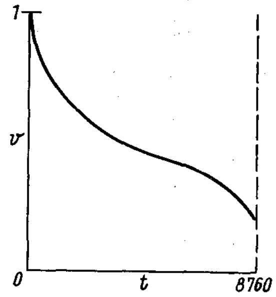


Abb. 2: Lastdauerkurve.
v = Bruchteil der Höchstlast

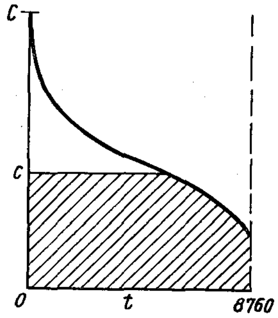


Abb. 3: Aufteilung der Stromerzeugung.
Erklärung im Text

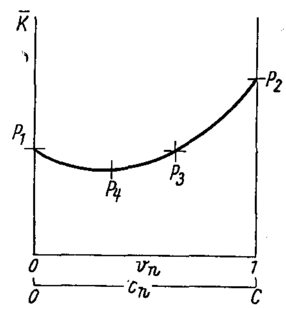


Abb. 4: Die mittleren Kosten $\bar{K}$ in Abhängigkeit von v_n.

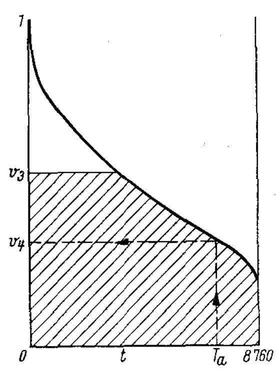


Abb. 5: v_n-optimal in Abhängigkeit von T_a.
Erklärung im Text

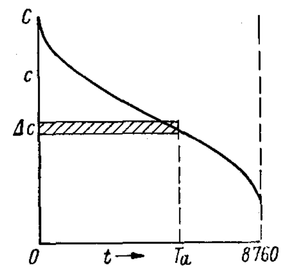
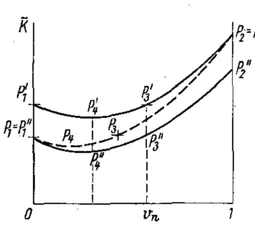


Abb. 6: Beweis der Stellungnahme (siehe Text).

Abb. 7: Einfluß einer Änderung von T_a auf die Kostenkurve.
P_1P_2: Kurve für T_a
$P'_1P'_2$: Kurve für T_a, wenn $K'_c > K_c$ und $K'_n = K_n$
$P''_1P''_2$: Kurve für T'_a, wenn $K''_c = K_c$ und $K''_n < K_n$



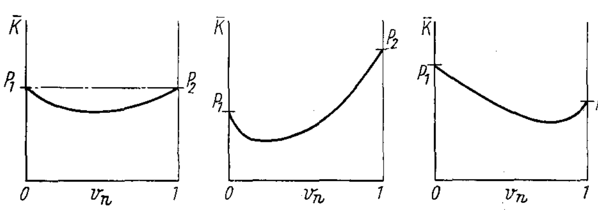


Abb. 8: Die Kostenkurve in Abhängigkeit von v_n für die drei möglichen Fälle.
Links: $K_n = K_c$ (für das gesamte Versorgungsnetz)
Mitte: $K_n > K_c$ (für das gesamte Versorgungsnetz)
Rechts: $K_n < K_c$ (für das gesamte Versorgungsnetz)

sorgung mit Atomstrom und ausschließlicher Versorgung mit konventionellem Strom des ganzen Versorgungsnetzes gleich. In diesem Fall liegen P_1 und P_2 auf gleicher Höhe.

Im zweiten Fall (b) ist ausschließliche Versorgung mit Atomstrom teurer als ausschließliche Versorgung mit konventionellem Strom. Dies ist also die bereits oben behandelte Form der Kurve.

Der dritte Fall (c) tritt ein, wenn ausschließliche Versorgung mit Atomstrom für das ganze Versorgungsnetz *billiger* ist als ausschließliche Versorgung mit konventionellem Strom. Dies bedeutet nicht nur, daß P_2 niedriger liegt als P_1. Es zeigt sich nämlich, daß wieder ein Optimum gegeben ist, wenn der konventionelle Strom nicht in vollem Umfang durch Atomstrom ersetzt wird. Unter dem Gesichtspunkt der Kosten ist es in diesem Falle nicht günstig, das ganze Versorgungsnetz mit Atomstrom zu speisen. Selbst wenn also Atomstrom für das ganze Versorgungsnetz vorteilhafter ist, kann man Einsparungen dadurch erzielen, daß man Spitzenbelastungen durch Einschaltung von konventionellen Kraftwerken bewältigt. Diese Lage wird nicht nur in Europa und erst in Zukunft eintreten, sondern besteht jetzt bereits in Gebieten, in

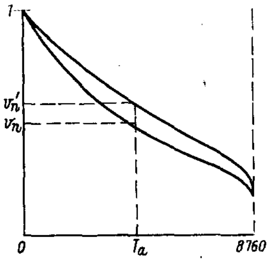


***Abb. 9:** Einfluß einer Zunahme der Größe T auf v_n-optimal.*

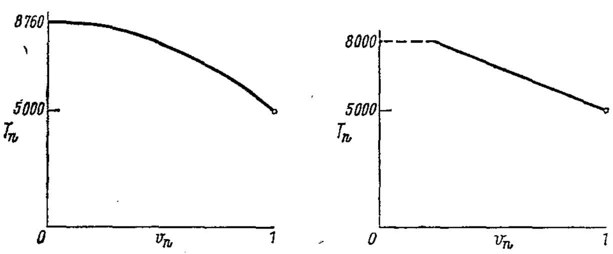


***Abb. 10:** Maximalwert für T_n in Abhängigkeit von v_n abgeleitet von einer Lastendauerkurve für T = 5000 (links); T_n in Abhängigkeit von v_n, korrigiert (rechts) (siehe Text).*

denen konventioneller Strom z. B. wegen der mit dem Transport von Steinkohle verbundenen Kosten relativ teuer ist.

Schließlich ist noch zu bemerken, daß die mittlere Betriebsdauer im Laufe der Zeit zunehmen wird. Ein Diagramm der in den Abb. 2 und 3 gezeigten Gestalt gilt jedoch nur für eine bestimmte Lastdauerkurve; nimmt die mittlere Betriebsdauer zu, so liegt die neue Kurve über den alten. Damit verlagert sich auch das Optimum. Dies zeigt Abb. 9. Bei gleichem T_a ist es dann also vertretbar, der Kernkraftwerkskapazität einen größeren Anteil einzuräumen, da das Optimum nach oben rückt (von v_n nach v_n' in Abb. 9).

Aber auch der umgekehrte Fall ist durchaus möglich. Wenn ein weniger entwickeltes Gebiet industrialisiert werden soll, kann man in der Weise vorgehen, daß man zuerst kontinuierlich arbeitende Betriebe errichtet. Dies bedeutet, daß zunächst mehr Grundlastkraftwerke benötigt werden als später; daraus folgt, daß es hier darauf ankommen kann, für einen möglichst schnellen Einsatz der Kernenergie zu sorgen und in einer späteren Phase die Stromerzeugungskapazität durch konventionelle Wärmekraftwerke zu erweitern.

5. ANWENDUNG DES MODELLS

Musil [4] hat Lastdauerkurven für unterschiedliche Werte der mittleren Lastdauer T bestimmt. An Hand dieser Kurve kann die optimale Kapazität für unterschiedliche T_a-Werte bestimmt werden.

Bei der Ableitung des Modells ist man stillschweigend davon ausgegangen, daß die schraffierte Fläche in Abb. 3 die Stromerzeugung der Kernkraftwerke darstellt. Bekanntlich stellt diese Fläche aber die mit Hilfe der bestimmten Leistung theoretisch erreichbare *maximale* Erzeugung dar.

Berechnet man aus den Lastdauerkurven, wie groß die maximale Kernkraftwerkserzeugung bei einer bestimmten Kernkraftwerksleistung ist, so erhält man für Kernkraftwerke sehr hohe Betriebsdauerwerte (Abb. 10 links).

Ohne auf die Frage einzugehen, ob diese langen Betriebsdauerwerte erreicht werden können — dies hängt in erster Linie von der tatsächlichen Lastverteilung ab —, wollen wir untersuchen, ob es nötig ist, diesbezüglich eine (sehr konservativ gehaltene) Korrektur vorzunehmen. Wenn man annimmt, daß die Struktur der Produktion eine maximale Betriebszeit von z. B. 8000 Stunden zuläßt, und daß T_n als Funktion von c_n bzw. v_n geradlinig verläuft (Abb. 10 rechts), so kann man T_n nach folgender Formel ableiten:

$$T_n = 9000 - 4000\, v_n \qquad (12)$$

Diese Formel gilt dann für v_n Werte zwischen 0,25 und 1,0 und für eine mittlere Betriebsdauer von 5000 Stunden.

Die Formel für die Berechnung der mittleren Kosten $\overline{K}$ kann ohne Schwierigkeit aus Gl. (3), (4) und (5) abgeleitet werden.

$$\overline{K} = \overline{K}_c - \frac{v_n}{T}\,(T_n - T_a)\,(k_c - k_n) \qquad (13)$$

Hier sind $\overline{K}_c$ die mittleren Kosten für eine ausschließliche Versorgung mit konventionellem Strom.

Aus (12) und (13) ergibt sich die Formel für das Optimum des Anteils der Kernkraftwerke, indem man $\frac{d\overline{K}}{dv_n}$ gleich 0 setzt.

$$v_n = \frac{9000 - T_a}{8000} \qquad (14)$$

Diese Gl. (14) ergibt in Kombination mit (12) die optimale Betriebsdauer T_n' der Kernkraftwerke in Abhängigkeit von T_a.

$$T_n' = 4500 + \frac{1}{2}\,T_a \qquad (15)$$

Damit sind die optimalen Werte für die Kernkraftwerkskapazität (ausgedrückt durch v_n) und die Kernkraftwerksproduktion (zu berechnen aus T_n) bestimmt.

Hieraus ergeben sich folgende Werte für die optimale Kernenergiekapazität für einige T_a-Werte (Tab. 1).

Tabelle 1: Optimale Kernenergiekapazität für einige T_a-Werte

T_a	T_n'	v_n	v_n^*
4000	6500	0,63	0,62
5000	7000	0,50	0,53
6000	7500	0,31	0,43
7000	8000	0,30	0,30

In der letzten Kolonne sind mit v_n^* bezeichnete Werte angegeben; das sind die (ohne Durchführung der Näherungsrechnung nach Formel 14) direkt vom Modell (Abb. 5) abgelesenen v_n-Werte. Hieraus ergibt sich, daß man mit Hilfe des Modells ziemlich gute Annäherungswerte für die wirkliche Situation gewinnt.

6. DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

Das Maß, in dem sich die Größe T_a infolge der technischen Entwicklung ändern wird, zeigt, in welchem Umfang die künftige optimale Kernkraftwerkskapazität — nach dem Modell — zunehmen wird. T_a bestimmt sich nach der Formel (5).

Hieraus folgt, daß:

$$\frac{\Delta T_a \,/\, T_a}{\Delta i_n \,/\, i_n} = \frac{i_n}{i_n - i_c} \qquad (16)$$

$$\frac{\Delta T_a \,/\, T_a}{\Delta k_n \,/\, k_n} = \frac{k_n}{k_c - k_n} \qquad (17)$$

und daß

$$\frac{\Delta T_a \,/\, T_a}{\Delta k_c \,/\, k_c} = \frac{-k_c}{k_c - k_n} \qquad (18)$$

Man muß nun die Größen i_n, i_c, k_c und K_n ersetzen durch die z. Z. in der Literatur genannten Werte. Nehmen wir an, daß
i_n ungefähr 2 bis 2,5 mal i_c ist, und
k_c ist ungefähr 1,5 bis 2 mal k_n,
dann kommt man in Annäherung zu den Ergebnissen, daß
die Abhängigkeit von i_n (Gl 16) zwischen 1,6 und 2,
die Abhängigkeit von k_n (Gl. 17) zwischen 1 und 2,
die Abhängigkeit von k_c (Gl. 18) zwischen —2 und —3 liegt.

Hieraus folgt, daß mit einer Verringerung der Größe i_n um 10% eine Abnahme der Größe T_a um 16 bis 20% verbunden ist, während eine Senkung der Brennstoffkreislaufkosten um 10% die Größe T_a um 10 bis 20% abnehmen läßt. In entsprechender Weise läßt sich errechnen, daß eine Differenz in den Steinkohlepreisen von 10% die Größe T_a um 20 bis 30% ändert. Bei einem Zusammenspiel dieser Effekte verringert sich T_a um 40 bis 45%.

Ferner hat auch noch die Leistung einen Einfluß auf die zwischen den Kosten bestehenden Beziehungen. Da sich die Investitionskosten etwa proportional $c^{0,65}$ und somit die Investitionskosten pro kW proportional $c^{-0,35}$ ändern [5], ändert sich auch der Zähler von T_a, also T_a selbst in dieser Weise.

Wenn $T_a = q \cdot c^{-0,35}$ ist, so ist

$$\frac{dT_a}{T_a} = -0{,}35 \frac{dc}{c} \qquad (19)$$

Hieraus geht hervor, daß die Situation des Atomstroms mit zunehmender Kraftwerkskapazität immer günstiger wird; dies trifft um so mehr zu, als der Exponent im Falle der Kernkraftwerke wahrscheinlich kleiner ist als der hier für die konventionellen Kraftwerke zugrunde gelegte Wert 0,65.

Wie diese Berechnungen deutlich zeigen, darf man erwarten, daß infolge der technischen Entwicklung der Wert von T_a und damit auch die optimale Kapazität schon bei geringfügigen Änderungen in den Kostenfaktoren merklich höhere Werte erreichen können.

Es würde zu weit führen, im Rahmen dieser Arbeit eine Prognose für den künftig zu erwartenden T_a-Wert anzustellen. Aus Vorstehendem geht bereits deutlich hervor, daß eine gleichzeitige Verringerung der Investitions- und der Brennstoffkreislaufkosten ziemlich rasch zu einer Verminderung von T_a führt. Diese Tatsachen sollen aber nicht auch noch an Hand des Modells dargelegt werden. Es sollte lediglich eine Methode aufgezeigt werden, mit der sich die für ein Verbundnetz gegebene optimale Kernkraftwerkskapazität global berechnen läßt.

7. *DIE ENTWICKLUNG DER STROMERZEUGUNG*

Es liegt auf der Hand, daß man, wenn z. B. im Jahre 1970 eine Kernkraftwerkskapazität von 30% optimal ist, schon Jahre vorher mit dem Aufbau dieser Kapazität beginnen muß.

Allgemein kann behauptet werden, daß die Stromerzeugung jährlich um einen bestimmten Prozentsatz zunimmt. Dies äußert sich in einer Vergrößerung der Kapazität und in der Ersetzung veralteter Kraftwerke. Darüber hinaus ist eine allmähliche Verlängerung der mittleren Betriebsdauer festzustellen.

Wir wollen die Leistung am Anfang des Jahres t mit c_t bezeichnen und davon ausgehen, daß der jährliche Nettoleistungszuwachs $a \cdot c_t$ und die ersetzte Kraftwerksleistung $b \cdot c_t$ beträgt.

Die im Jahr t neu zu installierende Kapazität ist somit $(a + b)\, c_t$. Die Gesamtkapazität am Ende des Jahres t ist dann

$$c_{t+1} = (1 + a) \cdot c_t \qquad (20)$$

Der Nettozuwachs an neuer Leistung in einem Zeitraum von n Jahren beträgt:

$$C = c_{t+n} - c_t = [(1 + a)^n - 1] \cdot c_t \qquad (21)$$

Da das Verhältnis zwischen den neu zu bauenden Kraftwerken (zusätzliche neue Kraftwerke + Ersatz für veraltete Kraftwerke) und der Nettozunahme gleich $\frac{a+b}{a}$ ist, wird in diesen a Jahren folgende *neue* Leistung installiert:

$$C^1 = \frac{a+b}{a} [(1 + a)^n - 1] \cdot c_t \qquad (22)$$

Teilt man (22) durch die Kapazität nach n Jahren $(1 + a)^n \cdot c_t$, so erhält man die Formel für die Berechnung der in den letzten n Jahren hinzugefügten Leistung; bezogen auf die Kapazität

$$\frac{C^1}{c_{t+n}} = \frac{a+b}{a} \cdot \frac{(1 + a)^n - 1}{(1 + a)^n} \qquad (23)$$

Es werde angenommen, daß die Stromerzeugungskapazität jährlich um durchschnittlich 6% erweitert wird, und jährlich 1,5% der vorhandenen Kapazität ersetzt wird. Nach Abschnitt 6 ist $a = 0{,}06$ und $b = 0{,}015$. Dann ist $\frac{C1}{c_{t+n}}$ ungefähr gleich 0,3 im Falle, daß $n = 5$.

8. *SCHLUSSFOLGERUNGEN*

Aus dem letzten Abschnitt geht hervor, daß zum Aufbau der als optimal angenommenen Kapazität an Kernkraftwerken von 30% fünf Jahre benötigt werden; alle Kraftwerke, die in dem Modell des Versorgungsnetzes nach Ablauf von fünf Jahren in Betrieb genommen sein müssen, sind daher mit Kernreaktoren auszustatten. Rechnet man die Zeit der Bauvorbereitungen und die Bauzeit selbst mit, so kommt man zu dem Ergebnis, daß die erforderlichen Vorbereitungen bereits zehn Jahre vor dem Zeitpunkt, an dem v_n gleich 0,3 betragen soll, begonnen werden müssen.

Ferner ist festzustellen, daß im Zuge der Anwendung der Kernenergie eine sehr starke Tendenz in Richtung auf Großkraftwerke besteht. Diese Tendenz bietet die Möglichkeit, die Kosten im Rahmen des Verbundnetzes zu senken.

Selbstverständlich stellen sich diese Probleme für jedes Land in anderer Form, und deshalb sind ausführliche Untersuchungen unter Zugrundelegung der jeweiligen örtlichen Gegebenheiten sehr erwünscht. Auf jeden Fall wäre zu prüfen, ob die bereits vorliegenden Pläne für den Bau der Kernkraftwerke — unter den hier dargelegten Gesichtspunkten — nicht als unzureichend betrachtet werden müssen.

*

Der Verfasser dankt Herrn Dr. A. M. de *Broekert*, Bilthoven, sowie Herrn Dipl.-Ing. H. *Dommel*, München, für wertvolle Anregungen und Durchsicht des Manuskripts.

DK 621.311.25:621.039(43)

LITERATUR

[1] Schriftliche Anfrage Nr. 73 von Herrn Pedini an die Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft mit Antwort der Euratom-Kommission. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 5 (Februar 1962), S. 201.

[2] A. A. de Boer: Economische Aspecten van de ontwikkeling der Kernenergie, Leiden, 1962.

[3] H. A. A. Melverda: The optimum economics of a supply with a mixture of different gases (7th International Gas Conference, Rome 1958).

[4] L. Musil: Die Gesamtplanung von Dampfkraftwerken, Springer Verlag, 1948.

[5] A. A. de Boer: Nuclear Propulsion Economics. J. Industrial Economics, 7 (März 1959), S. 105. Siehe auch J. Lane: Progress in nuclear Energy, VIII, I (1956), S. 177.