

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
<b>Herausgeber:</b>	Association suisse des électriciens
<b>Band:</b>	48 (1957)
<b>Heft:</b>	15
<b>Artikel:</b>	Übersicht über die Regelvorgänge bei Kernreaktoren
<b>Autor:</b>	Ottrubay. J.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-1058688">https://doi.org/10.5169/seals-1058688</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 20.01.2026

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

## Übersicht über die Regelvorgänge bei Kernreaktoren

Vortrag, gehalten am 7. Dezember 1956 an der ETH in Zürich in der Schweiz. Gesellschaft für Automatik,  
von J. Ottrubay, Zug

621.039.4-52

*Die grundsätzliche Funktion des Reaktors wird beschrieben, die dynamischen Reaktorgleichungen werden abgeleitet und das Übertragungsverhalten des Reaktors wird besprochen. Die Entwicklung der geeigneten Regelung verlangt die Lösung der Reaktorgleichungen für die verschiedenen Betriebszustände. Um die Lösung innerhalb nützlicher Zeit ermitteln zu können, werden Analogierechnergeräte («Simulatoren») eingesetzt. Die konkrete Ausführung eines Simulators wird beschrieben. Schliesslich wird der grundsätzliche Aufbau der Regel- und Überwachungsanlage angedeutet und eine mögliche Ausführung der Feinregelung gezeigt.*

### 1. Einleitung

Am 2. Dezember 1942 konnte unter der Leitung von Fermi in Chicago der erste Reaktor (CP-1) in Betrieb genommen werden. Seit 1942 wurden in der ganzen Welt ungefähr 50 Reaktoren gebaut und in den nächsten zehn Jahren sollen ungefähr weitere 50 Anlagen in Betrieb gesetzt werden. Diese rasche Entwicklung ist um so erstaunlicher, als die bei den heutigen Reaktoren verwendete Kernreaktion, die Kernspaltung, erst im Jahre 1939 von Hahn und Strassmann entdeckt wurde. Im englischen Sprachgebrauch wird der Reaktor auch «pile» genannt.

Ein Teil der gebauten Reaktoren dient der Plutonium-Erzeugung für militärische Zwecke. Ein zweiter Teil wird für Forschungsaufgaben der Neutronenphysik und eine dritte Gruppe zur Schaffung von Unterlagen für Leistungsreaktoren eingesetzt. Der Bau von Leistungsreaktoren ist eine Aufgabe der nächsten Zukunft.

In den Vereinigten Staaten und in England hofft man, in den nächsten zehn Jahren den kWh-Preis der Atomkraftwerke auf die gleiche Höhe wie den eines thermischen Kraftwerkes bringen zu können. England, das an den Leistungsreaktoren besonders interessiert ist, plant bis 1965 das elektrische Landesnetz aus Atomkraftwerken mit einer Energie von insgesamt 1500 bis 2000 MW beliefern zu können. Diese Leistung entspricht ungefähr dem jährlichen Leistungszuwachs in England.

Wenn auch die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie erst in der Zukunft gesichert werden kann, sind die Reaktoren in speziellen Fällen den klassischen Lösungen schon heute überlegen. Bei Anlagen mit beschränkten Platzverhältnissen für Brennstofflagerung (z. B. U-Boote) sind sie, trotz des höheren kWh-Preises, bezüglich der Gesamtaufgabe der Anlage schon heute wirtschaftlicher als irgend ein klassisches Kraftwerk.

Auch in der Schweiz werden entsprechende Anstrengungen unternommen. Im Jahr 1957 wird die Reaktor A.-G. in Würenlingen einen Forschungsreaktor vom Typ «Swimming-Pool» mit der max. Leistung von 1 MW und im Jahre 1958 einen Schwerwasser-Forschungsreaktor, P34 genannt, mit einer geplanten Maximalleistung von 20 MW in Betrieb nehmen.

### 2. Die grundsätzliche Funktion des Kernreaktors

Die Regelung von Kernreaktoren ist nur eine Teilaufgabe der Reaktortechnik; um aber die regel-

*Description de la fonction essentielle du réacteur et exposé des équations de dynamisme et du comportement du réacteur au point de vue de la transmission de l'énergie. La mise au point d'un réglage approprié oblige à résoudre les équations du réacteur pour les états de service les plus divers. Pour obtenir rapidement la solution, on fait maintenant usage de calculatrices analogiques (simulateurs). Description d'un simulateur concret. Principe de l'aménagement d'une installation de réglage et de surveillance, ainsi que de la possibilité d'un réglage fin.*

technische Aufgabe formulieren zu können, muss man den Aufbau und die Funktion des Reaktors mindestens grundsätzlich kennen.

Die grundlegende Kernreaktion, die in den heutigen Reaktoren ausgenutzt wird, ist die Kernspaltung. Bei dieser Reaktion wird der Kern eines spaltbaren Stoffes mit einem ungeladenen Kernteilchen, dem Neutron, in zwei leichtere Kerne gespalten. Die Reaktion legt ein gewisses Mass an Energie und pro Spaltung im Durchschnitt  $\approx 2,5$  Neutronen, die sog. Spaltneutronen, frei. Die freigelegte Energie erwärmt den Reaktorkern, sie kann abgeführt und in Wärmekraftmaschinen nutzbar gemacht werden. Die Spaltneutronen können weitere Kerne spalten und dadurch eine selbsterhaltende Kettenreaktion sichern. Werden aus einer Spaltung  $v_0$  Neutronen frei, und verursachen davon  $k$  Neutronen eine weitere Spaltung, so gilt:

$$k = v_0 - v_v \quad (1)$$

wobei  $v_v$  die Zahl der Verlustneutronen ist. Die Verluste entstehen einerseits dadurch, dass die Konstruktionsmaterialien Neutronen einfangen, anderseits dadurch, dass Neutronen den Reaktor verlassen können. Verursachen wir nun mit  $x$  Neutronen  $x$  Spaltungen, so entstehen  $kx$  «wirksame» Neutronen, die eine weitere Spaltung verursachen.  $k$  wird der Multiplikationsfaktor genannt. Ist  $k = 1$ , so ist die Zahl der «wirksamen» Neutronen immer gleich und somit die durchschnittliche Zahl der Spaltungen in der Zeiteinheit, also auch die freigelegte Energie pro Sekunde (Leistung) konstant.

Selbstverständlich muss beim Anfahren des Reaktors die «erste» Spaltung durch ein sog. Fremdneutron erfolgen. Ist diese erfolgt, und ist  $k > 1$ , so steigt die Leistung an. Die Beziehung  $k > 1$  zu erfüllen, ist eine Vorbedingung des Anfahrens. Ist der Multiplikationsfaktor  $k = 1$ , dann befindet sich der Reaktor im indifferenten Gleichgewicht und wird als «kritisch» bezeichnet.

Alle spaltbaren Stoffe sind schwere Elemente. Die bekanntesten sind Uran, Thorium und Plutonium, von denen das Uran die wichtigste Rolle spielt. Im folgenden sollen die Eigenschaften eines Reaktors mit Uran-Brennstoff besprochen werden.

Im natürlichen Uran ist das Isotop 235 ( $^{92}\text{U}^{235}$ ; Ordnungszahl 92, Massenzahl 235) mit  $\approx 0,7\%$  und das Isotop 238 mit  $\approx 99,3\%$  vertreten. Die Wahrscheinlichkeit einer Spaltung ist bei jedem spaltbaren Stoff eine Funktion der Neutronengeschwin-

digkeit. Die Spaltwahrscheinlichkeit des U235 ist bei relativ langsamem, sog. thermischen Neutronen hoch ( $v \leq 4 \cdot 10^5$  cm/s), während sich das U238 praktisch erst bei sehr schnellen Neutronen ( $v \geq 10^9$  cm/s) überhaupt spalten lässt. Die Geschwindigkeit der meisten entstehenden Spaltneutronen liegt aber zwischen  $4 \cdot 10^5$  und  $10^9$  cm/s, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Spaltung klein ist. Im Laufe der Zusammenstöße mit den Uranatomen werden die Spaltneutronen verlangsamt, wodurch die erwähnte Wahrscheinlichkeit steigt. Leider hat aber U238 die Eigenschaft, Neutronen mittlerer Geschwindigkeit sehr stark einzufangen, ohne dass diese eine Spaltung bewirken. Während der Verlangsamung steigen also die Verluste ( $v_v$ ) an und der Reaktor bleibt «unterkritisch» ( $k < 1$ ), die Anlage kann nicht angelassen werden. Man muss also die Verluste verringern. Es stehen dazu zwei Wege offen: die Verwendung eines Moderators oder die Anreicherung des Uran-Brennstoffes mit U235.

Der erste Weg bedingt, den Brennstoff in einem Moderator geeignet zu verteilen, z. B. durch regelmässige Anordnung von stabförmigen Brennstoffelementen. Die meisten der schnellen Spaltneutronen verlassen nun das Brennstoffelement. Sie werden durch die Zusammenstöße mit den Moderatoratomen zur thermischen Geschwindigkeit verlangsamt und können in einem der Uranelemente weitere U235-Kerne spalten. Der Verlangsamungsprozess ist also vom Uran zur Hauptsache in den Moderator verlegt. Wenn der Moderator selber wenig Neutronen absorbiert, sinkt die Verlustzahl  $v_v$ . Als Moderator wird ein Element mit leichtem Atomkern gewählt; der Energieverlust eines Neutrons pro Zusammenstoß ist um so höher je leichter der Moderatorkern ist, d. h. je mehr sich das Atomgewicht des Moderators dem des Neutrons nähert. Eine rasche Abbremsung der Spaltneutronen verringert die Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten Einfanges: die Verluste werden vermindert. Der Moderator soll also wenig Neutronen absorbieren und ein kleines Atomgewicht haben. Leichtes Wasser ( $H_2O$ ), schweres Wasser ( $D_2O$ ) und Graphit sind die gebräuchlichsten Moderatoren.

Der zweite Weg, die Beziehung  $k > 1$  erfüllen zu können, ist die Anreicherung des Urans. Durch entsprechende Bearbeitung erhöht man den U235-Anteil — z. B. auf  $\approx 90\%$  U235 und  $\approx 10\%$  U238 — und spricht von einem «angereicherten» Spaltmaterial («Brennstoff»). Die Wahrscheinlichkeit der Spaltung steigt, bzw. die eines unerwünschten Einfanges sinkt durch die Anreicherung des Brennstoffes, und die Beziehung  $k > 1$  kann auch ohne Moderator erfüllt werden. Selbstverständlich muss das Uran bei der Verwendung eines Moderators mit starkem Neutroneneinfang auch angereichert werden. Während z. B. schweres Wasser als Moderator keine Anreicherung des Brennstoffes verlangt, muss beim leichten Wasser der U235-Anteil auf  $\approx 20\%$  erhöht werden.

Die Verlustzahl  $v_v$  kann auch dann ansteigen, wenn die Neutronen durch andere konstruktive Materialien eingefangen werden, oder wenn sie den Reaktor verlassen. Die Reaktorkonstruktion muss also Materialien mit kleinem «Neutronen-Einfang-

querschnitt» verwenden und das Entweichen der Neutronen durch Anbringen eines Reflektors verhindern. Der Reflektor (z. B. aus Graphit) umschliesst den Reaktorbehälter und ein grosser Prozentsatz der Neutronen wird durch die Zusammenstöße mit seinen Atomen zur Rückkehr gezwungen.

Die Regelung eines Reaktors erfolgt durch die Veränderung der Verlustzahl  $v_v$ . Eine Verminderung der Verlustziffer bewirkt eine Erhöhung des Multiplikationsfaktors und dadurch einen Anstieg der Leistung; die Erhöhung der Verlustzahl bewirkt einen Abfall der Leistung. Die Verlustzahl kann auf verschiedene Weise verändert werden. Meistens verwendet man Steuerstäbe aus Neutronen absorberndem Material (z. B. Bor oder Cadmium), die man mehr oder weniger tief in den Reaktor eintaucht.

Brennstoff, eventuell Moderator, Reflektor, Steuerstäbe und als Außenwand eine biologische Betonabschirmung sind die wesentlichen Konstruktionselemente eines Reaktors (Fig. 1).

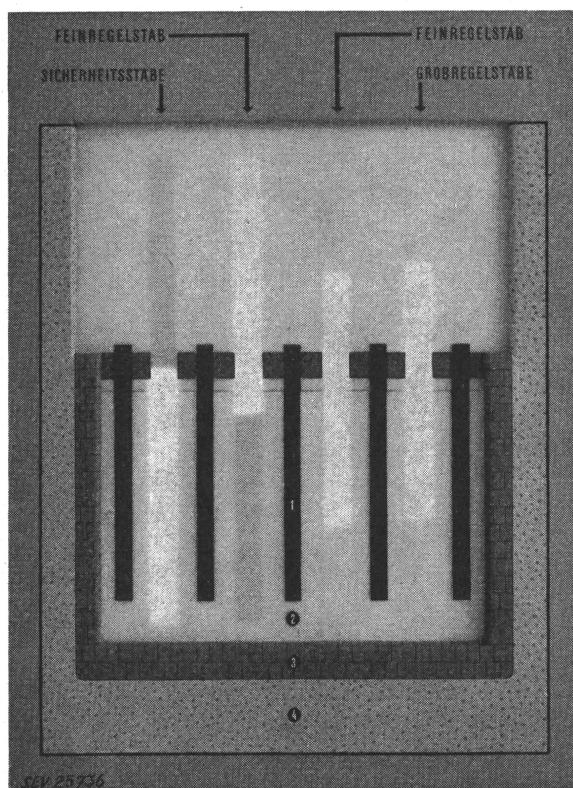


Fig. 1  
Reaktor-Modell zum Pile-Simulator

1 Uranstäbe; 2  $D_2O$ ; 3 Reflektor; 4 Abschirmung

Die bisherigen Ausführungen über den Aufbau und die Wirkungsweise des Reaktors waren sehr vereinfachte Darstellungen; sie genügen aber, die dynamischen Reaktorgleichungen ableiten zu können. Diese Gleichungen sind grundsätzlich für alle Reaktortypen gültig.

### 3. Gleichungssystem über das dynamische Verhalten eines Reaktors

Die Anzahl Spaltungen in der Sekunde ist ein Mass für die Momentanleistung  $P$  [kW] im Uran-

stab. Die Anzahl der in der Sekunde gespaltenen Kerne ist aber der Gesamtzahl der Neutronen im Reaktor, bzw. bei einer konstanten Neutronenverteilung der Neutronendichte  $n$  (Neutronen pro Volumeneinheit) proportional. Es gilt also:

$$P = k_n n \text{ [kW]} \quad (2)$$

wobei  $k_n$  eine Konstante ist.

Die Reaktorgleichungen beschreiben das zeitliche Verhalten der Neutronendichte  $n$ , d. h. auch das der Leistung  $P$ , in Funktion der Stellung der Kontrollstäbe.

### 3.1 Reaktorgleichungen unter Berücksichtigung von nur prompten Neutronen

Verursachen die in der Volumeneinheit des Reaktors vorhandenen  $n$  Neutronen  $n$  Spaltungen, so entstehen, bei einem Multiplikationsfaktor  $k$ ,  $k_n$  «wirksame» Neutronen. Der durchschnittliche Zeitabstand zwischen zwei Spaltungen wird als «Neutronenlebensdauer»  $t_0$  bezeichnet. Die Veränderung der Neutronendichte während der Zeit  $t_0$  ist also  $(kn - n)$  und während der Zeit  $dt$ :

$$dn = \frac{kn - n}{t_0} dt \quad (3)$$

Es gilt also:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(k - 1) n}{t_0} \quad (4)$$

Mit der Bezeichnung  $(k - 1) = \delta k$  = Reaktivität, erhält man die einfachste Form der kinetischen Reaktorgleichung:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k}{t_0} n \quad (5)$$

Der Multiplikationsfaktor  $k$  ergab die Zahl der Neutronen, die aus einer Spaltung entstanden sind und weitere Kerne spalten. Die Reaktivität ist ein Mass für die «überschüssigen» Spaltneutronen, die eine Änderung der Leistung bewirken. Bei einer konstanten Leistung ist  $k = 1$  und  $\delta k = 0$ .

Die Lösung der Gl. (5) ergibt:

$$n = n_0 e^{\int_{t_0}^{\delta k} dt} \quad (6)$$

worin  $n_0$  die Neutronendichte zur Zeit  $t = 0$  ist.

Die Reaktivität  $\delta k$  ist eine dimensionslose Grösse. Sie hängt ab von der Reaktorkonstruktion und der Stellung des Kontrollstabes. Bei einem bestimmten Reaktor ändert sie sich also mit der Stabstellung, und zwar in einem mittleren Bereich linear. Die Reaktivität beeinflusst die Grösse der Leistungsänderung  $dn/dt$ . Meistens werden nur langsame Leistungsänderungen zugelassen, weshalb die Reaktivität klein gehalten wird. Man drückt sie in  $\text{pcm}$  (pour cent mille) aus, wobei  $1 \text{ pcm} = 10^{-5}$  ist.

Die Neutronenlebensdauer  $t_0$  ist eine Reaktorkonstante. Bei einem Reaktor mit Schwerwasser-Moderator und natürlicher Uranfüllung beträgt sie  $\approx 10^{-3}$  s; sie kann jedoch bei Reaktoren mit stark angereichertem Brennstoff bis  $10^{-7}$  s oder auch darunter sinken.

Gl. (5) beschreibt das Übertragungsverhalten, d. h. den funktionellen Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf von Eingangsgrösse ( $\delta k$ ) und Ausgangsgrösse ( $n$ ). Sie ist eine lineare Differentialgleichung 1. Ordnung. Darin ist der Koeffizient der Ausgangsgrösse  $\delta k/t_0$  eine Funktion der Eingangsgrösse, also das Übertragungsverhalten nicht-linear.

Wähle man eine konstante Reaktivität, und betrachte einen bestimmten Reaktor ( $t_0 = \text{konst.}$ ). In diesem Falle ist die Lösung der Differentialgleichung (5):

$$n = n_0 e^{t/\tau} \quad (7)$$

wobei

$$\tau = \frac{t_0}{\delta k} \quad (8)$$

$\tau$  = Zeitkonstante

$\tau$  ist eine Funktion der eingestellten Reaktivität und wird in der Reaktortechnik als Periode bezeichnet.

Die abgeleitete einfachste Form der Reaktorgleichung ist nur eine erste Näherung. Im folgenden Kapitel soll auch die Wirkung der sog. «verzögerten Neutronen» berücksichtigt werden. Bisher wurden alle Neutronen als «prompt» angesehen.

### 3.2 Die Reaktorgleichungen unter Berücksichtigung der prompten und verzögerten Neutronen

Aus einer Spaltung werden  $k$  «nützliche» Neutronen frei. Ein gewisser Anteil  $\beta k$  tritt verzögert aus. Die Anzahl der «prompten» Neutronen ist also nur  $k - \beta k$ . In die Gl. (4) müssen wir also  $(k - \beta k)$  statt  $k$  einsetzen. Diese Ergänzung ist aber ungenügend. Im Reaktor befinden sich jetzt nämlich neue Neutronenquellen: diejenigen Spaltprodukte, die sog. «verzögerte Neutronen» aussenden werden. Diese Quellen gehorchen dem normalen Zerfallsge setz. Ist also ihre Konzentration mit  $r$  und die Zerfallskonstante mit  $\lambda$  bezeichnet, so gilt anstelle von Gl. (4):

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k - \beta k - 1}{t_0} n + \lambda r \quad (9)$$

Nicht alle Quellen der verzögerten Neutronen besitzen die gleiche Zerfallskonstante. Bei der Spaltung von U235 mit thermischen Neutronen unterscheidet man z. B. 6 verzögerte Gruppen (s. Tab. I). Der Anteil einer Gruppe an der Gesamtzahl verzögter Neutronen wird mit  $\beta_i$ , ihre Konzentration mit  $r_i$  und die Zerfallskonstante mit  $\lambda_i$  bezeichnet. Es gilt dann:

$$\sum_i \beta_i = \beta \quad (10)$$

Wenn man die Bezeichnung  $(k - 1) = \delta k$  wiederum einführt, erhält man:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k}{t_0} n - \frac{\beta k}{t_0} n + \sum_i \lambda_i r_i \quad (11)$$

Gl. (11) muss aber mit einer weiteren Beziehung über das zeitliche Verhalten der Konzentration  $r_i$

ergänzt werden. Die zeitliche Änderung der Konzentration  $r_i$  ergibt sich durch die Differenz der durch Spaltung gebildeten und der zerfallenden Quellen des Typus  $i$ . Somit ist

$$\frac{dr_i}{dt} = \frac{\beta_i k}{t_0} n - \lambda_i r_i \quad (12)$$

Die Reaktivität  $\delta k$  ist in allen Betriebszuständen sehr klein (normalerweise ist  $|\delta k| < 0,05$ ), weshalb mit guter Annäherung  $k = 1$ , d. h.  $\beta k = \beta$  bzw.  $\beta i k = \beta_i$  gesetzt werden kann. Die Reaktorgleichungen lauten also unter Berücksichtigung sowohl der prompten wie der verzögerten Neutronen:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k}{t_0} n - \frac{\beta}{t_0} n + \sum_i \lambda_i r_i \quad (13)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = \frac{\beta_i}{t_0} n - \lambda_i r_i \quad (14)$$

*Verzögerte Neutronengruppen bei der Spaltung von Uran 235 mit thermischen Neutronen<sup>1)</sup>*

$$\sum_i \beta_i = \beta = 75,0 \cdot 10^{-4}$$

Tabelle I

$i$	$1/\lambda_i$ [s]	$\beta_i \cdot 10^4$
1	0,216	2,0
2	0,62	8,5
3	2,19	24,1
4	6,51	21,3
5	31,7	16,6
6	80,2	2,5

<sup>1)</sup> Nach Bendt and Scott, Phys. Rev. Bd. 97(1955), Nr. 3, S. 744, und Hughes et al., Phys. Rev. Bd. 73(1948), Nr. 2, S. 111...124.

### 3.3 Die Reaktorgleichungen unter Berücksichtigung der prompten und verzögerten Neutronen und der Temperatureffekte

Mit der Änderung der Leistung ändert sich die Temperatur des Urans und des Moderators. Die Temperaturänderung wirkt sich — durch die Änderung der thermischen Neutronengeschwindigkeit und durch die Dimensionsänderung — wie eine Reaktivitätsänderung aus. In erster Näherung beträgt nun die resultierende Reaktivität:

$$\delta k_R = \delta k + \alpha_u \Delta \vartheta_u + \alpha_m \Delta \vartheta_m \quad (15)$$

wobei  $\Delta \vartheta_u$  und  $\Delta \vartheta_m$  die Temperaturänderungen des Urans und des Moderators,  $\alpha_u$  und  $\alpha_m$  die entsprechenden Temperaturkoeffizienten bedeuten.  $\alpha_u$  und  $\alpha_m$  sind Reaktorkonstanten.  $\delta k$  ist gleich der resultierenden Reaktivität  $\delta k_R$ , wenn  $\Delta \vartheta_u = \Delta \vartheta_m = 0$  ist.  $\delta k$  soll deshalb im folgenden als «Nullreakтивität» bezeichnet werden. Bei einem bestimmten Reaktor kann jeder Stellung des Kontrollstabes eine bestimmte Nullreakтивität zugeordnet werden. Die Regelung des Reaktors erfolgt also durch Veränderung der Nullreakтивität.

In Tabelle II sind die Gleichungen, die das dynamische Verhalten des Reaktors beschreiben, zusammengefasst. In dieser Tabelle wurde auch eine zum Anfahren unbedingt notwendige Neutronen-Fremd-

Tabelle II

$P = k_R n$	$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k_R}{t_0} n - \frac{\beta}{t_0} n + \sum_i \lambda_i r_i + s$	$\beta = \sum_i \beta_i$	$\frac{dr_i}{dt} = \frac{\beta_i}{t_0} n - \lambda_i r_i$
$\delta k_R = \delta k + \alpha_u \Delta \vartheta_u + \alpha_m \Delta \vartheta_m$			
		$\vartheta_u = f_u(n, t)$	$\vartheta_m = f_m(n, t)$
$P$ Leistung [kW]			
$n$ Neutronendichte [Neutronen/cm <sup>3</sup> ]			
$t$ Zeit [s]			
$t_0$ Neutron-Lebensdauer [s]			
$\delta k_R$ resultierende Reaktivität			
$\delta k$ Nullreaktivität			
$r_i$ Anzahl Quellen der verzögerten Neutronen der Gruppe $i$ im cm <sup>3</sup> des Reaktors			
$\beta$ Anteil aller verzögerten Neutronen			
$\beta_i$ Anteil der verzögerten Neutronen der Gruppe $i$			
$\lambda_i$ Zerfallskonstante der Gruppe $i$ [s <sup>-1</sup> ]			
$\Delta \vartheta_u$ Temperaturänderung des Urans [°C]			
$\Delta \vartheta_m$ Temperaturänderung des Moderators [°C]			
$\alpha_u$ Temperaturkoeffizient des Urans [Reaktivität/°C]			
$\alpha_m$ Temperaturkoeffizient des Moderators [Reaktivität/°C]			
$s$ Fremdquelle [Neutronen/cm <sup>3</sup> · s]			

quelle eingefügt. Die Notwendigkeit der Fremdquelle ist auch aus den Reaktorgleichungen ersichtlich: Bei einer Leistung gleich Null und ohne Fremdquelle kann auch die grösste positive Reaktivität keinen Leistungsanstieg verursachen (labiles Gleichgewicht). Die Einführung der Fremdquelle ermöglicht das Anlassen der Anlage, sie bewirkt aber auch, dass ein Beharrungszustand ( $dn/dt = dr_i/dt = 0$ ;  $n = \text{konst.}$ ) nur bei einer negativen Reaktivität  $\delta k_R$  möglich ist. Die Fremdquelle ist im allgemeinen schwach und ihre Wirkung wird in der prinzipiellen Diskussion (Kapitel 4) vernachlässigt.

Die dynamischen Reaktorgleichungen der Tabelle II gelten für alle Reaktortypen; nur die entsprechenden Konstanten bzw. die thermodynamischen Gleichungen des Kühlsystems müssen dem Typ angepasst werden.

## 4. Übertragungsverhalten des Reaktors

### 4.1 Einleitung

Für den Regeltechniker erscheint der Reaktor als eine geschlossene Einheit mit der Kontrollstabstellung als Eingangs- und der Leistung als Ausgangsgrösse. Die Entwicklung der geeigneten Regeleinrichtung bedingt die Kenntnis des Übertragungsverhaltens, d. h. des funktionellen Zusammenhangs zwischen dem zeitlichen Verlauf der Eingangs- und der Ausgangsgrösse. Das Übertragungsverhalten des Reaktors ist durch die Reaktorgleichungen (Tabelle II) vollständig beschrieben. Leider sind diese Gleichungen sehr umfangreich und geben kein anschauliches Bild über die Eigenschaften des Reaktors als ge-regelte Anlage.

Das Übertragungsverhalten eines Systems kann mit Hilfe der Übergangsfunktion oder des Frequenzganges anschaulich beschrieben werden. Die Über-

Fortsetzung von Seite 674

### Übersicht über die Regelvorgänge bei Kernreaktoren (Fortsetzung)

gangsfunktion stellt den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgrösse nach einer sprunghaften Änderung der Eingangsgrösse dar. Der Frequenzgang  $G(j\omega)$  ist das frequenzabhängige komplexe Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsgrösse bei harmonischer Erregung der Eingangsgrösse in stationärem Zustand.

$$G(j\omega) = \frac{P_{max} e^{j(\omega t + \varphi)}}{\delta k_{max} e^{j\omega t}} = \frac{P_{max}}{\delta k_{max}} e^{j\varphi} \quad (16)$$

wobei  $P_{max}$  und  $\delta k_{max}$  die Amplituden der Leistung bzw. der Reaktivität bedeuten.

Leider ist die Darstellung des Übertragungsverhaltens mit dem Frequenzgang oder mit einer Übertragungsfunktion nur bei linearen Systemen erschöpfend. Bei nichtlinearen Systemen, wie dem Reaktor, kann der Frequenzgang nur für kleine Amplituden der Eingangs- bzw. der Ausgangsgrösse bestimmt werden. Im Falle genügend kleiner Amplituden kann nämlich das System mit guter Annäherung als linear betrachtet werden. Der Frequenzgang des nichtlinearen Systems ist außerdem von der Wahl des Arbeitspunktes abhängig.

Auch eine Übergangsfunktion ist keine erschöpfende Darstellung eines nichtlinearen Systems. Die Überlagerungsgesetze sind nämlich nicht gültig, weshalb aus der einen Übergangsfunktion nicht auf den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgrösse bei beliebigem Verlauf der Eingangsgrösse geschlossen werden kann.

In den folgenden Kapiteln wird der Frequenzgang und die Übergangsfunktion des Reaktors unter Berücksichtigung verschiedener Effekte besprochen. Diese Ausführungen gelten natürlich wegen der Nichtlinearität des Systems nur unter den erwähnten Voraussetzungen. Trotz diesen Einschränkungen ergeben aber die qualitativen Resultate der Diskussion ein wertvolles Bild über die grundsätzliche Art des Übertragungsverhaltens eines Reaktors.

#### 4.2 Übergangsfunktion und Frequenzgang des Reaktors unter Berücksichtigung nur von prompten bzw. von prompten und verzögerten Neutronen

Fig. 2...5 zeigen die entsprechenden Funktionen.

Die verzögerten Neutronen bewirken eine Verlangsamung des Reaktors. Um dies zu zeigen, soll eine bestimmte Übergangsfunktion mit nur prompten bzw. mit prompten und verzögerten Neutronen diskutiert werden. Der geplante schweizerische Reaktor P 34 verwendet natürliches Uran als Brennstoff und schweres Wasser als Moderator. Die Neutronenlebensdauer  $t_0$  beträgt  $\approx 10^{-3}$  s. Nehmen wir an, dass dieser Reaktor mit einer konstanten Leistung von 1 MW betrieben wird. Ein sog. Feinregelstab soll, vom voll eingetauchten Zustand, rasch aus dem Reaktor gehoben werden. Diese Operation verursacht eine praktisch sprungförmige Änderung der Reaktivität von Null auf  $\approx 400$  pcm.

Unter Vernachlässigung der verzögerten Neutronen steigt die Leistung (gemäss Fig. 4) e-förmig, mit einer Periode von  $\approx \frac{10^{-3}}{400 \cdot 10^{-5}} = 0,25$  s, an. Innerhalb einer Sekunde erreicht die Leistung den Wert von  $\approx 54$  MW.

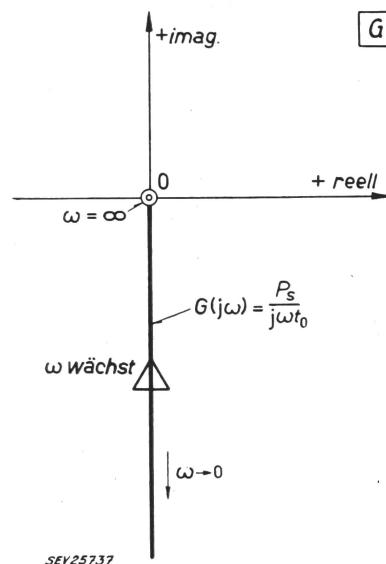


Fig. 2  
Frequenzgang  $G(j\omega)$  des Reaktors unter Berücksichtigung von nur prompten Neutronen  
 $\omega$  Frequenz;  $t_0$  Neutronenlebensdauer;  $P_s$  Arbeitspunkt der Leistung, Sollwert

Die Übergangsfunktion unter Berücksichtigung auch der verzögerten Neutronen wurde mit einem «Pile-Simulator» berechnet. Sie ist aus Fig. 5 ersichtlich. Gemäss dieser Kurve steigt die Leistung in einer Sekunde nur auf  $\approx 2,5$  MW. Die verzögerten Neutronen bewirken also eine Verlangsamung, in diesem Falle sogar eine starke Verlangsamung des Reaktors.

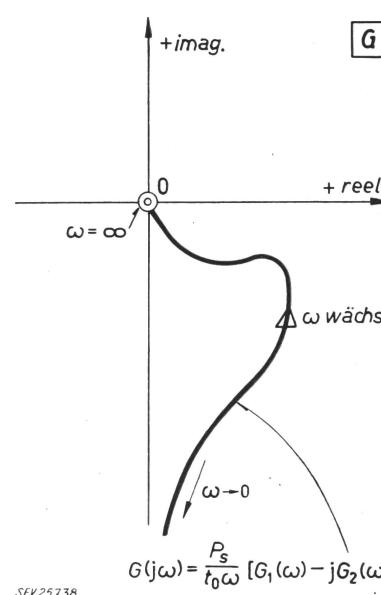


Fig. 3  
Frequenzgang  $G(j\omega)$  des Reaktors unter Berücksichtigung der prompten und verzögerten Neutronen  
Bezeichnungen siehe Fig. 2

Die Reaktorleistung ist, sowohl ohne wie auch mit Berücksichtigung der verzögerten Neutronen, nur dann konstant, wenn die Reaktivität gleich Null ist. In diesem Zustand wird der Reaktor als «kritisch» bezeichnet. Die kleinste positive Reaktivität verursacht dann einen Anstieg bzw. die kleinste negative Reaktivität einen Abfall der Leistung.

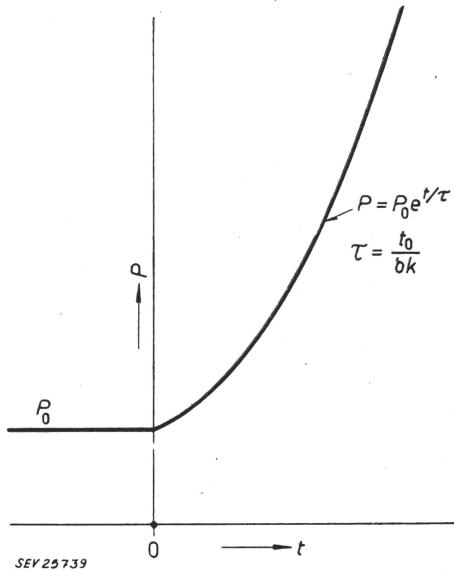


Fig. 4

#### Übergangsfunktion des Reaktors unter Berücksichtigung von nur prompten Neutronen

Die Reaktivität wird zur Zeit  $t = 0$  sprungförmig von Null auf einen konstanten positiven Wert  $\delta k$  geändert  
 $\tau$  Reaktorperiode;  $\delta k$  Reaktivität;  $P$  momentane Leistung;  
 $P_0$  Ausgangsleistung

Bei der Reaktivität  $\delta k = \beta$  wird der Reaktor als «promptkritisch» bezeichnet. In diesem Betriebsfall ist die Anlage schon wegen den prompten Neutronen in den kritischen Zustand versetzt ( $\delta k - \beta = 0$ ). Die Reaktivität  $\delta k > \beta$  verursacht einen Leistungsanstieg auch dann, wenn die verzögerten Neutronen als endgültige Verluste betrachtet werden ( $\lambda_i = 0$ ). Die Leistung kann u. U. sehr rasch ansteigen (je nach der Grösse der Differenz  $\delta k - \beta$ ). Der promptkritische Zustand ist aus Sicherheitsgründen zu meiden.

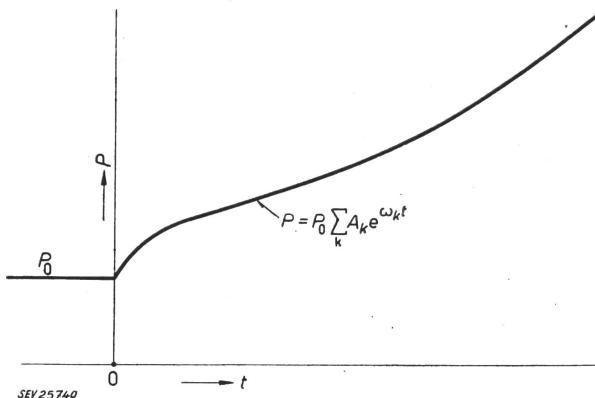


Fig. 5

#### Übergangsfunktion des Reaktors unter Berücksichtigung von prompten und verzögerten Neutronen

Die Reaktivität wird zur Zeit  $t = 0$  sprungförmig von Null auf einen konstanten positiven Wert  $\delta k$  geändert

$$A_k = f_{Ak} (\delta k) \quad \omega_k = f_{\omega k} (\delta k)$$

Die Übergangsfunktionen der Figuren 4 und 5 zeigen, dass eine dauernde positive Reaktivität, sowohl ohne wie mit Berücksichtigung der verzögerten Neutronen, einen dauernden Anstieg der Leistung verursacht. Die kleinste dauernde negative Reaktivität führt hingegen zu einer ständigen Verringerung der Leistung gegen Null. Diese Art des Verhaltens einer geregelten Anlage wird in der Regeltechnik als astatic bezeichnet.

Der erwähnte astatiche Charakter des Reaktors kann natürlich auch aus den Frequenzgangkurven der Fig. 2 und 3 herausgelesen werden. Wie schon vorhin erwähnt wurde, gilt jedoch der Frequenzgang des Reaktors, wegen der Nichtlinearität des Systems, nur bei kleinen Abweichungen der Leistung von ihrem Sollwert. Diese Voraussetzung ist aber gerade bei der sog. Feinregelung der Leistung erfüllt. Der Frequenzgang des Reaktors enthält also die Forderungen an die Regeleinrichtung zur Erzielung einer geeigneten stabilen Feinregelung. Ein genaueres Studium der Frequenzgang-Kurven zeigt, dass die Wirkung der verzögerten Neutronen die Aufgabe der Feinregelung erleichtert.

#### 4.3 Übergangsfunktion und Frequenzgang des Reaktors unter Berücksichtigung der prompten und verzögerten Neutronen und der Temperatureffekte

Die Änderung der Uran- bzw. der Moderatortemperatur bewirkt, gemäss Abschnitt 3.3, eine Änderung der resultierenden Reaktivität  $\delta k_R$ . Die Temperaturänderungen sind aber eine Folge der Leistungsänderung. Aus diesem Grunde bedeuten die Temperatureffekte eine regeltechnische Rückführung: Die Änderung der Ausgangsgröße  $P$  bewirkt eine Änderung der Eingangsgröße  $\delta k_R$ .

Die Temperaturkoeffizienten  $\alpha_u$  bzw.  $\alpha_m$  [s. Gl. (15)] können negativ oder positiv sein. Im Falle negativer Koeffizienten wird die Reaktivität  $\delta k_R$  bei Erhöhung der Leistung bzw. der Temperaturen verringert. Die negativen Temperaturkoeffizienten

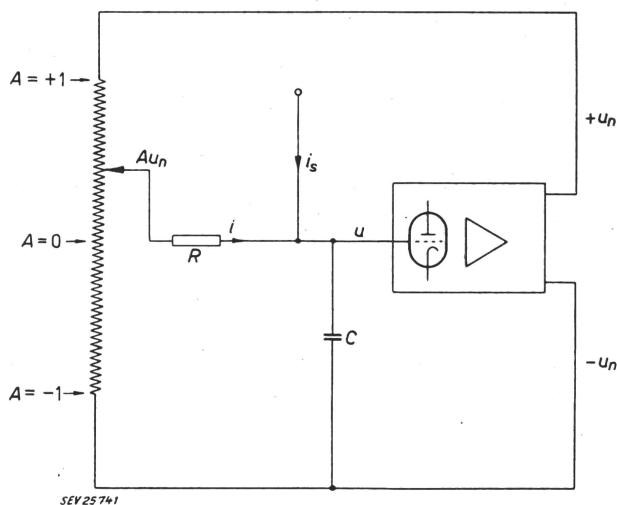


Fig. 6

#### Prinzipschema eines Reaktor-Simulators unter Berücksichtigung nur prompter Neutronen

Alle Spannungen können gegenüber Erde verstanden werden  
 $A$  Schleiferstellung;  $u$  Eingangsspannung des Verstärkers;  
 $u_n$  Ausgangsspannungen des Verstärkers;  $i$ ;  $i_s$  Ladeströme des Kondensators  $C$

bewirken also eine Gegenkopplung; positive Koeffizienten verursachen hingegen eine Mitkopplung.

Negative Temperaturkoeffizienten bewirken eine grundsätzliche Änderung im Verhalten des Reaktors. Eine dauernde positive Nullreaktivität  $\delta k$  verursacht alsdann keinen dauernden Leistungsanstieg. Bei der resultierenden Reaktivität  $\delta k_R = 0$  erreicht die Leistung einen Beharrungswert (stabiles Gleichgewicht). Der Beharrungswert entspricht — gemäss Gl. (14) — der Beziehung:

$$\delta k - |\alpha_u| \Delta \vartheta_u - |\alpha_m| \Delta \vartheta_m = 0 \quad (17)$$

Während also der Reaktor — gemäss Abschnitt 4.2 — unter Berücksichtigung nur der prompten und verzögerten Neutronen ein astatices Übertragungsverhalten zeigt, ändert er seinen Charakter

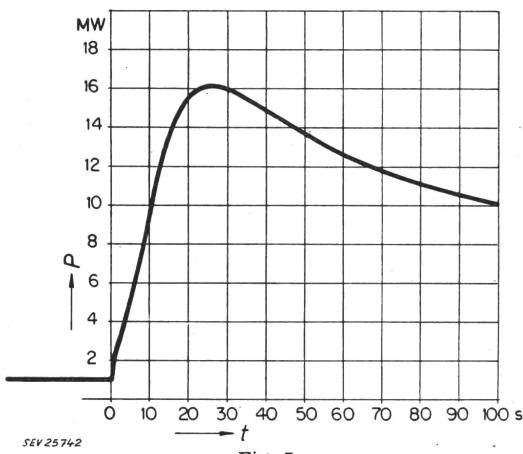


Fig. 7

Leistungsanstieg  $P$  beim geplanten Reaktor P 34 bei sprungförmiger Änderung der Nullreaktivität um + 400 pcm unter Berücksichtigung aller Effekte  
Zeit

$$t_0 = 10^{-8} \text{ s} \quad \alpha_u = -2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/\text{°C} \quad \alpha_m = -20 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/\text{°C}$$

unter Berücksichtigung auch der negativen Temperaturkoeffizienten und zeigt ein statisches Verhalten. Fig. 7 zeigt die Übergangsfunktion des geplanten schweizerischen Reaktors P 34 bei sprungförmiger Änderung der Nullreaktivität um 400 pcm und mit negativen Temperaturkoeffizienten.

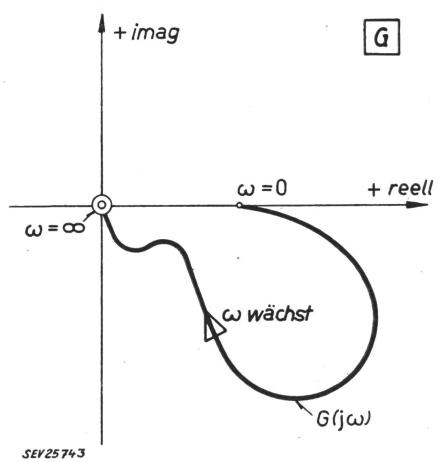


Fig. 8

Frequenzgang  $G(j\omega)$  eines Reaktors unter Berücksichtigung der prompten und verzögerten Neutronen und negativer Temperaturkoeffizienten

Positive Temperaturkoeffizienten bewirken eine Mitkopplung des Reaktors. Das Übertragungsverhalten bleibt astatic und der Reaktor wird rascher als ohne Berücksichtigung der Temperatureffekte. Ein Reaktor mit positiven Temperaturkoeffizienten lässt sich schwieriger beherrschen. Man ist daher bestrebt, Reaktoren nur mit negativen Temperaturkoeffizienten zu bauen.

Die Berücksichtigung der Temperatureffekte bewirkt natürlich auch eine Änderung des Frequenzganges. Die Fig. 8 zeigt den Charakter des Frequenzganges bei negativen Temperaturkoeffizienten. Der Ort  $\omega = 0$  liegt nunmehr nicht an der negativ imaginären Achse, wie es in den Fig. 2 und 3 der Fall gewesen ist, sondern an der positiv reellen. Dies deutet auf das neue, statische Verhalten des Systems hin. Positive Temperaturkoeffizienten erhalten den astaticen Charakter des Reaktors. Demgemäß liegt der Ort  $\omega = 0$  des Frequenzganges einer Anlage mit positiven Temperaturkoeffizienten auf der negativ imaginären Achse.

### 5. Lösung der Reaktorgleichungen mit Analogierechengeräten (Simulatoren)

Die rechnerische Ermittlung des Leistungsverlaufes für alle uns interessierenden Betriebsfälle führt wegen des notwendigen grossen Zeitaufwands zu praktisch unlösbar Schwierigkeiten. Schon die numerische Lösung vereinfachter Fälle ist sehr zeitraubend. Die Berechnung einiger Übergangsfunktionen unter Vernachlässigung der Temperatureffekte kann einen geübten Rechner mehrere Wochen hindurch beschäftigen. Bei der Entwicklung der Reaktorregelung muss aber der Leistungsverlauf für verschiedene Funktionen der Kontrollstabbewegung und unter Berücksichtigung aller besprochenen Effekte bekannt sein. Die Benützung von Rechengeräten ist deshalb unerlässlich.

Die Lösung der Reaktorgleichungen kann mit Analogierechengeräten oder mit Ziffernrechenmaschinen erfolgen. Die erforderliche Genauigkeit der Lösungen liegt in der Größenordnung von 1 %. In dieser Genauigkeitsklasse sind die Analogiegeräte viel billiger als die Ziffernrechenmaschinen. Außerdem ist der Betrieb der Analogierechengeräte sehr anschaulich und sie eignen sich zum Training des Bedienungspersonals besser als die Ziffernrechenmaschinen.

#### 5.1 Grundsätzliches Schaltbild eines Reaktor-Simulators unter Berücksichtigung von nur prompten Neutronen

Es sollen die Differentialgleichungen der in Fig. 6 dargestellten Schaltung abgeleitet werden. Der Kondensator  $C$  wird durch die beiden Ströme  $i$  und  $i_s$  aufgeladen. Da die Spannung über dem Kondensator

$$u - (-u_n) = u + u_n$$

ist, gilt:

$$\frac{d(u + u_n)}{dt} = \frac{1}{C}(i + i_s) \quad (18)$$

Die Spannung des Potentiometerschleifers ist  $Au_n$  ( $A$  Abschwächungsfaktor). Bei einem linearen

Potentiometer und bei relativ kleiner Strombelastung des Schleifers ist  $A$  der Schleiferstellung proportional. Für den Strom  $i$  gilt:

$$i = \frac{Au_n - u}{R} \quad (19)$$

Der Verstärker hat zwei gegenüber der Bezugsspannung (z. B. Erde) symmetrische Ausgänge ( $+u_n$  und  $-u_n$ ). Der Verstärkungsfaktor  $v$  ist damit:

$$v = \frac{u_n}{u} \quad (20)$$

Wenn man die beiden letzten Gleichungen in die Gl. (18) einsetzt, wird:

$$\frac{d \left[ u_n \left( \frac{1}{v} + 1 \right) \right]}{dt} = \frac{1}{C} \left[ u_n \frac{\frac{1}{v} + A}{R} + i_s \right] \quad (21)$$

Mit der Voraussetzung

$$\frac{1}{v} \ll A \leq 1 \quad (22)$$

kann man die Gleichung vereinfachen. Man multipliziert sie hiebei mit einer willkürlichen Konstante  $k_d$ :

$$\frac{d (k_d u_n)}{dt} = \frac{A}{RC} k_d u_n + \frac{1}{C} k_d i_s \quad (23)$$

Die Differentialgleichung des Reaktors lautet, gemäss den bisherigen Ausführungen, unter Berücksichtigung von nur prompten Neutronen und der Fremdquelle:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\delta k}{t_0} n + S \quad (24)$$

Wenn man die Gl. (23) und (24) miteinander vergleicht, ist die Analogie beider Beziehungen erkennbar.

Mit den Annahmen:

$$RC = t_0 = \text{Neutronenlebensdauer} \quad (25)$$

$$A = \delta k = \text{Reaktivität} \quad (26)$$

$$k_d \frac{i_s}{C} = S = \text{Fremdquelle} \quad (27)$$

wird:

$$k_d u_n = n \quad (28)$$

$k_d$  ist eine Dimensionskonstante mit der Dimension Neutronen/cm<sup>3</sup> · V.

Die Resultate lassen sich also wie folgt zusammenfassen: Es wurde, scheinbar willkürlich, die in Fig. 6 dargestellte Schaltung gewählt. Unter der Voraussetzung eines genügend hohen Verstärkungsgrades, ist die Differentialgleichung der Schaltung zu der eines Reaktors mit nur prompten Neutronen und Fremdquelle analog. Erfüllt man nun die Beziehungen (25)...(27), so wird der Verlauf der Ausgangsspannung der Neutronendichte, d. h. der Leistung, proportional. Falls also, gemäss Gl. (26), die

Eingangsgröße  $\delta k$  des Reaktors durch den Abschwächungsfaktor  $A$  (d. h. durch die Schleiferposition) abgebildet wird, ist der Verlauf der Ausgangsspannung  $u_n$  dem der Reaktorleistung (Ausgangsgröße) proportional. Fig. 6 zeigt also die grundsätzliche Schaltung eines Analogierechengerätes («Simulators») zur Lösung der Gl. (24).

### 5.2 Simulator zur Lösung der Reaktorgleichungen unter Berücksichtigung aller besprochenen Effekte

Die Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts zeigen die grundsätzlichen Gedanken bezüglich der Entwicklung eines Reaktor-Simulators unter Berücksichtigung nur prompter Neutronen. Die tatsächlich verwendeten Analogierechengeräte berücksichtigen alle besprochenen Effekte und sind demgemäß auch viel umfangreicher.

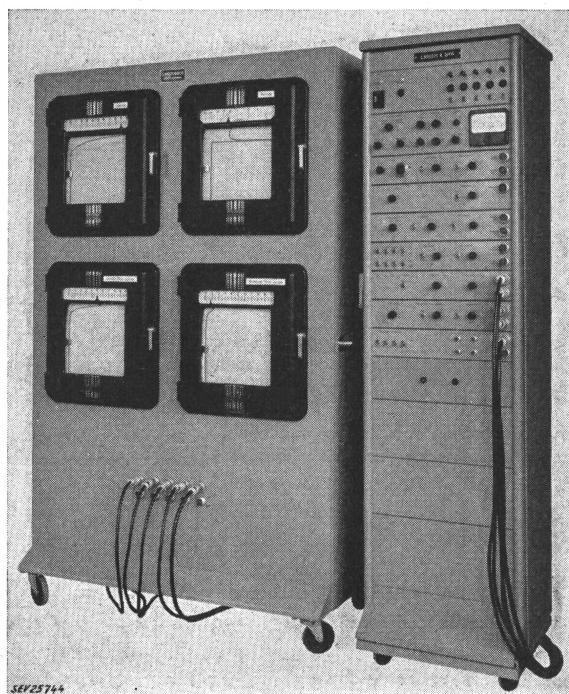


Fig. 9  
Pile-Simulator  
Rechen- und Registriereinheit

Die Fig. 9...11 zeigen einen Simulator, der bei Landis & Gyr A.-G. in Zusammenarbeit mit der Reaktor A.-G. entwickelt wurde. Dieses Rechengerät ist an die Daten des geplanten schweizerischen Reaktors P 34 angepasst, d. h. es sind die Konstanten des P 34 in die Reaktorgleichungen eingesetzt. Verschiedene Konstanten der Reaktorgleichung können allerdings in einem weiten Bereich verstellt werden. Die Wirkungen der verzögerten Neutronen und der Temperatureffekte werden durch spezielle Netzwerke berücksichtigt.

Im abgebildeten Simulator wird ebenso wie bei einem Reaktor die momentane Periode bestimmt. Sie wird kurz Periode  $\tau$  des Reaktors genannt. Sie ist definiert als die Zeitkonstante derjenigen e-Kurve, die im betreffenden Zeitpunkt die Leistungskurve berührt, d. h. der Absolutwert und die Tangente

übereinstimmen. Bei konstanter Leistung ist die Periode unendlich. Schon deshalb ist es zweckmäßig, sie in eine ihr reziproke Spannung

$$u_\tau = k_\tau \frac{1}{\tau} \quad (29)$$

umzuformen. Für die reziproke Zeitkonstante einer e-Funktion  $u_n = u_{n0} e^{t/\tau}$  gilt:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{u_n} \cdot \frac{du_n}{dt} = \frac{d}{dt} (\ln u_n) \quad (30)$$

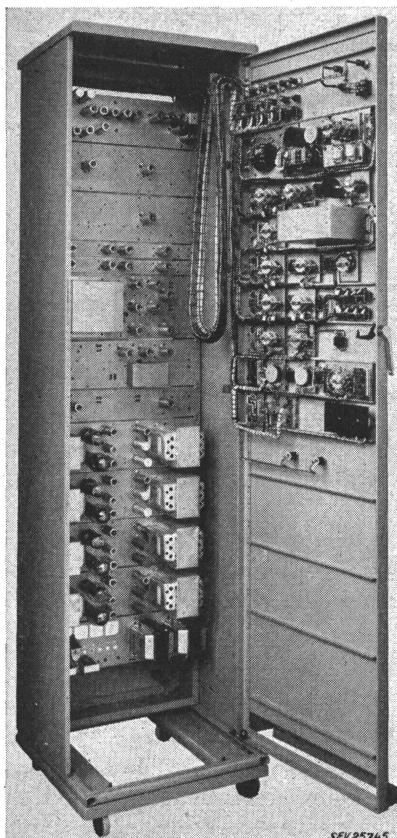


Fig. 10  
Recheneinheit des Pile-Simulators mit geöffneter Tür

Eine der reziproken Periode proportionale Spannung erhält man also, wenn die Ausgangsspannung des Simulators einem logarithmischen Verstärker und dessen Ausgangsspannung einem Differenzierglied zugeführt werden.

Der beschriebene Simulator enthält auf 13 Chassis unter anderem ungefähr 50 Röhren, 250 hochwertige Widerstände, 20 hochwertige Kondensatoren und 30 Wähltschalter. Vier Registriergeräte zeigen die Leistung, die Periode und die mittleren Temperaturen des Urans und des Moderators an. Der Simulator ermöglicht die Untersuchung der Konsequenzen verschiedener Betriebsereignisse. Der Ausfall einer Kühlpumpe kann z. B. durch die Umstellung eines Schalters «simuliert» werden. Solche und ähnliche Versuche ergeben wertvolle Resultate über das dynamische Verhalten des geplanten Reaktors. Mit Hilfe des Simulators kann auch der optimale Feinregler bestimmt werden. Die der Leistung,

eventuell auch die der reziproken Periode entsprechende Ausgangsspannung des Simulators werden in den Regler geführt und dort ausgewertet. Gemäß dem Ausgangssignal des Reglers wird der Potentiometerschleifer (Kontrollstab!) durch eine Servoeinrichtung bewegt. Die geeignete Reglerart kann experimentell bestimmt werden.

Die Gleichungen des Reaktors P34 werden durch das beschriebene Gerät mit einer Genauigkeit von der Größenordnung eines Prozentes abgebildet. Dies genügt, weil auch die meisten Konstanten der Reaktorgleichung nicht mit grösserer Genauigkeit im voraus zu berechnen sind.

Die Fig. 12, 7 und 13 zeigen drei wichtige Rechenresultate, die mit dem Simulator ermittelt wurden. Die Kurven beziehen sich auf den P34-Reaktor (bei  $t_0 = 10^{-3}$  s;  $\alpha_u = 2 \cdot 10^{-5}$  1/°C;  $\alpha_m = 20 \cdot 10^{-5}$  1/°C).

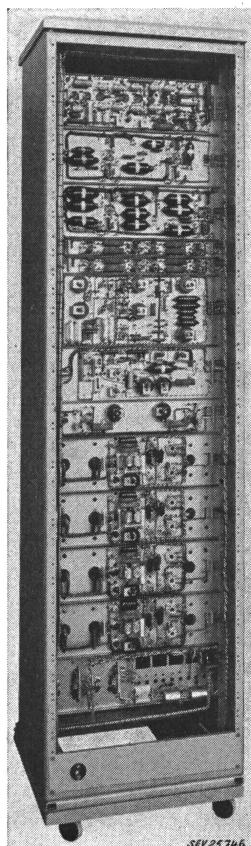


Fig. 11  
Recheneinheit des  
Pile-Simulators von hinten  
gesehen

Die Fig. 12 und 7 sind Übergangsfunktionen ohne und mit Temperatureffekt für eine sprungförmige Erhöhung der Nullreaktivität um 400 pcm. Die Reaktivität 400 pcm entspricht ungefähr der Gesamtwirkung eines Feinregelstabes. Fig. 13 zeigt den Leistungsabfall bei einer sprungförmigen Änderung der Nullreaktivität um — 3400 pcm. Die Reak-

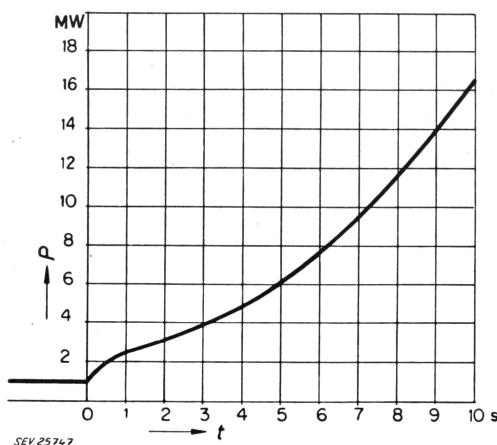


Fig. 12  
Leistungsanstieg beim geplanten Reaktor P 34 bei sprungförmiger Änderung der Reaktivität von Null auf 400 pcm unter Vernachlässigung des Temperatureffektes

$$t_0 = 10^{-3} \text{ s} \quad \alpha_u = \alpha_m = 0 \\ t \text{ Zeit in s; } P \text{ Leistung in MW}$$

tivität — 3400 pcm entspricht etwa der Wirkung der drei Sicherheitsstäbe, wenn sie aus dem herausgehobenen Zustand voll eingetaucht werden.

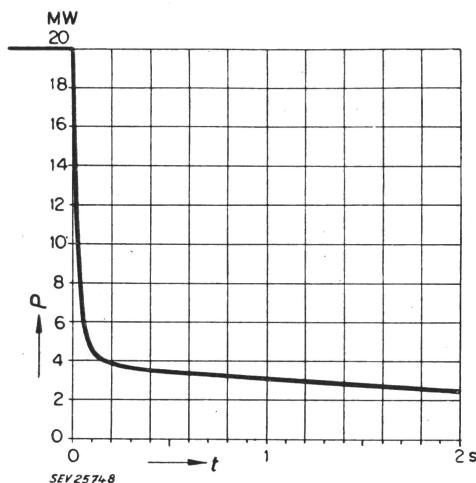


Fig. 13

Leistungsabfall beim geplanten Reaktor P 34 bei sprungförmiger Änderung der Nullreakтивität um  $-3400 \text{ pcm}$  unter Berücksichtigung aller Effekte

$$t_0 = 10^{-3} \text{ s} \quad \alpha_u = -2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \alpha_m = -20 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## 6. Die Regelanlage

### 6.1 Allgemeiner Aufbau

In den Reaktorkern werden Neutronenmesskammern eingeführt. Der Ausgangsstrom, bzw. die Anzahl der Ausgangsimpulse pro Sekunde ist der momentanen Neutronendichte  $n$ , d. h. der Leistung  $P$  proportional. Die Ausgangssignale der Messkammern werden in verschiedenen elektronischen Einheiten ausgewertet, und die Kontrollstäbe mit Hilfe von Servoeinrichtungen entsprechend betätigt. Die Regelung des Reaktors erfolgt durch drei Arten von Kontrollstäben:

- Die Feinregelstäbe dienen zur Konstanthal tung der Leistung.
- Die Grobregelstäbe werden zur Inbetriebsetzung des Reaktors bzw. zum Ausgleich von grösseren Abweichungen betätigt. Im Normalbetrieb sind die Grobregelstäbe nur teilweise in den Reaktor eingetaucht.
- Die Sicherheitsstäbe werden im Normalbetrieb aus dem Reaktor herausgezogen; nur in einem gefährlichen Betriebszustand werden sie in den Reaktor eingeführt. Die Sicherheits- und die Grobregelstäbe werden durch Elektromagnete gehalten. Bei Gefahr wird der Magnetkreis dieser Stäbe unterbrochen, und die in den Reaktorkern fallenden Stäbe stellen den Reaktor ab.

Die Regelanlage des Reaktors kann in verschiedene Kanäle eingeteilt werden. Jeder übernimmt einen bestimmten Aufgabenkreis.

Die Überwachung der Leistungs- und der Periodengrenzwerte und die Auslösung einer Schnellabstellung bei zu hoher Leistung oder bei zu tiefer Periode wird vom Sicherheitskanal besorgt. Die Aufgabe der Feinregelung der Leistung und manchmal auch das automatische Anlassen des Reaktors wird vom Regelkanal übernommen. Mit Absicht trennt

man den Regelkanal apparativ vollständig vom Sicherheitskanal. Dadurch wird der Sicherheitskanal einfacher und auch zuverlässiger. Ausser dem Regel- und dem Sicherheitskanal weist die Steueranlage noch folgende Kanäle auf: Impuls- und Gammakanal zum Anlassen bzw. zur Anzeige des Verbrauchszustandes der Brennstoffelemente; Kanal für Gesundheitsüberwachung; Überwachungskanal für thermische Größen. Im Rahmen dieser Ausführungen kann nicht auf alle diese Kanäle eingegangen werden. Immerhin sei festgehalten, dass die Gesamtzahl aller Geräte eines Leistungsreaktors, die der Steuerung bzw. Überwachung dienen, 100...200 beträgt, wobei 20...30 verschiedene Gerätetypen unterschieden werden können.

Im folgenden soll nun eine mögliche Einrichtung zur Feinregelung der Leistung beschrieben werden.

### 6.2 Die Feinregelung der Leistung

Es sollen zuerst die grundsätzliche Wirkungsweise und dann der Frequenzgang einer möglichen Einrichtung besprochen werden.

Dazu werden zwei Messkammern benutzt, die in den Reaktorkern eingetaucht werden und deren Ausgangsströme der momentanen Neutronendichte  $n$ , also auch der Leistung proportional sind. Die Kammerströme werden in zwei getrennten Geräten ausgewertet. Die Ausgangsspannung des einen Gerätes ist der momentanen Leistung  $P$  proportional:

$$u_p = k_p P \quad (31)$$

Die Ausgangsspannung des anderen Gerätes ist der Reaktorperiode  $\tau$  umgekehrt proportional:

$$u_r = \frac{k_r}{\tau} \quad (32)$$

(siehe Abschnitt 5.2.)

Die beiden Spannungen  $u_p$  und  $u_r$  werden einem Mischglied, dem eigentlichen Regler, zugeführt (Fig. 14). Ein Servoverstärker, ein Servomotor und

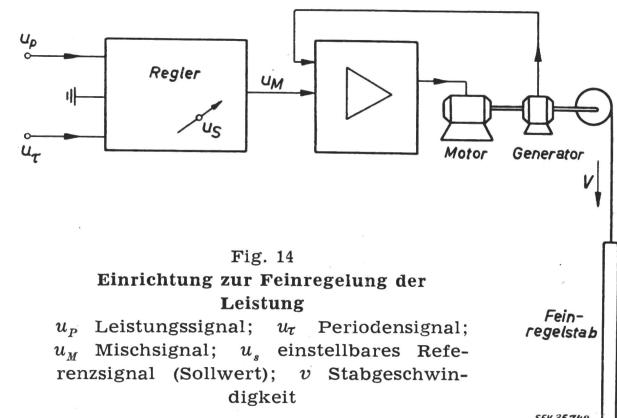


Fig. 14  
Einrichtung zur Feinregelung der Leistung

$u_p$  Leistungssignal;  $u_r$  Periodensignal;  $u_M$  Mischsignal;  $u_s$  einstellbares Referenzsignal (Sollwert);  $v$  Stabgeschwindigkeit

SEV 25749

eine generatorische Gegenkopplung sorgen für eine dem Mischsignal  $u_M$  proportionale Feinregelstabgeschwindigkeit  $v$ :

$$v = k_v u_M \quad (33)$$

Ist die Reaktivität der Stabstellung proportional, so gilt:

$$\frac{d \delta k}{dt} = k_s u_M \quad (34)$$

wobei  $k_s$  eine Proportionalitätskonstante ist.

Die Mischung der Signale  $u_P$  und  $u_\tau$  kann im Regler auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Für alle Fälle muss aber eine der gewünschten Sollwertleistung entsprechende Spannung  $u_s$  eingeführt und mit der dem Istwert entsprechenden Spannung  $u_P$  verglichen werden. Der geschlossene Regelkreis ist bestrebt, den Absolutwert des Mischsignals  $u_M$  klein zu halten (Gegenkopplung!).

Als Beispiel soll der Regler folgende Funktion erfüllen:

$$u_M = A \frac{P_s - P}{P_s} - B \frac{1}{\tau} \quad (35)$$

wobei  $P_s$  die Sollwerteleistung und  $A$  und  $B$  Regelparameter sind. Das Mischsignal wird aus zwei Gliedern, dem Leistungsterm  $u_{MP} = A (P_s - P)/P_s$  und dem Periodenterm  $u_{M\tau} = -B 1/\tau$  gebildet.

Bei einer unerwünschten Änderung der Leistung  $P$  (z. B.  $P > P_s$ , d. h.  $\tau = \text{positiv endlich}$ ) wirken die beiden Glieder miteinander ( $u_{MP}$  und  $u_{M\tau}$ , negativ) und der Regelstab wird sinngemäß bewegt (eingetaucht). Wenn man nun einen neuen Sollwert wählt (z. B.  $P < P_s$ ), wird ihn der Reaktor nur mit begrenzter Geschwindigkeit annähern können. Die Spannungen  $u_{MP}$  und  $u_{M\tau}$  wirken nämlich gegeneinander ( $u_{MP} = \text{positiv}$ ,  $u_{M\tau} = \text{negativ}$ ). Je mehr sich der Istwert dem Sollwert nähert, um so länger muss die Periode sein, um den Absolutwert des Mischsignals klein zu halten. Die Leistung strebt also ihren neuen Sollwert mit zunehmender Periode an, und ein Überschwingen kann verhindert oder zumindest klein gehalten werden. Verändert sich die Leistung zu rasch, d. h. ist  $|\tau|$  zu klein, so bewegt sich der Regelstab sogar in entgegengesetzter Richtung. (Eine kurze positive Periode wirkt sich aus wie eine zu grosse Leistung  $P > P_s$ .)

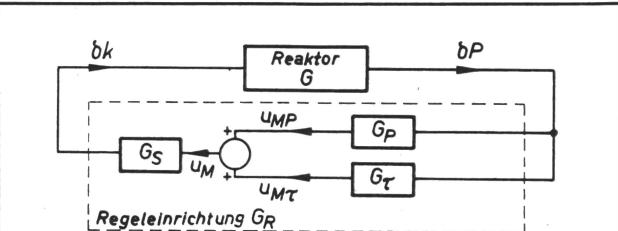
In der Sprache der klassischen Regeltechnik würde man die erwähnte Regeleinrichtung wie folgt beschreiben:

Als «Fühler» dienen zwei Neutronenmesskammern. Durch entsprechende Anordnung wird ein Mischsignal  $u_M$  gebildet. Die Spannung  $u_M$  enthält ein Glied mit Proportional- [ $A (P_s - P)/P_s$ ] und ein Glied mit Differentialcharakter ( $-B/\tau$ ). Das Mischsignal wird auf einen Integrator (Ausgangsgeschwindigkeit proportional der Eingangsgröße) geführt, wodurch ein Regler mit Proportional-Integral-Charakter (PI-Regler) entsteht.

Die Frequenzgang-Darstellung leistet bei der Entwicklung der geeigneten stabilen Feinregelung gute Dienste. In diesem Falle sind nämlich die Abweichungen der Leistung von ihrem Sollwert klein und der Frequenzgang des Reaktors kann für jeden Sollwert der Leistung bestimmt werden. Wenn der Frequenzgang sowohl des Reaktors wie der Regeleinrichtung bekannt sind, kann der geschlossene Regelkreis auf Stabilität hin untersucht werden. Tabelle III enthält die Ableitung des Frequenzgangs der besprochenen Regeleinrichtung. Die erwähnte Feinregelung ist nur eine der möglichen Ausführungen. Gerade die Versuche mit einem Pile-

### Ableitung des Frequenzgangs $G_R$ einer Regeleinrichtung zur Feinregelung der Leistung

Tabelle III



Gemäss Abschnitt 6.2 ist:

$$u_{MP} = A \frac{P_s - P}{P_s}; u_{M\tau} = -B \frac{1}{\tau}; \frac{d\delta k}{dt} = k_s u_M$$

Gemäss Abschnitt 5.2 ist:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{P} \cdot \frac{dP}{dt}$$

Weiterhin gilt:

$$\delta P = P_s - P, P_s = \text{konst. und } \delta P \ll P_s$$

womit:

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{1}{P_s} \frac{d\delta P}{dt}$$

ist.

Somit erhält man:

$$u_{MP} = \frac{A}{P_s} \delta P; u_{M\tau} = -\frac{B}{P_s} \cdot \frac{d\delta P}{dt}; \frac{d\delta k}{dt} = k_s u_M$$

Nach Laplace-Transformation und wenn zur Zeit

$t = 0 \quad \delta P = \delta k = 0$  ist, gilt:

$$U_{MP} = \frac{A}{P_s} \delta P; U_{M\tau} = -\frac{B}{P_s} p \delta P; p \delta k = k_s U_M$$

wobei die variablen Größen nicht mehr Funktionen der Zeit, sondern die des Laplace-Operators  $p$  sind.

Für die Frequenzgänge erhält man:

$$G_P = \frac{u_{MP}}{\delta P} = \frac{A}{P_s}; G_\tau = \frac{u_{M\tau}}{\delta P} = -\frac{B}{P_s} p; G_S = \frac{\delta k}{u_M} = \frac{k_s}{p}$$

Der Frequenzgang der gesamten Regeleinrichtung ist:

$$G_R = G_S (G_P + G_\tau) = -\underbrace{\frac{k_s B}{P_s}}_{\text{Proportional-Charakter}} + \underbrace{\frac{k_s A}{P_s} \cdot \frac{1}{p}}_{\text{Integral-Charakter}}$$

Proportional- Integral- Charakter

Simulator gestatten es, auf relativ einfache Weise die günstigste Reglerart und die optimalen Werte der Regelparameter zu bestimmen.

### Literatur

- [1] Glasstone, S.: Principles of Nuclear Reactor Engineering. Toronto a. O.: Van Nostrand 1955.
- [2] Glasstone, S. und M. C. Edlund: The Elements of Nuclear Reactor Theory. Toronto a. O.: Van Nostrand 1954.
- [3] Schultz, M. A.: Control of Nuclear Reactors and Power Plants. New York, Toronto, London: McGraw-Hill 1955.
- [4] A Programme of Nuclear Power. Publikation des englischen Ministeriums für Kraft und Brennstoff. London: Her Majesty's Stationery Office Febr. 1955.

### Adresse des Autors:

J. Ottrubay, dipl. Ing. ETH, Landis & Gyr A.-G., Zug.