

KFK-146

# KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

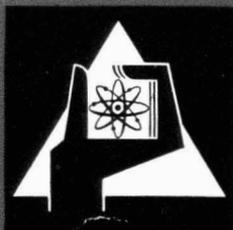
Dezember 1962

KFK 146

Meß- und Regeltechnische Abteilung

Regelung und Instrumentierung von schnellen Reaktoren

P. Dosch



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M. B. H.

KARLSRUHE

KERNREAKTOR  
BAU- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H.  
Verwaltung der Zentralbücherei

25. ... 1963

# KERNREAKTOR

Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H.  
Verwaltung der Zentralbücherei

## Regelung und Instrumentierung von schnellen Reaktoren\*)

Von P. DOSCH, Karlsruhe

### Einleitung

Die grundsätzliche Aufgabenstellung bei der Regelung von Kraftwerken ist unabhängig davon, ob es sich um ein konventionelles oder um ein nukleares Kraftwerk handelt. Kurz gesagt lautet diese Aufgabenstellung: Die im Kessel bzw. im Reaktor erzeugte Leistung ist der Turbinenleistung, d. h. der vom Kraftwerk in ein elektrisches Versorgungsnetz abgegebenen Leistung, anzupassen. Bei einem konventionellen Kraftwerk wird die zu regelnde Kesselleistung durch Messung der abgegebenen Dampfmengen und ihrer Temperaturen festgestellt; es wird also die vom Kessel an das Kreislaufsystem übergebene Leistung gemessen. Die momentan im Kessel erzeugte Verbrennungsleistung wird nicht direkt gemessen. Dieses Verfahren ist zulässig, weil die im Kessel erzeugte Leistung grundsätzlich auf ein Maximum begrenzt ist durch die maximal zuführbare Brennstoffmenge und weil wegen der Wärmeträgheit des Systems nur relativ langsame Temperaturänderungen vor sich gehen können. Änderungen der Verbrennungsleistung werden daher durch Messung der abgegebenen Leistung oder der Temperaturen immer rasch genug erkannt.

Anders liegen diese Verhältnisse in einem Kernreaktor, dem Kessel des nuklearen Kraftwerkes. Im Reaktor-Core befindet sich der Brennstoffvorrat für Monate oder Jahre. Der kernphysikalische Vorgang im Reaktor ermöglicht praktisch unbegrenzt hohe Leistungserzeugung und — verglichen mit den möglichen Leistungsänderungen in einem kohle- oder ölbeheizten Kessel — auch beliebig schnelle Leistungssteigerungen. Die Ausgangsleistung des Reaktors, gemessen im thermodynamischen System, ist deshalb eine nicht brauchbare, zeitlich zu träge Referenz für die Leistungsregelung des Reaktors.

So findet man bei Regelsystemen von nuklearen Kraftwerken als wesentliche Abweichung gegenüber konventionellen Anlagen:

- 1) Die erzeugte Leistung wird direkt geregelt. Sie wird bestimmt durch eine Neutronenflußmessung im Reaktor. Der Neutronenfluß ist der Spaltleistung stets proportional.
- 2) Wegen des möglichen schnellen Leistungsanstieges auf hohe Werte ist in einem Reaktor der Regelung ein Sicherheitssystem überlagert, das bei Störungen im Reaktor, z. B. bei Störungen der Leistungsregelung, durch schnellstmögliche Verringerung der erzeugten Leistung das Überschreiten unzulässig hoher Temperaturen verhindert.

Diese beiden speziellen Überwachungseinrichtungen von Reaktorkraftwerken seien im folgenden kurz dargestellt, wobei

\*) Vortrag, gehalten auf der Informationssitzung über „Moderne Reaktortechnik“ des VDI und des Deutschen Atomforums am 8. Dezember 1962 in Karlsruhe.

die Unterschiede von Systemen für schnelle Reaktoren gegenüber solchen von thermischen Reaktoren besonders hervorzuheben werden sollen.

### Neutronenflußregelung

Den prinzipiellen Aufbau der Neutronenflußregelung zeigt Bild 1. Der Reaktor stellt die Regelstrecke dar; ihre Ausgangsgröße ist der Neutronenfluß, d. h. die Reaktorleistung. Der Neutronenfluß wird durch spezielle neutronenempfindliche Ionisationskammern gemessen, die sich im allgemeinen außerhalb des Reaktor-Cores befinden. Die Empfindlichkeit dieser Ionisationskammern gegenüber schnellen Neutronen ist sehr viel geringer als gegenüber thermischen Neutronen.

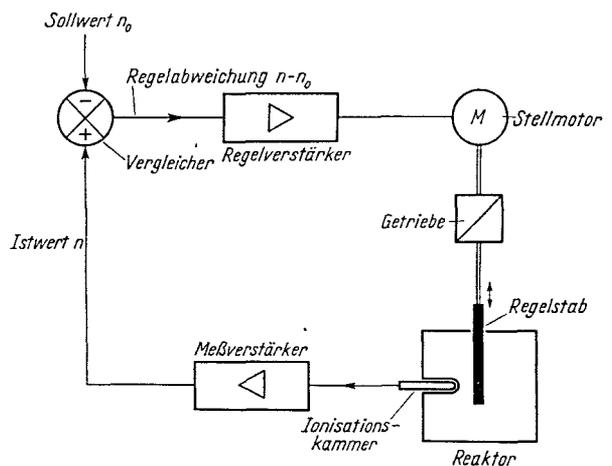


Bild 1. Neutronenflußregelung eines Kernreaktors. Prinzip.

Da aber aus Gründen der Abschirmung des Reaktors die aus ihm austretenden schnellen Neutronen meistens durch eine Graphitschicht verzögert (thermalisiert) werden, kann auch bei einem schnellen Reaktor die Messung der Leistung auf eine Messung thermischer Neutronen zurückgeführt werden. Die Neutronenmeßeinrichtungen einschließlich der Verstärker sind also im Prinzip die gleichen wie bei thermischen Reaktoren. Aus sicherheitstechnischen Gründen, die unten noch näher erläutert werden, muß die Ansprechzeit der Meßgeräte bei schnellen Reaktoren allerdings kürzer sein. Der Regelkreis schließt sich, indem der gemessene Wert des Neutronenflusses (Istwert) mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen wird. Die Abweichung wird einem Regelverstärker

zugeführt, der das Stellglied der Regelstrecke, im vorliegenden Fall den Reaktorregelstab, betätigt. Dieser Regelstab besteht im allgemeinen aus einem absorbierenden Stoff, in besonderen Fällen aus Brennstoff. Konstruktion und Wirkungsweise der Regelstäbe thermischer und schneller Reaktoren unterscheiden sich grundsätzlich nicht voneinander.

Für die Auslegung einer Neutronenfluß-Regelstrecke muß man wissen, wie die Verschiebung des Regelstabes auf den Neutronenfluß einwirkt. Seine Stellung im Reaktor-Core beeinflusst den sog. Multiplikationsfaktor des Reaktors. Ist dieser Multiplikationsfaktor genau 1, so bleibt der Neutronenfluß zeitlich konstant; ist er größer als 1, was durch Herausziehen des Regelstabes erreicht werden kann, so nimmt der Neutronenfluß zu; ist er kleiner als 1, was durch Einfahren des Regelstabes erreicht wird, so nimmt der Neutronenfluß ab. Die Änderung des Neutronenflusses  $n$  folgt einer Exponentialfunktion

$$n = n_0 \cdot e^{\frac{t}{T}}$$

wobei  $t$  die Zeit ist und  $T$  allgemein mit „Reaktorperiode“ bezeichnet wird; diese beschreibt die Schnelligkeit der Neutronenflußänderung. Die Reaktorperiode kann man als die Zeit auffassen, in der sich der Neutronenfluß, also auch die Reaktorleistung, um den Faktor  $e$  verändert.

Die Reaktorperiode hängt im wesentlichen von zweierlei Einflüssen ab:

1. Davon, wie weit sich der Multiplikationsfaktor von 1 unterscheidet. Man nennt diese Differenz des Multiplikationsfaktors zum Wert 1 die „Reaktivität“ des Reaktors.
2. Von der Neutronenlebensdauer  $l$ , die dem Reaktor eigen ist. Ein thermischer Reaktor hat eine charakteristische Neutronenlebensdauer zwischen etwa  $10^{-4}$  und  $10^{-3}$  s, während sich schnelle Reaktoren durch Neutronenlebensdauern von  $10^{-7}$  s auszeichnen.

Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Reaktorperiode von der Reaktivität des Reaktors für einen thermischen Reaktor mit einer Neutronenlebensdauer von  $1 \cdot 10^{-3}$  s und für einen typischen schnellen Reaktor mit einer Neutronenlebensdauer von  $1,8 \cdot 10^{-7}$  s. Man sieht aus Bild 2, daß für kleine Reaktivitäten bis zu einigen Promille der thermische und der schnelle Reaktor sich zeitlich gleich verhalten. Die Reaktorperiode liegt dabei zwischen unendlich und etwa 10 s.

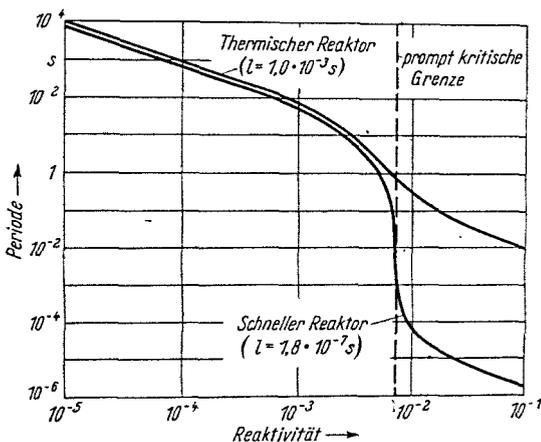


Bild 2. Abhängigkeit der Reaktorperiode von der Reaktivität für einen thermischen und einen schnellen Reaktor.

Überschreitet die Reaktivität einen gewissen Wert, nämlich die sog. prompt kritische Grenze, so stellen sich plötzlich relativ kurze Perioden ein; bei thermischen Reaktoren Perioden in der Größenordnung von  $10^{-1}$  s, bei schnellen Reaktoren aber in der Größenordnung von  $10^{-5}$  s. Der schnelle Reaktor kann also bei Überschreiten der prompt kritischen Grenze wesentlich schnellere Leistungsänderungen durchführen, als der thermische Reaktor. Verglichen mit konventionellen Kraftwerkskesseln sind in beiden Fällen die Änderungsgeschwindigkeiten sehr schnell. Deshalb wird die Annäherung oder Überschreitung dieser prompt kriti-

schen Grenze bei beiden Reaktortypen vermieden. Geschieht dies aber durch irgendwelche Störungen doch, so ist das normale Regelsystem zu langsam, und es muß dann das Sicherheitssystem eingreifen, um zu hohe Leistungen zu verhindern.

### Stabilität der Regelung

Eine Art der Störungen, die zum Überschreiten der prompt kritischen Grenze führen könnte, ist z. B. Instabilität der Reaktorregelung. Für die Stabilitätsuntersuchung eines Regelkreises gibt die sog. Übertragungsfunktion der Regelstrecke gewisse Aufschlüsse.

Bild 3 zeigt die Übertragungsfunktion eines kalten Reaktors für verschiedene Neutronenlebensdauern. Diese Übertragungsfunktion beschreibt die Amplitude der Neutronenflußschwingungen, die entstehen, wenn die Reaktivität des Reaktors zeitlich sinusförmig verändert wird, in Abhängigkeit von der Frequenz der sinusförmigen Reaktivitätsänderungen. Man sieht aus Bild 3, daß die Übertragungsfunktionen für einen thermischen Reaktor mit  $10^{-3}$  s Lebensdauer

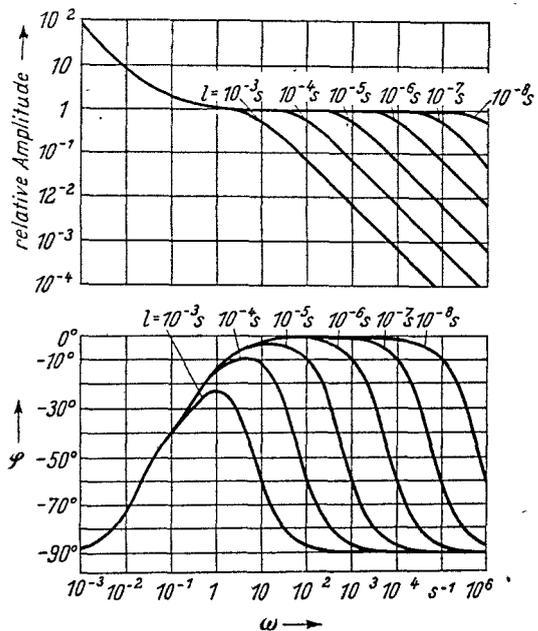


Bild 3. Amplitudengang und Phasengang des rückwirkungsfreien Reaktors;  $l$  mittlere Lebensdauer der prompten Neutronen.

und für einen schnellen Reaktor mit  $10^{-7}$  s Lebensdauer bei Frequenzen bis etwa 1 Hz die gleichen sind. Bei höheren Frequenzen nehmen die Neutronenflußschwingungen thermischer Reaktoren schnell ab, während sie für schnelle Reaktoren noch bis in das Gebiet von einigen kHz konstant bleiben.

Instabilitäten der Reaktorregelung entstehen dann, wenn das Rückführungssystem, das aus Neutronenflußschwingungen wieder Reaktivitätsschwingungen macht, also z. B. der Regelkreis selbst, so geartet ist, daß bei irgendeiner Frequenz diese neu entstehenden Reaktivitätsschwingungen gleich oder größer sind als die anregenden Reaktivitätsschwingungen. In diesem Fall kann das System in sich selbst schwingen; man nennt es instabil.

Betrachtet man die Übertragungsfunktion eines thermischen Reaktors und nimmt man einen stabilen Regelkreis für einen thermischen Reaktor an (und daß es solche gibt, ist bekannt), so sieht man, daß dieser Regelkreis auch bei einem schnellen Reaktor dann nicht zu Instabilitäten führt, wenn seine Verstärkung für Frequenzen ab etwa 1 Hz nicht zunimmt. Wird dies bei der Auslegung der Regelkreise beachtet — und nahezu alle Regeleinrichtungen tendieren von selbst zur Abnahme der Verstärkung mit zunehmender Frequenz —, so wird die Regeleinrichtung eines thermischen Reaktors ohne weiteres auch für einen schnellen Reaktor eingesetzt werden können.

Der Neutronenflußregelkreis stellt nicht das einzige Rückführungssystem eines Reaktors dar. Neutronenflußänderungen, also Leistungsänderungen, wirken durch die von ihnen hervorgerufenen Temperaturänderungen direkt auf die Reaktivität zurück, wenn der Reaktor einen positiven oder negativen Temperaturkoeffizienten aufweist. Auf diesem Wege können, unabhängig vom automatischen Regelsystem, Instabilitäten oder Neigung zu Instabilitäten bei einem Reaktor entstehen. Die Frequenzen, bei denen solche Temperaturkoeffizienten zur Wirkung kommen, werden gekennzeichnet durch die Zeitkonstanten der thermischen Vorgänge, die ihnen zugrunde liegen. Auch bei den am schnellsten zur Wirkung kommenden Temperatureinflüssen findet man kaum Frequenzen über 1 Hz. Damit wirken sich auch Temperatureinflüsse bei schnellen und thermischen Reaktoren etwa in gleicher Weise aus, da in diesem Frequenzbereich die Übertragungsfunktionen dieser beiden Reaktoren praktisch dieselben sind.

Die thermische Rückwirkung der Reaktorleistung auf die Reaktivität findet über sehr viele verschiedene Wege statt. Wie stark und wie schnell die Temperaturen des Brennstoffs, des Kühlmittels und des Strukturmaterials im Core und im Blanket von Leistungsänderungen beeinflusst werden, hängt vor allem von den Betriebsdaten des primären, aber auch des sekundären und evtl. vorhandenen tertiären Kreislaufes ab. Besonders vielfältig und verzweigt werden die Wirkungsmöglichkeiten, wenn vom Ausgang des thermodynamischen Systems, d. h. also von der Turbine her, durch ein automatisches Regelsystem auf die Reaktivität des Reaktors zurückgewirkt wird. Auf diese Weise die Reaktorleistung direkt und schnell der geforderten Turbinenleistung nachzuregeln, scheint sehr verlockend, da man bei einem Reaktor über eine Energiequelle verfügt, deren Leistung man sehr schnell ändern kann. Reaktorregelungen, bei denen die Reaktorleistung in Sekundenschnelle den Lastbedingungen der Turbine angepaßt wird, sind ausgeführt worden und haben sich bewährt. Andererseits werden Stabilitätsuntersuchungen und Sicherheitsbetrachtungen außerordentlich kompliziert,

und dies ist der Grund, daß man in vielen Fällen Turbinenregelung und Reaktorregelung möglichst weitgehend voneinander trennt. Auch bei der Regelung des schnellen Reaktors Enrico Fermi wurde so verfahren. Sein Regelschema zeigt Bild 4. Die Turbinenleistung wird über einen Dampfdruckregler im Tertiärkreis geregelt, die überschüssige Dampfmenge an der Turbine vorbeigeleitet. Die vorgegebene Reaktorleistung wird vom Regelsystem nach einem festen Programm in eine entsprechende Kühlmittel-Ausgangstemperatur umgesetzt. Die gemessene Ausgangstemperatur wird mit dieser gewünschten verglichen und gibt an den eigentlichen Reaktorregler den Befehl zur Erhöhung oder Erniedrigung der Leistung. Diese Leistungsänderung hängt von der Abweichung der gewünschten oder vorhandenen Temperatur ab, ist aber — und das ist das Bemerkenswerte an dieser Regelung — begrenzt auf eine Änderungsgeschwindigkeit von 3 MW/min, bei einer maximalen Reaktorleistung von 300 MW also auf 1%/min. Damit wird dem Reaktor etwa das Zeitverhalten eines konventionellen Kessels vorgeschrieben.

Die Kühlmittel-Eingangstemperatur wird nach der jeweils vorhandenen Kühlmittel-Austrittstemperatur durch Beeinflussung der Speisewasserpumpen des Tertiärkreises so geregelt, daß die mittlere Kühlmitteltemperatur im Reaktor annähernd konstant bleibt. Temperaturrückwirkungen werden damit auf ein Minimum beschränkt.

### Das Sicherheitssystem

Instabilitäten können dazu führen, daß die Reaktivität sich der prompt kritischen Grenze annähert oder diese sogar überschreitet. Ähnliche Reaktivitätsstörungen kann man sich aber auch anders ausgelöst vorstellen, so z. B. durch unkontrollierte Bewegungen der Regelstäbe, durch plötzliche starke, rasche Temperaturänderungen oder durch mechanische Veränderungen im Reaktor-Core. Um solchen Reaktivitätsänderungen entgegenzuwirken, ist jeder Reaktor mit dem bereits erwähnten Sicherheitssystem ausgerüstet.

Den prinzipiellen Aufbau eines Sicherheitssystems zeigt Bild 5. Es besteht aus den sog. Sicherheitsstäben, meist aus Absorbermaterial, die im allgemeinen oberhalb des Cores durch Halteeinrichtungen, meist Elektromagnete, in Bereitschaft gehalten werden und bei Abschalten der Magnete meist nur durch Schwerkraft beschleunigt in das Core eintreten. Dadurch wird die Energieerzeugung im Reaktor auf schnellstmögliche Weise unterbrochen.

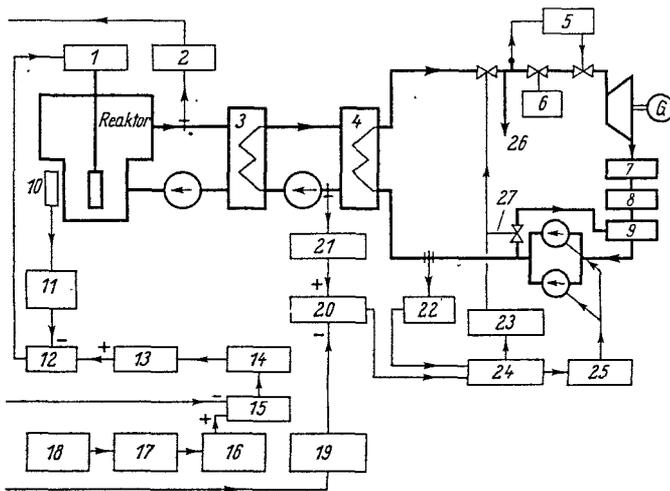


Bild 4. Schneller Reaktor „Enrico Fermi“. Regelschema.

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 Regelstab-Antrieb                | 18 Sollwertgeber für die Reaktorleistung                                |
| 2 Gemessene Austrittstemperatur    | 19 Vorgegebene Eintrittstemperatur                                      |
| 3 Zwischen-Wärmeaustauscher        | 20 Vergleichler   |
| 4 Dampferzeuger                    | 21 Gemessene Eintrittstemperatur  |
| 5 Druckregler                      | 22 Speisewasserdurchfluß  |
| 6 Schnellschlußventil              | 23 Ventilregelung bei Speisewasserdurchfluß < 30% Nennwert              |
| 7 Kondensator                      | 24 Sollwert für Änderung des Speisewasserdurchflusses                   |
| 8 Vorwärmer                        | 25 Pumpendrehzahl-Regelung bei Speisewasserdurchfluß > 30% vom Nennwert |
| 9 Entlüfter                        | 26 Dampfblaß  |
| 10 Neutronendetektor               | 27 Bypass.  |
| 11 Gemessene Leistungsänderung     |   |
| 12 Vergleichler                    |   |
| 13 Begrenzer                       |   |
| 14 Vorgegebene Leistungsänderung   |   |
| 15 Vergleichler                    |   |
| 16 Begrenzer                       |   |
| 17 Vorgegebene Austrittstemperatur |   |

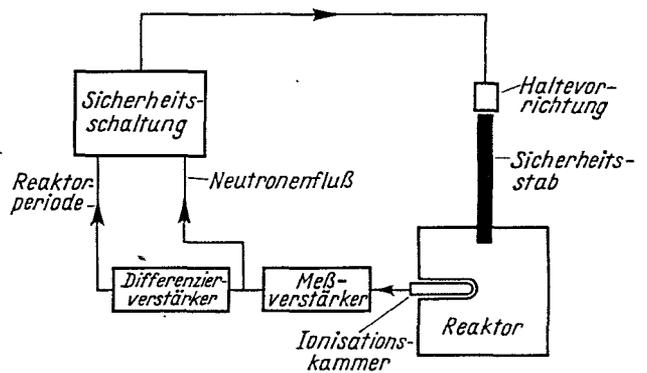


Bild 5. Sicherheitssystem. Prinzip.

Außer diesen Stellgliedern besteht das Sicherheitssystem aus Meßgeräten für den Neutronenfluß und für die Reaktorperiode und aus der sog. Sicherheitsschaltung. Diese Sicherheitsschaltung hat zwei Aufgaben:

1. Bei unzulässigen Meßwerten wie bei zu hohem Neutronenfluß und zu kurzer Reaktorperiode ist der Reaktorschluß durch Bewegen der Sicherheitsstäbe auszulösen.
2. Das ganze Sicherheitssystem ist durch entsprechende Überwachungs- und Schaltmaßnahmen vor Versagen durch Gerätefehler zu schützen.

Das Sicherheitssystem muß in seinem Zeitverhalten so ausgelegt sein, daß es auch bei den denkbar schnellsten Reakti-

vitätsstörungen ein Überschreiten der zulässigen Temperaturen im Reaktor verhindern kann. Wesentlich sind hierbei sowohl die Geschwindigkeit der Sicherheitsstäbe als auch die Verzögerungszeit bis zum Beginn der Stabbewegung. Die Bestimmung dieser Auslegungsgrößen ist nicht einfach, da sie von vielen Reaktordaten in nicht trivaler Weise beeinflußt werden. Etwas vereinfachend kann man die Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Sicherheitsstäbe muß so groß sein, daß die resultierende Reaktivitätsänderung größer ist als die der aufzufangenden Störung. Bei thermischen Reaktoren ist gewöhnlich die freie Fallgeschwindigkeit der Stäbe ausreichend. Bei schnellen Reaktoren sind wegen der kleinen Core-Abmessungen schnellere Reaktivitätsstörungen denkbar, so daß künstliche Beschleunigungseinrichtungen der Sicherheitsstäbe notwendig werden.
2. Die zulässige Verzögerungszeit ist ungefähr der Störungsgeschwindigkeit der Reaktivität proportional; sie wird außerdem wesentlich durch die Neutronenlebensdauer beeinflußt. Bei thermischen Reaktoren liegt die übliche Verzögerungszeit in der Größenordnung von etwa 100 ms. Man könnte auf den Gedanken kommen, daß diese Verzögerungszeit bei schnellen Reaktoren um den Faktor tausend- bis zehntausendmal kleiner werden muß als bei thermischen, weil auch die Reaktorperioden im prompt kritischen Gebiet um diesen Faktor kleiner sind. Dies ist glücklicherweise nicht der Fall.

Bild 6 zeigt die maximal zulässige Verzögerungszeit bei einer Reaktivitätsstörung von 300 \$/s (1 \$ ist der Reaktivitätswert, bei dem der Reaktor prompt kritisch wird). Dies ist eine der schnellsten Störungsgeschwindigkeiten, die eintreten können. Man sieht, daß bei schnellen Reaktoren die zulässige Verzögerungszeit etwa um den Faktor 10 kürzer sein muß als bei Reaktoren mit Lebensdauern von  $10^{-3}$  s.

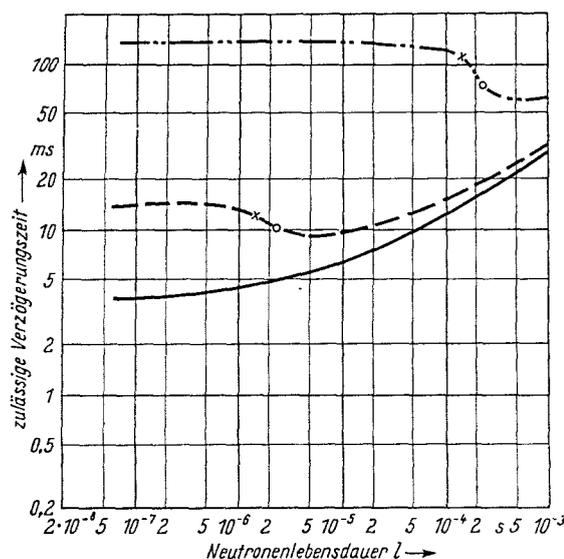


Bild 6. Maximal zulässige Verzögerungszeit bei einer schnellen Reaktivitätsstörung von 300 \$/s.

— Temperaturkoeffizient Null  
 - - - - - kleiner, prompt negativer Temperaturkoeffizient  
 - · - · - größerer, prompt negativer Temperaturkoeffizient

Bild 6 zeigt noch zwei andere Kurven, in denen der Einfluß eines negativen, prompten Temperaturkoeffizienten dargestellt ist, wie er etwa durch den Dopplerkoeffizienten verwirklicht werden kann. Man sieht, daß solche negative Temperaturkoeffizienten vor allem bei kurzen Neutronenlebensdauern zu drastischen Verlängerungen der maximal zulässigen Verzögerungszeit und somit zur Erleichterung der Auslegung des Sicherheitssystems führen kann oder umgekehrt dazu, daß ein Reaktor-Sicherheitssystem schnellere Reaktivitätsstörungen auffangen kann. Hier bringt die kurze Neutronenlebensdauer einen Vorteil: Die Leistung und damit die Tem-

peratur im Reaktor steigt schneller an als bei längeren Neutronenlebensdauern, wodurch der negative Temperaturkoeffizient frühzeitiger der Reaktivitätsstörung entgegenwirkt und das Eingreifen des Sicherheitssystems erst später notwendig wird.

Was also Sicherheitssysteme von schnellen und von thermischen Reaktoren im wesentlichen voneinander unterscheidet und unterscheiden muß, sind die deutlich kürzeren Verzögerungszeiten. Die Verzögerungszeiten werden bestimmt durch die Meßverzögerungen der Neutronenmeßgeräte, durch die Signalverzögerungen der erwähnten Sicherheitsschaltungen und vor allem und wesentlich durch die mechanischen Verzögerungen beim Auslösen und Beschleunigen der Reaktorsicherheitsstäbe. Eine genaue und ausführliche Betrachtung zeigt, daß es am schwierigsten ist, die letztgenannte Art der Verzögerungen, nämlich die mechanische der Abschaltstäbe, klein zu halten. Deshalb scheint es zweckmäßig, bei der Auslegung eines Sicherheitssystems die beiden erstgenannten Verzögerungszeiten — die der Neutronenmeßgeräte und der eigentlichen Sicherheitsschaltung — nach Möglichkeit vernachlässigbar klein werden zu lassen. Man erreicht dies, indem man die Verzögerungszeiten dieser ersten Gruppen etwa je eine Millisekunde oder kleiner auslegt. Für die Neutronenmeßgeräte bedeutet dies, daß hochempfindliche Gleichspannungsverstärker mit Bandbreiten von mindestens 1 kHz angewendet werden müssen. Diese Verstärker müssen besonders rauscharm sein, da ihr Ausgangssignal zur Gewinnung eines Meßwertes für die Reaktorperiode differenziert werden muß. Differenzieren bedeutet aber eine Verstärkung des Rauschens, weshalb vor allem dann, wenn das Differenziergerät auch mit Verzögerungszeiten unter einer Millisekunde behaftet sein soll, ein extrem störungsfreies Ausgangssignal der Neutronenmeßverstärker gefordert werden muß. Die Erstellung solcher Geräte für einen technischen Zweck erscheint im Prinzip nicht unmöglich. Ihre Vorbilder findet man in der Präzisionsgleichstrom-Verstärkertechnik von Analogrechenmaschinen.

Was bisher die eigentliche Sicherheitsschaltung genannt wurde, ist in der gebräuchlichsten und einfachsten Form die bekannte 2-von-3-Schaltung, bei der 3 gleiche Meßgeräte laufend auf gleichmäßiges Arbeiten überwacht werden. Die Sicherheitsstäbe werden dann ausgelöst, wenn mindestens 2 der 3 Meßgeräte gefährliche Meßwerte anzeigen.

Solche Systeme haben sich bereits seit langem in der Reaktortechnik bewährt. Sie verhindern, daß durch einen Gerätefehler das Sicherheitssystem versagt. Die heutige Weiterentwicklung strebt dahin, daß die Sicherheitsschaltung nicht nur die Meßgeräte, sondern auch ihre eigenen Bauelemente laufend auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. An Stelle der wöchentlichen oder täglichen Prüfung des Systems von Hand durch den Reaktoroperator tritt dabei ein sekundlicher Prüfzyklus des gesamten Sicherheitssystems. Da die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen des Sicherheitssystems gegeben ist durch die Wahrscheinlichkeit, daß in dem Zeitraum zwischen zwei Prüfungen des Systems sowohl der Ausfall seiner Funktionstüchtigkeit als auch die Reaktorstörung fällt, die vom System aufgefangen werden soll, erreicht man mit der sekundlichen Prüfung eine um den Faktor  $10^5$  höhere Sicherheit als mit einer täglichen Prüfung.

Die automatische Prüfung des Sicherheitssystems, das im wesentlichen aus digitalen Schaltelementen besteht, erfolgt durch kurze impulsförmige Signale, die auf den verschiedensten Wegen durch die Schaltung geleitet werden, wobei die richtige Antwort des Systems geprüft wird. Die Dauer der impulsförmigen Prüfsignale liegt wesentlich unter der Ansprechzeit des Systems, d. h. bei Sicherheitssystemen schneller Reaktoren wesentlich unter einer Millisekunde. Da die Prüfpulse auch auf den Meßleitungen auftauchen und dort das Meßsignal nicht beeinflussen dürfen, kommt man zu einer optimalen Prüfpulslänge für Sicherheitssysteme schneller Reaktoren von ca. 10 Mikrosekunden.

Die technische Ausführung solcher Systeme erscheint auf jeden Fall möglich; Vorbilder finden wir in digitalen Rechenmaschinen, in denen ähnlich kurze Impulse gehandhabt werden.

### Schnelle mechanische Abschaltssysteme

Zum Schluß sollen noch die Verzögerungen bei der mechanischen Beschleunigung der Reaktorsicherheitsstäbe betrachtet werden. Es sind Beschleunigungseinrichtungen der verschiedensten Art entwickelt und erprobt worden, von denen drei Beispiele angeführt sein mögen.

Bild 7 zeigt die Ansicht eines pneumatisch beschleunigten Abschaltstabes, der für eine schnelle kritische Anordnung in Amerika gebaut wurde. Der Abschaltstab wird von einem Motor über eine magnetische Kupplung, ein Ritzel und eine Zahnstange bewegt und steht dauernd in Verbindung mit einem Preßluftkolben, der mit etwa 10 at Druck beaufschlagt ist. Im Falle des Schnellschlusses wird die Magnetkupplung entregt, so daß der Abschaltstab durch den Kolbendruck beschleunigt bewegt wird.

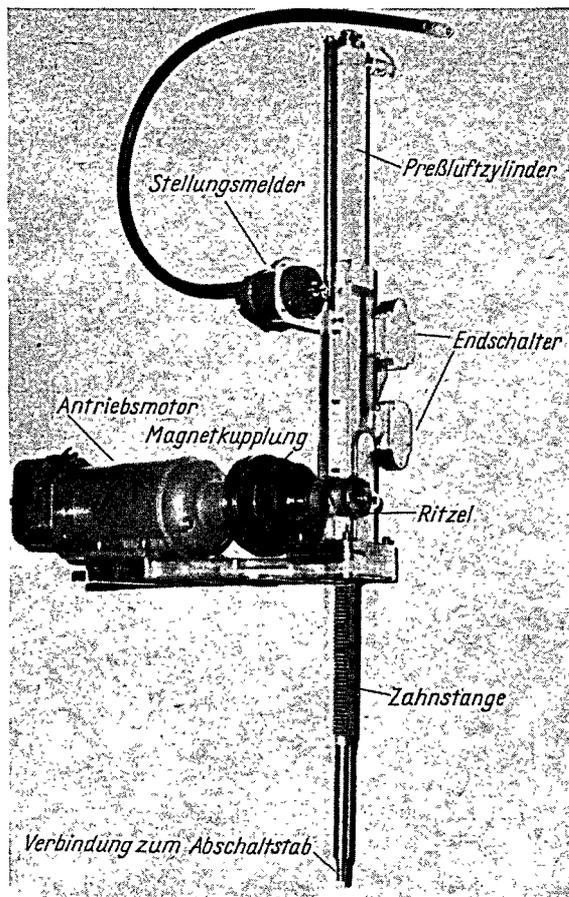


Bild 7. Beispiel für eine pneumatische Beschleunigungseinrichtung für einen Abschaltstab.

Bild 8 zeigt eine hydraulische Einrichtung zur Beschleunigung der Stabbewegung, die in England entwickelt worden ist. Der Stab wird hydraulisch gegen ein Stickstoffdruckpolster angehoben (ca. 50 atü). Zur schnellen Abwärtsbewegung wird ein magnetisch geschlossenes Ventil geöffnet, so daß Öl durch den Gasdruck in einen Hilfsbehälter strömt. Erreicht wird eine Beschleunigung von ca. 10 g. Bild 9 zeigt den für diese Anordnung notwendigen Kreislauf.

Beide Konstruktionen haben den Nachteil, daß bis zum Beginn der vollen Stabbewegung noch Verzögerungszeiten durch die mechanische Anordnung entstehen. Im Falle des druckluftbeschleunigten Stabes handelt es sich im wesentlichen um die Entregungszeiten der magnetischen Kupplung, im Falle der Hydraulik um die Ventilöffnungszeiten und die strömungstechnisch bedingten Verzögerungen.

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde ein neuartiges Antriebselement entwickelt, das bei einfacher Bauweise diese Nachteile vermeidet. Es handelt sich um einen elektromagnetischen Impulsgeber. Durch eine Spule wird ein kurzer, starker Stromstoß geleitet. Ein Kurzschlußring, der der

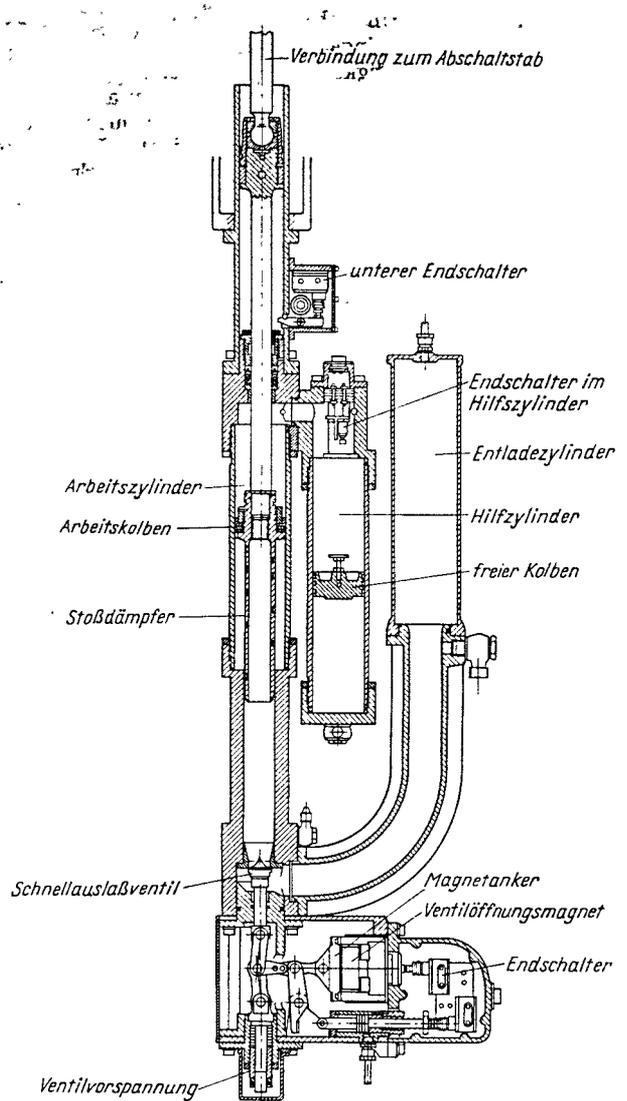


Bild 8. Beispiel für eine hydraulische Beschleunigungseinrichtung für einen Abschaltstab.

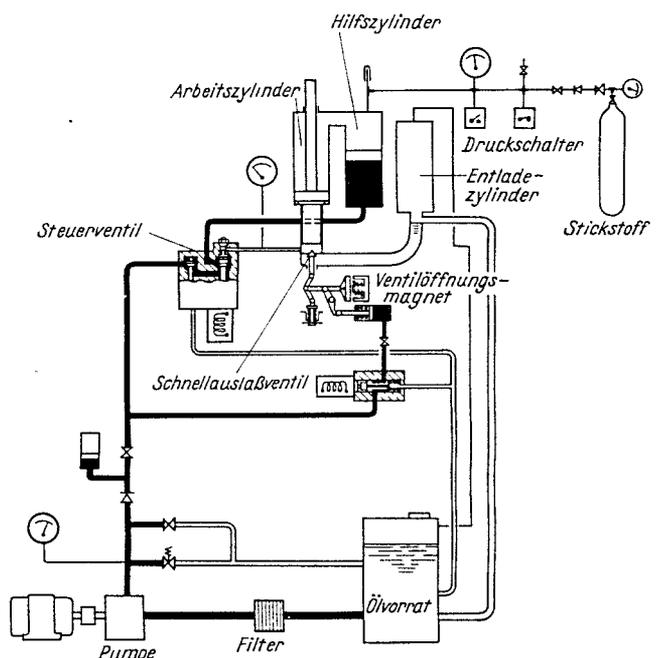


Bild 9. Kreislauf für die hydraulische Beschleunigungseinrichtung nach Bild 8.

Spule gegenüberliegt, wird dadurch impulsartig beschleunigt, so daß der Abschaltstab in Bewegung gesetzt wird. Ausgeführte Modelle haben gezeigt, daß relativ kleine Baueinheiten dieses Impulsgebers — Durchmesser und Länge unter 10 cm — einem Reaktorabschaltstab mit einem Gewicht von 5 kg eine Geschwindigkeit von etwa 7 m/s bei Verzögerungszeiten von nur einigen 100  $\mu$ s verleihen können.

Bild 10 zeigt die Bewegung der Abschaltstäbe über der Zeit bei Verwendung der drei erwähnten Beschleunigungssysteme. Nimmt man gleiche Reaktivitätswirkung der Stäbe bei allen drei Systemen an, so erhält man für ein spezielles Beispiel das Ergebnis, daß eine Reaktivitätsstörung von 1,5  $\$$  durch das Sicherheitssystem ohne Beschädigung des Reaktors aufgefangen werden kann, wenn die Störung im Falle des pneumatischen Antriebs mit einer maximalen Geschwindigkeit von 20  $\$/s$  erfolgt, im Falle des hydraulischen Antriebs mit 50  $\$/s$ . Bei Anwendung des elektromagnetischen Impulsgebers dagegen kann die Störung auch dann noch beherrscht werden, wenn sie mit einer maximalen Geschwindigkeit von 260  $\$/s$  auftritt.

Hiermit sei dieser kurze Überblick der Eigenschaften von Regel- und Sicherheitssystemen, speziell bei schnellen Reaktoren, abgeschlossen. Zusammenfassend und in der Gegenüberstellung gegen bewährte Systeme thermischer Reaktoren kann man feststellen:

Die Regelung von schnellen Reaktorkraftwerken bietet gegenüber thermischen Reaktorkraftwerken im Prinzip keine neuen Probleme. Bei den Sicherheitssystemen muß eine um etwa den Faktor 10 kürzere Reaktionszeit als bei den thermischen Reaktoren erreicht werden, was technisch möglich ist. Ein prompter, negativer Temperaturkoeffizient trägt zur Sicherheit des Reaktors mehr bei als bei thermischen Reaktoren. Eine ganze Reihe von Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten müssen noch durchgeführt werden, von

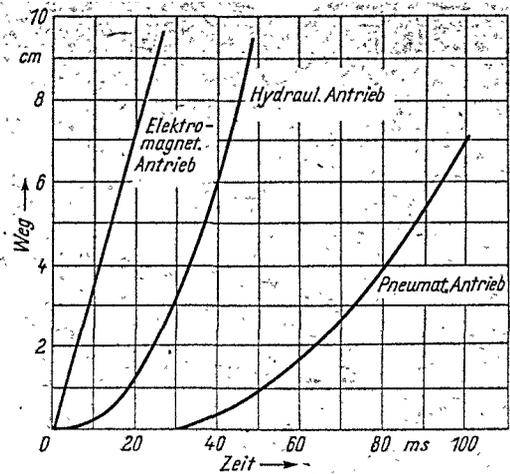


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der Bewegung von Abschaltstäben bei verschiedenen Beschleunigungssystemen.

denen hier nur die wesentlichsten angedeutet werden konnten. Diese Ausführungen haben ihren Zweck erfüllt, wenn sie zeigen konnten, daß das Ziel dieser Arbeiten nicht in unerreichbaren Fernen liegt.

#### Schrifttum

- [1] Merz, L.: Regelung und Instrumentierung von Kernreaktoren. Bd. 1: Grundbegriffe und Grundlagen. München: R. Oldenbourg Verlag 1961.
- [2] Dietrich, J. R. u. Zinn, W. H.: Solid fuel reactors. Reading (Mass.): Addison Wesley Publishing Company Inc. 1958.
- [3] Lockett, G. E., Some design aspects of nuclear-reactor control mechanisms. S. 127—138 In: The Journal of the British Nuclear Energy Conference Bd. 1 (1956).