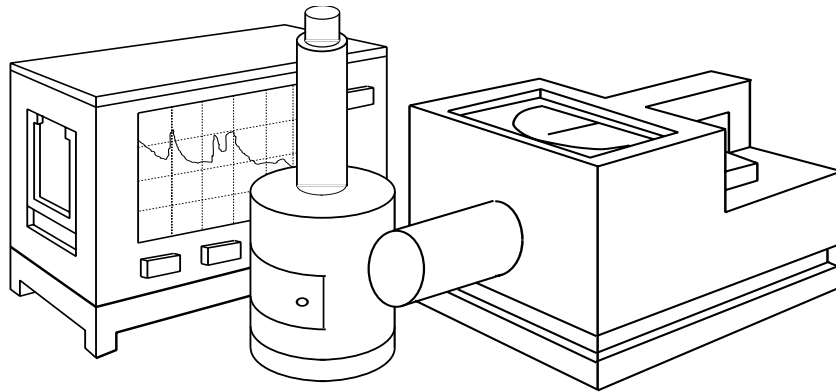


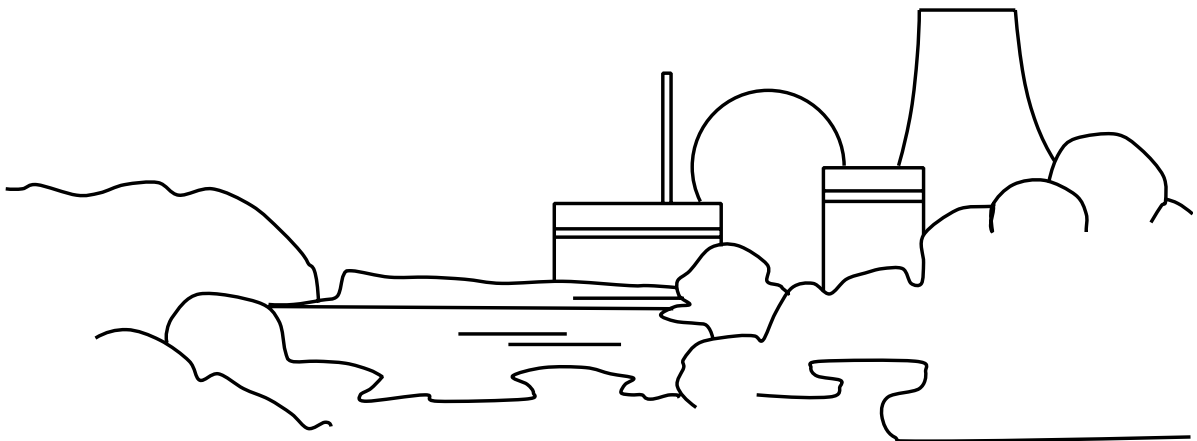
**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DRESDEN**
Institut für Energietechnik
Ausbildungskernreaktor



REAKTORPRAKTIKUM

VERSUCH

"Reaktorstart"



Praktikumsanleitung

Versuch "Reaktorstart"

Gliederung:

1. . . . Zielstellung
2. . . . Aufgabenstellung
3. . . . Arten des Reaktorstarts
4. . . . Theoretische Grundlagen
 - 4.1. . Prompte und verzögerte Neutronen
 - 4.2. . Unterkritischer Reaktor
 - 4.3. . Überkritischer Reaktor
 - 4.3.1. Verzögert überkritischer Reaktor ($\rho < \beta$)
 - 4.3.2. Prompt überkritischer Reaktor ($\rho > \beta$)
 - 4.4. . Einfluss der Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit
5. . . . Versuchsdurchführung
 - 5.1. . Aufbau und Funktionsweise des AKR
 - 5.2. . Wiederholungsstart
 - 5.3. . Leistungsänderung
 - 5.4. . Bestimmung des Betriebszustandes
6. . . . Hinweise zum Versuchsprotokoll
7. . . . Erklärung verwendeter Formelzeichen
8. . . . Kontrollfragen

Stand: 12.05.2011

1. Zielstellung

Am Beispiel des Ausbildungs- und Forschungsreaktors AKR der Technischen Universität Dresden sollen

- der prinzipielle Aufbau eines thermischen Kernreaktors und
- die Funktionen der Hauptkomponenten, die für das Zustandekommen einer gesteuerten Kernspaltungskettenreaktion erforderlich sind, studiert werden.

Zum Kennenlernen des typischen Steuerverhaltens müssen die Aussagen der Reaktortheorie, die sich aus den kinetischen Reaktorgleichungen ableiten lassen, so umgesetzt werden, dass anhand der Anzeigen für die Reaktorleistung und für die Reaktorperiode die Reaktorzustände sicher erkannt werden und vorgegebene Betriebszustände sicher und rasch eingestellt werden.

2. Aufgabenstellung

- 2.1. Die Funktionskontrolle des Reaktors ist gemäß Prüfvorschrift durchzuführen und zu protokollieren.
- 2.2. Der Reaktor ist durch Wiederholungsstart in Betrieb zu nehmen und bei der in der Betriebsanweisung (BA) genannten thermischen Leistung kritisch zu machen.
- 2.3. Zur qualitativen Untersuchung des Verhaltens eines Nullleistungsreaktors sind Leistungsänderungen gemäß Anweisung des Versuchsleiters durchzuführen.
- 2.4. An ausgewählten Messpunkten im Kontrollbereich ist die Gamma-Dosisleistung in Abhängigkeit von der thermischen Leistung des Reaktors zu bestimmen.
- 2.5. In Abhängigkeit von der thermischen Leistung des Reaktors ist die kritische Stabstellung zu ermitteln und zu diskutieren.

3. Arten des Reaktorstarts

Einen Kernreaktor zu starten heißt, eine gesteuerte Kernspaltungskettenreaktion in Gang zu setzen. Dieser Vorgang muss in jeder Phase eindeutig kontrolliert und sicher beherrscht werden.

Der heiße Start eines Leistungsreaktors, d.h. die Inbetriebnahme aus dem abgeschalteten Zustand bis zum Erreichen einer hohen thermischen Leistung (> 1000 Megawatt) ist wegen der erforderlichen Wärmeabfuhr ein außerordentlich komplexer Prozess. Die grundlegenden reaktorphysikalischen Vorgänge des Startprozesses können deshalb einfacher an einem sog. **Nullleistungsreaktor** wie dem AKR studiert werden.

Nullleistungsreaktoren werden nur bei so niedrigen Leistungen (Watt bis Kilowatt) betrieben, dass Leistungseffekte wie

- Brennstoffabbrand,
- Vergiftung des Brennstoffs oder
- Temperatureffekte

während der Versuchsdauer praktisch vernachlässigt werden können. Damit entspricht jeder Start eines solchen Nullleistungsreaktors einem Kaltstart eines Leistungsreaktors hinsichtlich des nuklearen Teils dieser Anlage.

Bei Nullleistungsreaktoren unterscheidet man drei Arten von Reaktorstarts:

- Wiederholungsstart,
- Anfahrexperiment,
- Kritisches Experiment.

Der **Wiederholungsstart** ist der Anlassvorgang des routinemäßigen Reaktorbetriebes. Wiederholungsstarts können durchgeführt werden, wenn seit der letzten Inbetriebnahme am Reaktor selbst oder an den experimentellen Einbauten nichts verändert wurde, was das Reaktivitätsverhalten des Reaktors beeinflusst. Die Reaktivitätscharakteristiken und die dem kritischen Zustand des Reaktors entsprechenden Stellungen der Steuerstäbe sind bekannt.

Ein **Anfahrexperiment** dient dem Nachweis der sicheren Inbetriebnahme des Reaktors nach Veränderungen an der Anlage (z.B. Einbau von Experimentiereinrichtungen), bei denen sich aus einer vorher sorgfältig durchzuführenden Analyse nicht die Notwendigkeit für ein kritisches Experiment ergibt. Ein Anfahrexperiment wird nur an einem ausgemessenen Reaktor durchgeführt. In diesem Falle sind die Beladung mit Brennstoff, die Reflektoranordnung und die Reaktivitätswerte der Steuerstäbe bekannt.

Ein **Kritisches Experiment** muss durchgeführt werden, wenn die physikalischen Parameter eines Reaktors (z.B. kritische Masse, Reaktivitätsäquivalente der Steuerstäbe, Überschussreaktivität usw.) nur aus Rechnungen bekannt sind. Das trifft auf die Erstbeladung jedes Reaktors und auf das Anlassen nach jeder Veränderung an der Anlage zu, die das Reaktivitätsverhalten wesentlich beeinflusst.

4. Theoretische Grundlagen

Bei Nullleistungsreaktoren ist die Neutronenflussdichte Φ (Maßeinheit: $n / (cm^2 \cdot s)$) die geregelte Messgröße. Sie ist proportional zur Neutronendichte n (Maßeinheit: n/cm^3) wie auch zur Reaktorleistung (Maßeinheit: Watt) oder der Gesamtzahl der Neutronen N im Reaktor.

Der abgeschaltete Reaktor ist im Normalfall fast neutronenleer. Sein Zustand hinsichtlich der Neutronenreproduktion wird durch den Multiplikationsfaktor $k < 1$ gekennzeichnet. Dieser **unterkritische Zustand** wird durch materielle und/oder geometrische Bedingungen in der Spaltzone aufrechterhalten, z.B. durch das Einbringen von Neutronenabsorbem, Entfernen des Moderators oder Reflektors, Trennen der Spaltzone in unterkritische Teilmassen u.ä. Durch schrittweise Beseitigung dieser Maßnahmen wird der Reaktor in den **kritischen Zustand ($k = 1$)** bzw. **überkritischen Zustand ($k > 1$)** überführt.

Bemerkenswert an diesem Vorgang ist, dass sich dabei die Neutronenflussdichte um viele Zehnerpotenzen ändert, von wenigen Neutronen bis zu vielen Millionen Neutronen pro Zeit- und Flächeneinheit je nach anzufahrender Endleistung. Zur Vermeidung von Startzwischenfällen müssen daher bestimmte Anlassvorschriften eingehalten werden.

Die Anlassvorschriften vermeiden:

- Fehlhandlungen des Reaktoroperators, resultierend aus einer Fehlinterpretation des Reaktorzustandes,
- zu hohe Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit,
- zu hohe Überschussreaktivität ($\rho_{\text{Ü}} > \beta$).

Da ein Reaktor auch schon bei sehr niedrigen Leistungen kritisch werden kann, besteht die Gefahr, dass der kritische Punkt schon bei einer sehr kleinen Neutronenflussdichte überschritten wird, ohne dass es der Reaktoroperator bewusst wahrnimmt. Bei niedriger Neutronenflussdichte sind wegen der statistischen Schwankungen des Messsignals Nachweisgeräte mit trägem Zeitverhalten notwendig. Die Zeitverzögerung zwischen Auftreten und Anzeige der Messgröße kann zur Fehlbeurteilung des Reaktorzustandes durch den Operator führen, der daraufhin unter Umständen den Multiplikationsfaktor unzulässig weit in den überkritischen Bereich vergrößert. Das folgende schnelle Anwachsen der Neutronenflussdichte würde möglicherweise erst dann registriert, wenn es zum Eingreifen in den Ablauf des Geschehens schon zu spät sein könnte und Schäden für die Anlage und das Personal nicht mehr auszuschließen wären.

Voraussetzungen für einen sicheren Reaktorstart sind somit:

- Der Reaktor muss von einem hinreichend hohen Niveau der Neutronenflussdichte aus gestartet werden. Die anfängliche Neutronenflussdichte ist soweit anzuheben, dass die Nachweisgeräte brauchbare Messwerte liefern. Gewöhnlich setzt man bei Nullleistungsreaktoren zur Überwachung des unterkritischen Zustandes eine künstliche Neutronenquelle in den Reaktor ein, deren Multiplikation die für die Nachweisgeräte nötige Neutronenflussdichte liefert. Bei Reaktoren höherer Leistung kommt dafür auch die direkte Nutzung von Neutronen aus spontaner Spaltung und (γ, n) -Reaktionen in Betracht.
- Begrenzung der positiven Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit
Es werden nur solche positiven Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeiten zugelassen, bei denen
 - im Normalbetrieb eine gefahrlose Steuerung von Hand möglich ist und
 - im Störfall das Steuerungs- und Schutzsystem (SuS-System) den Reaktor jederzeit automatisch sicher abschaltet (international empfohlener Grenzwert: $(dq/dt)_{\text{max}} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).
- Begrenzung der Überschussreaktivität
Die Überschussreaktivität wird auf Werte $\rho_{\text{Ü}} < \beta$ begrenzt ($\rho_{\text{Ü}} \approx 0,3 \%$).

4.1. Prompte und verzögerte Neutronen

Bei der Spaltung der Brennstoffkerne im Reaktor (z.B. U-235) werden schnelle Neutronen freigesetzt. Sie entstehen entweder unmittelbar bei der Kernspaltung als **prompte Neutronen** oder werden als Besonderheit des radioaktiven Zerfalls von einigen hoch angeregten Spaltprodukten mit zeitlichem Versatz als **verzögerte Neutronen** emittiert.

Die mittlere Zeit zwischen dem Entstehen der schnellen Neutronen und der von diesen nach Abbremsung und Diffusion verursachten erneuten Kernspaltung mit der Bildung einer neuen Generation von Spaltneutronen wird als **Lebensdauer l der Neutronen** bezeichnet.

Die Lebensdauer setzt sich zusammen aus Bremszeit (von schneller zu thermischer Energie, ca. 10^{-5} s), Diffusionszeit (Eindringen in den Atomkern, ca. 10^{-4} s) und der Reaktionszeit (Kernspaltung, ca. 10^{-15} s).

Die Gesamtzeit wird folglich im wesentlichen durch die am längsten dauernde Diffusionszeit bestimmt.

Alle Neutronen, die innerhalb einer Lebensdauer entstehen, werden als eine Neutronengeneration betrachtet. Diese Neutronen werden im Reaktor verbraucht durch Leckverluste nach außen (N_{leck}) und Absorption (N_{abs}) in der Spaltzone. Letzteres führt teilweise (sofern Absorption im Brennstoff erfolgt) zu neuen Spaltungen. Zum Zeitpunkt $t + l$ ist die neue Neutronengeneration erzeugt worden (N_{erz}). Der Multiplikationsfaktor kann somit in folgender Form geschrieben werden:

$$k = \frac{N_{erz}}{N_{abs} + N_{leck}} = \frac{\text{Anzahl der Neutronen zur Zeit } t + l}{\text{Anzahl der Neutronen zur Zeit } t} \quad (1)$$

Die Zahl der je Zeiteinheit im Reaktor vorhandenen Neutronen ist somit eine Bilanz zwischen erzeugten Neutronen ($k \cdot N / l$) und verschwindenden Neutronen ($- N / l$), bzw. ist die zeitliche Änderung gegeben durch

$$\frac{dN}{dt} = k \frac{N}{l} - \frac{N}{l} = N \frac{k - 1}{l} \quad (2)$$

oder

$$\frac{dN}{N} = \frac{k - 1}{l} dt \quad (3)$$

mit der Lösung

$$N(t) = N_0 \cdot e^{\frac{k - 1}{l} \cdot t} = N_0 \cdot e^{\frac{t}{T}} \quad \text{mit } T = \frac{l}{k - 1} \quad (4)$$

wobei T als **Reaktorperiode** bezeichnet wird und die Zeit darstellt, in der sich die Neutronenzahl N (bzw. in gleicher Weise Φ , n oder P) um den Faktor $e \approx 2.71$ ändert. In der Praxis ist es häufig bequemer, statt der Änderung um den Faktor e eine Änderung um den Faktor 2 zu bestimmen, was dann als **Verdopplungszeit** T_2 bezeichnet wird. Reaktorperiode und Verdopplungszeit sind über die einfache Beziehung

$$T_2 = \ln 2 \cdot T \quad (5)$$

miteinander verbunden.

Das Zeitverhalten eines Reaktors folgt gemäß (4) also stets einer Exponentialfunktion.

Würden in einem Kernreaktor allein prompte Neutronen existieren (mit einer typischen Lebensdauer von $l \approx 10^{-4} \text{ s}$), ergäbe eine Änderung des Multiplikationsfaktors von 1 auf 1.001 in einer einzigen Sekunde einen gewaltigen Neutronen- und damit Leistungszuwachs um einen Faktor von

$$\frac{N(t + 1s)}{N(t)} = e^{\frac{1.001 - 1}{0.0001 \text{ s}} \cdot 1s} \approx 22000 \quad (6)$$

Diese Dynamik wäre praktisch nicht beherrschbar, es könnte kein Kernreaktor mit einer gesteuerten nuklearen Kettenreaktion betrieben werden.

Die Steuerung der Kettenreaktion wird erst dank der Existenz der verzögerten Neutronen möglich, deren Eigenschaften in Tab. 1 zusammengefasst sind. Verzögerte Neutronen entstehen in 6 Gruppen (aus 6 verschiedenen, hoch angeregten Mutterkernen als Besonderheit eines radioaktiven Zerfalls) mit einer Halbwertszeit $T_{1/2}$ zwischen 0.23 und 56 s. Der Gesamtanteil aller verzögerten Neutronen an den bei der Kernspaltung von U-235 insgesamt entstehenden Spaltneutronen ist nur $\beta = 0.641 \%$, der Rest von 99.359 % sind prompte Neutronen.

Gruppe i	Mutterkern	mittl. kin. Energie / keV	$T_{1/2}$ / s	$\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}$ / s ⁻¹	Anteil β_i an allen Spaltneutronen / %	relativer Anteil $a_i = \beta_i / \beta$	n pro 10 ³ Spaltungen (absolut)
1	Br-87	250	55.72	0.0124	0.021	0.033	0.52
2	J-137	560	22.72	0.0305	0.140	0.219	3.46
3	Br-89	430	6.22	0.111	0.126	0.196	3.10
4	?	620	2.30	0.301	0.253	0.395	6.24
5	?	420	0.61	1.14	0.074	0.115	1.82
6	?	-	0.23	3.01	0.027	0.042	0.66
gesamt					0.641	1.000	15.80

Tab. 1, Eigenschaften verzögerter Neutronen bei der Spaltung von U-235
/Reactor Physics Constants, ANL-5800/

Der Anteil der verzögerten Neutronen an allen Spaltneutronen lässt sich auch mittels der letzten Spalte von Tab. 1 nachvollziehen. Berücksichtigt man, dass pro Spaltung von U-235 im Mittel 2.47 neue Neutronen freigesetzt werden, ergibt sich $\beta = 15.80/1000/2.47 = 0.0064 = 0.64 \%$.

β kann je nach Anreicherung, Moderator Temperatur und insbesondere Abbrand in einem gegebenen Kernreaktor Werte zwischen 0.5 % und 0.7 % annehmen und wird dann als β_{eff} für diesen Reaktor bezeichnet.

Häufig werden zur Vereinfachung die 6 Gruppen verzögerter Neutronen zu einer einzigen Gruppe mit gemittelten Parametern zusammengefasst. Für die mittlere Lebensdauer l_{verz} der verzögerten Neutronen ergibt sich z.B. mit den Werten aus Tab. 1

$$l_{\text{verz}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} = 13.00 \text{ s} \quad (7)$$

bzw. für die gemittelte Zerfallskonstante $\lambda = 0.0769 \text{ s}^{-1}$.

Für prompte und verzögerte Neutronen gemeinsam könnte eine effektive Lebensdauer berechnet werden

$$\bar{l} = l_{\text{verz}} \cdot 0.00641 + l_{\text{prompt}} \cdot 0.99359 = 0.083 \text{ s} \quad (8)$$

Berechnet man nun damit analog (6) den Leistungszuwachs eines Reaktors innerhalb 1 s bei einer Erhöhung des Multiplikationsfaktors von 1 auf 1.001 erneut, ergibt sich jetzt

$$\frac{N(t + 1s)}{N(t)} = e^{\frac{1.001 - 1}{0.083 \text{ s}} \cdot 1s} \approx 1.01 \quad (9)$$

also eine Erhöhung um lediglich 1 %, die ohne Schwierigkeiten beherrscht werden kann.

4.2. Unterkritischer Reaktor

Der Reaktor sei zu Startbeginn neutronenleer ($n_{t=0} = 0$). Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird eine Neutronenquelle der Quellstärke S in den Reaktor eingebracht, die nach der Zeit $t = 1$ eine mittlere Neutronenquellendichte $n_0 = S \cdot 1$ im Reaktor erzeugt. Nach einer weiteren mittleren Lebensdauer l hat sich diese Quellneutronendichte gemäß (1) um den Faktor k vervielfacht, und gleichzeitig wurden durch die Neutronenquelle wieder n_0 Neutronen nachgeliefert. Damit gilt

$$n(t=1) = n_1 = S \cdot 1$$

$$n(t=2l) = n_2 = S \cdot 1 + S \cdot 1 \cdot k$$

Nach einer weiteren Lebensdauer wird n_2 um k vervielfacht, und es gilt

$$n(t=3l) = n_3 = S \cdot l + (S \cdot l + S \cdot l \cdot k) \cdot k$$

und weiterhin allgemein

$$n(t) = S \cdot l \cdot (1 + k + k^2 + k^3 + \dots)$$

Als Grenzwert der geometrischen Reihe ergibt sich für den unterkritischen Reaktor ($k < 1$)

$$n(t=\infty) = S \cdot l \frac{1}{1 - k} \quad (10)$$

Der Faktor

$$M = \frac{1}{1 - k} \quad (11)$$

wird als **unterkritischer Multiplikationsfaktor** bezeichnet.

Man erkennt folgendes:

- der unterkritische Reaktor wirkt als Neutronenverstärker (für die Neutronen der Neutronenquelle)
- im kritischen Reaktor ($k = 1$) würde die Neutronendichte nach Einbringen einer Neutronenquelle linear bis ins Unendliche ansteigen. Dann bliebe nämlich bei jeder Kernspaltung genau ein Neutron für eine erneute Kernspaltung übrig. Dadurch summieren sich alle von der Neutronenquelle ausgesandten Neutronen im Reaktor. Ihre Anzahl steigt also linear an. Dieser Quelleffekt ist jedoch nur bei kleinen Leistungen wahrnehmbar, da die aus der Quelle nachgelieferten Neutronen schon bei einer Leistung von 1 Watt nur einen Bruchteil des Neutroneninhaltes des Reaktors ausmachen.

Das **Zeitverhalten der Neutronendichte** im unterkritischen Bereich mit Neutronenquelle wird beschrieben durch

$$n(t) = \frac{S \cdot l}{1 - k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(1 - k)}{l} t} \right) \quad (12)$$

Wegen des negativen Exponenten nähert sich nach hinreichend langer Zeit die Neutronendichte im Reaktor asymptotisch dem Wert

$$n_\infty = \frac{S \cdot l}{1 - k} = \frac{S \cdot l^*}{-\rho} \quad (13)$$

mit $l^* = l/k$ und $\rho = (k - 1)/k$. Der Vergleich mit (11) zeigt, dass dann die Neutronen der Quelle mit dem unterkritischen Multiplikationsfaktor verstärkt worden sind. Je mehr sich k dem Wert

1 annähert, um so mehr wächst die unterkritische Verstärkung an. Andererseits werden gemäß (12) immer größere Zeiten benötigt, bis sich der asymptotische Grenzwert näherungsweise eingestellt hat (Abb. 1).

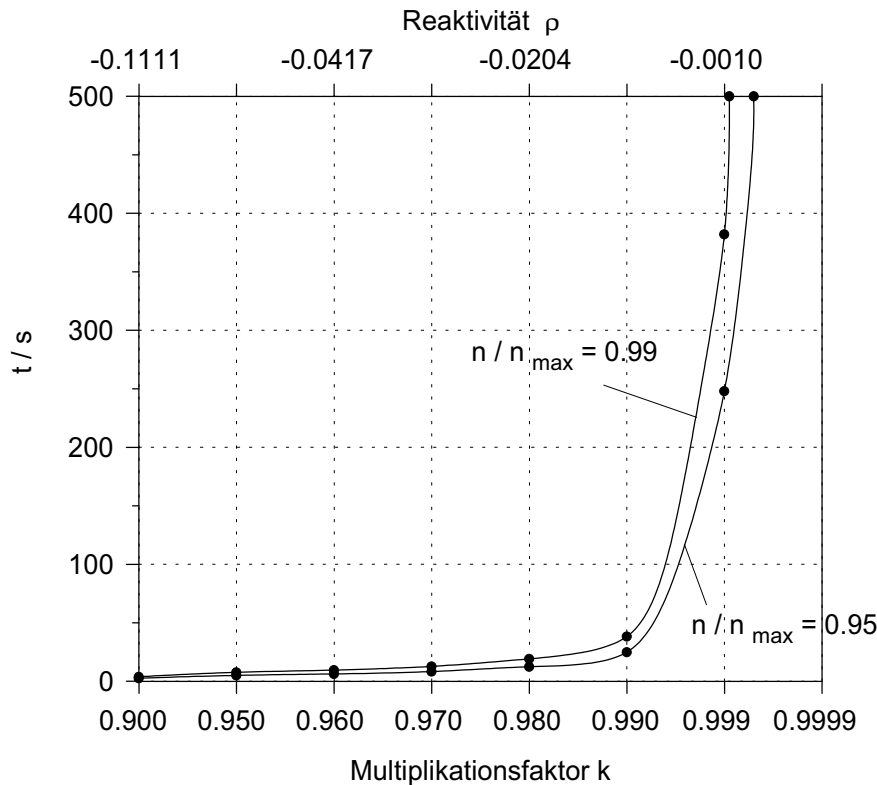


Abb. 1, Einstellzeiten für das näherungsweise Erreichen des asymptotischen Grenzwertes n_{∞} in Abhängigkeit vom Multiplikationsfaktor k und der Reaktivität ρ

4.3. Überkritischer Reaktor

Ist β der Anteil der je Kernspaltung entstehenden verzögerten Neutronen, so werden nach einer Neutronenlebensdauer im Reaktor an prompten Neutronen erzeugt:

$$n_{prompt} = k \cdot n - \beta \cdot k \cdot n = n \cdot k (1 - \beta) \quad (14)$$

Für die Änderung ihrer Dichte gilt

$$\frac{dn_{prompt}}{dt} = \frac{n \cdot k (1 - \beta) - n}{l} = \frac{n}{l} [k \cdot (1 - \beta) - 1] \quad (15)$$

Gleichzeitig entstehen verzögerte Neutronen n_{verz} durch radioaktiven Zerfall von Mutterkernen, die bei vorangegangenen Kernspaltungen erzeugt wurden. Ihre Anzahl berechnet sich mit Hilfe des radioaktiven Zerfallsgesetzes (bei Berücksichtigung aller 6 Gruppen verzögerter Neutronen):

$$\frac{dn_{verz}}{dt} = \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i \quad (16)$$

Damit beträgt die Änderung der Neutronendichte während einer Lebensdauer insgesamt

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn_{prompt}}{dt} + \frac{dn_{verz}}{dt} + S = \frac{n}{l} [k \cdot (1 - \beta) - 1] + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S \quad (17)$$

Setzt man noch $l^* = l / k$ und $\rho = (k - 1) / k$ ein, entstehen daraus die **reaktorkinetischen Gleichungen**

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{l^*} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{l^*} \cdot n - \lambda_i \cdot C_i \quad (i = 1, \dots, 6) \end{aligned} \quad (18)$$

$n \cdot \beta_i / l^*$ ist dabei die Anzahl der entstehenden, $\lambda_i \cdot C_i$ die Anzahl der unter Aussendung eines Neutrons zerfallenden Mutterkerne der i -ten Gruppe. Damit ist ein System von sieben Differentialgleichungen entstanden. Um zu einer relativ einfachen Lösung zu gelangen, werden nun häufig die 6 Gruppen verzögerter Neutronen zu einer einzigen Gruppe mit den folgenden Mittelwerten zusammengefasst (vgl. Abschn. 4.1.)

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} \quad (19)$$

Damit reduziert sich das Gleichungssystem auf 2 gekoppelte Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{l^*} \cdot n + \lambda \cdot C + S \\ \frac{dC}{dt} &= \frac{\beta}{l^*} \cdot n - \lambda \cdot C \end{aligned} \quad (20)$$

Für eine sprungförmige Reaktivitätsänderung ($\rho = 0$ für $t < 0$ und $\rho = \text{const}$ für $t \geq 0$) erhält man (wenn man zusätzlich die Quellneutronen S vernachlässigt)

$$n(t) = n_0 \left[\frac{\beta}{\beta - \rho} e^{\frac{\lambda \cdot \rho}{\beta - \rho} \cdot t} - \frac{\rho}{\beta - \rho} e^{-\frac{\beta - \rho}{l^*} \cdot t} \right] \quad (21)$$

Anhand dieser Gleichung lassen sich zwei bedeutsame Reaktorzustände diskutieren:

4.3.1. Verzögert überkritischer Reaktor ($\rho < \beta$)

In diesem Fall wird der Exponent des 2. Terms negativ und wegen $l^* \approx 10^{-4}$ s betragsmäßig groß, so dass der Term innerhalb weniger Sekunden gegen Null abklingt. Damit vereinfacht sich Gleichung (21) zu

$$n(t) = n_0 \frac{\beta}{\beta - \rho} e^{\frac{\lambda \cdot \rho}{\beta - \rho} \cdot t} \quad (22)$$

Nach einer plötzlichen Reaktivitätszugabe erfolgt also unmittelbar ein steiler Anstieg der Neutronendichte, der als **prompter Sprung** bezeichnet wird, weil ihn die prompten Neutronen verursachen. Seine Größe berechnet sich aus

$$\frac{\Delta n_{prompt}}{n_0} = \frac{\beta}{\beta - \rho} - 1 = \frac{\rho}{\beta - \rho} \quad (23)$$

Der Reaktor ist jedoch für die prompten Neutronen allein unterkritisch (wegen $\rho < \beta$), so dass seine Neutronendichte erst durch das Hinzukommen der verzögerten Neutronen weiter ansteigt, und zwar dann mit der stabilen Reaktorperiode T_s (Abb. 2). Die Größe der **stabilen Reaktorperiode** lässt sich aus (22) ableiten als

$$T_s = \frac{\beta - \rho}{\lambda \cdot \rho} \quad (24)$$

Diese unter der Annahme nur einer Gruppe verzögerter Neutronen abgeleitete stabile Reaktorperiode beschreibt den Anstieg der Neutronendichte recht gut für kleine Reaktivitäten ($\rho < 0.001$).

4.3.2. Prompt überkritischer Reaktor ($\rho > \beta$)

In diesem Fall wird der zweite Term in Gleichung (21) ebenso wie dessen Exponent positiv, so dass die Neutronendichte mit sehr großer Geschwindigkeit ansteigt. Der Reaktor wird allein mit den prompten Neutronen überkritisch, die Reaktorperiode würde im Millisekundenbereich liegen. Damit steigt die Reaktorleistung so schnell, dass die Steuerstäbe nicht mehr vernünftig zur Regelung benutzt werden könnten. Das wäre der Störfall einer unkontrollierten Leistungsexkursion, der folglich durch Einhaltung der Bedingung $\rho < \beta$ nie eintreten darf.

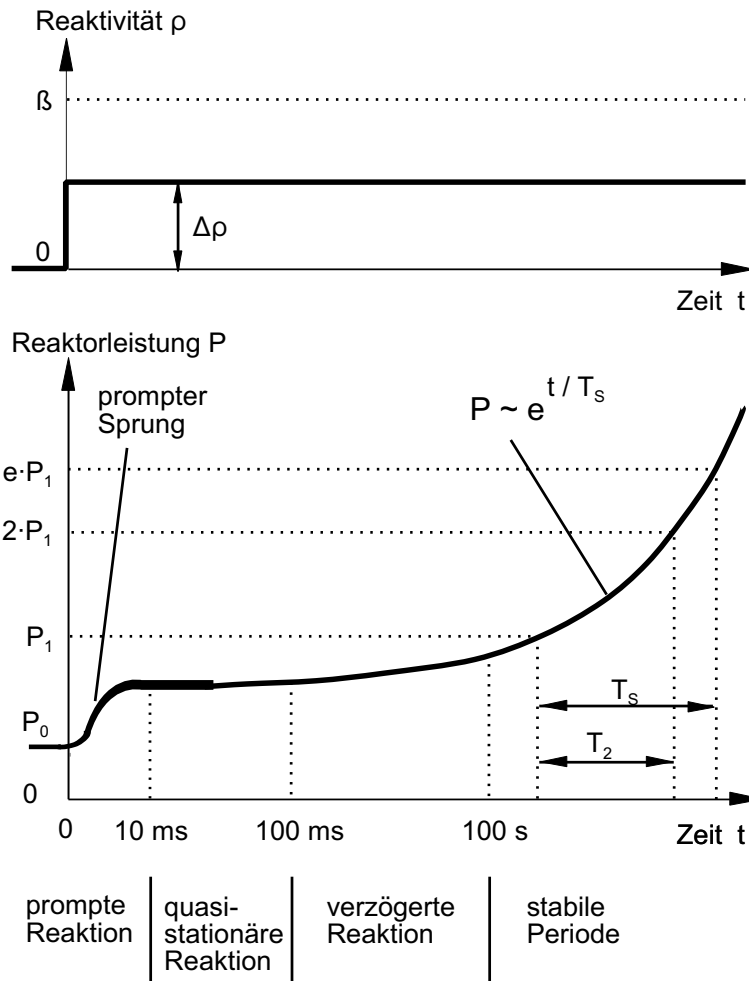






Abb. 2, Zeitverhalten eines Reaktors nach einem positiven Reaktivitätssprung ($0 < \rho < \beta$)

Reaktor-zustand	Leistung	Multiplikations-faktor k	Reaktivität	
			$\rho = (k - 1) / k$	$\rho' = \rho / \beta [\$]$
unterkritisch		< 1	< 0	< 0
kritisch		$= 1$	$= 0$	$= 0$
(verzögert) überkritisch		$1 < k < 1 + \beta$	$0 < \rho < \beta$	$0 < \rho' < 1 \$$
prompt überkritisch		$k \geq 1 + \beta$	$\rho \geq \beta$	$\rho' \geq 1 \$$

Tab. 2, Zusammenfassung der möglichen Reaktorzustände und zugehörigen Parameter

Tab. 2 gibt eine Zusammenfassung möglicher Reaktorzustände, entsprechender Leistungsverläufe und Werte für Multiplikationsfaktor und Reaktivität. Um den sicherheitstechnisch so wichtigen Übergang vom gesteuerten zum nicht mehr steuerbaren Kernreaktor (d.h. vom verzögert überkritischen zum prompt überkritischen Reaktor) besser zu kennzeichnen, wird eine Reaktivität $\rho' = \rho / \beta$ eingeführt, die auf den Anteil β der verzögerten Neutronen bezogen ist. Da sowohl ρ als auch ρ' keine physikalische Maßeinheit haben, wird der Reaktivität ρ' zur Unterscheidung willkürlich die Maßeinheit \$ (Dollar, 1 \$ = 100 ¢) zugeordnet. Der Übergang zum prompt überkritischen Reaktor findet nun bei einem Reaktivitätswert von $\rho' = 1$ \$ statt.

4.4. Einfluss der Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit

Durch Differentiation von (13) erhält man die Neutronendichteänderung im unterkritischen Bereich in Abhängigkeit von der Reaktivitätsänderungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{S \cdot l^*}{\rho^2} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (25)$$

Unter Verwendung der allgemeinen Definition der Reaktorperiode

$$T = \frac{n}{(dn/dt)} = \frac{P}{(dP/dt)} \quad (26)$$

ergibt sich damit die für den unterkritischen Bereich gültige Reaktorperiode zu

$$T = \frac{-\rho}{(d\rho/dt)} \quad (\rho < 0) \quad (27)$$

Bei unendlich langsamer Annäherung der Reaktivität entsprechend $\lim(d\rho/dt) \Rightarrow 0$ wird der Leistungspegel des unterkritischen Reaktors zu jedem Zeitpunkt durch die unterkritische Verstärkungsformel (13) wiedergegeben. Der kritische Zustand würde erst nach unendlich langer Zeit erreicht (Abb. 3).

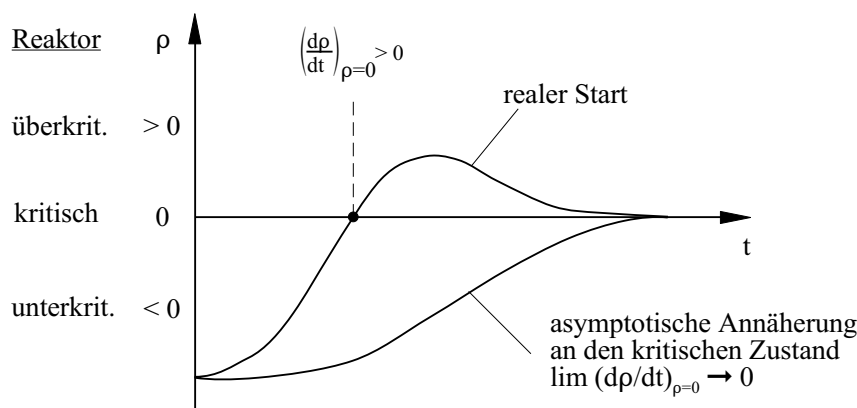


Abb. 3, Veränderung der Reaktivität bei einem unendlich langsamen und bei einem realen Reaktorstart

Die Reaktorleistung wäre dann bereits unendlich groß geworden. Für endliche, positive Werte von $d\rho/dt$ wird der Reaktor dagegen bei umso niedrigeren Leistungen kritisch, je schneller die Reaktivität ansteigt.

Im stark unterkritischen Bereich hat die Geschwindigkeit der Reaktivitätsänderung keinen merklichen Einfluss auf die Neutronendichteänderung. Die Periode verringert sich im gleichen Maße wie die im Reaktor verbleibende negative Reaktivität, wenn die positive Reaktivität mit konstanter Geschwindigkeit $d\rho/dt = \text{konst.}$ in den Reaktor eingebracht wird.

Je mehr sich der Reaktor dem kritischen Zustand nähert, desto stärker hängen Neutronendichte bzw. Leistung und Periode von der Geschwindigkeit der Reaktivitätsänderung ab.

Das Anfahren eines Reaktors würde sehr zeitaufwendig, wenn man den Reaktor so in den kritischen Zustand bringen will, dass nach jeder Reaktivitätserhöhung das Erreichen des asymptotischen Grenzwertes n_∞ abgewartet wird. In der Praxis wird der Reaktor beim Wiederholungsstart meist über den kritischen Zustand hinweg in den überkritischen Bereich gefahren und anschließend der kritische Zustand eingestellt (vgl. Abb. 3).

Bei Annäherung an die gewünschte Leistung wird die positive Reaktivität mit der dem jeweiligen Abstand vom vorgegebenen Leistungspegel entsprechenden Geschwindigkeit verringert. Der Reaktor ist für die bestimmte Leistung kritisch ($k = 1$), wenn die stabile Periode unendlich geworden ist ($T_s = \infty$).

5. Versuchsdurchführung

5.1. Aufbau und Funktionsweise des AKR

Der AKR ist ein homogener thermischer Nullleistungsreaktor. Der Aufbau und die Wirkungsweise sind ausführlich in /2/ beschrieben. Ein einfaches Funktionsschema zeigt Abb. 4. Die zylindrische Spaltzone (Durchmesser 250 mm, Höhe 275 mm) besteht aus Sicherheitsgründen aus zwei Hälften. Sie wurde bei der Erstbeladung durch ein kritisches Experiment schrittweise aus einzelnen plattenförmigen Brennelementen unterschiedlicher Dicke aufgebaut.

Die Brennelemente bestehen aus einer homogenen Mischung des Kernbrennstoffs (Uranoxid, 19,8 % angereichert) und des Moderators (Polyäthylen). Die kritische Masse beträgt ca. 790 g U-235. Die Spaltzone ist allseitig von einem ca. 30 cm dicken Graphitreflektor umgeben.

Jede Spaltzonenhälfte ist hermetisch in einen Aluminiumbehälter eingeschlossen. Ein weiterer gasdichter Tank (Reaktortank) umschließt die gesamte Spaltzone und Teile des Reflektors. Der Druck im Reaktortank ist gegenüber der Umgebung abgesenkt. Diese Unterdruckbarriere verhindert ein unkontrolliertes Austreten radioaktiver Spaltprodukte.

Im abgeschalteten Zustand des Reaktors ist die untere Spaltzonenhälfte um ca. 50 mm abgesenkt. Sie wird durch das Kernhubwerk über einen Stempel nach oben bewegt. Vorher wird im Inneren dieses Stempels eine Anfahrneutronenquelle ($^{241}\text{Am-Be}$, Ausbeute $2,2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$) bis zur Unterseite der Spaltzone gefahren.

Drei Steuerstäbe aus Cadmium dienen sowohl zur Steuerung als auch zur Sicherheitsabschaltung. Die Positionen von Quelle, unterer Spaltzonenhälfte und der drei Steuerstäbe werden digital und analog angezeigt.

Drei Neutronendetektoren verschiedener Typen und Empfindlichkeit dienen der Messung der Neutronenflussdichte im Reaktor und damit der Überwachung des Betriebszustandes. Sie geben

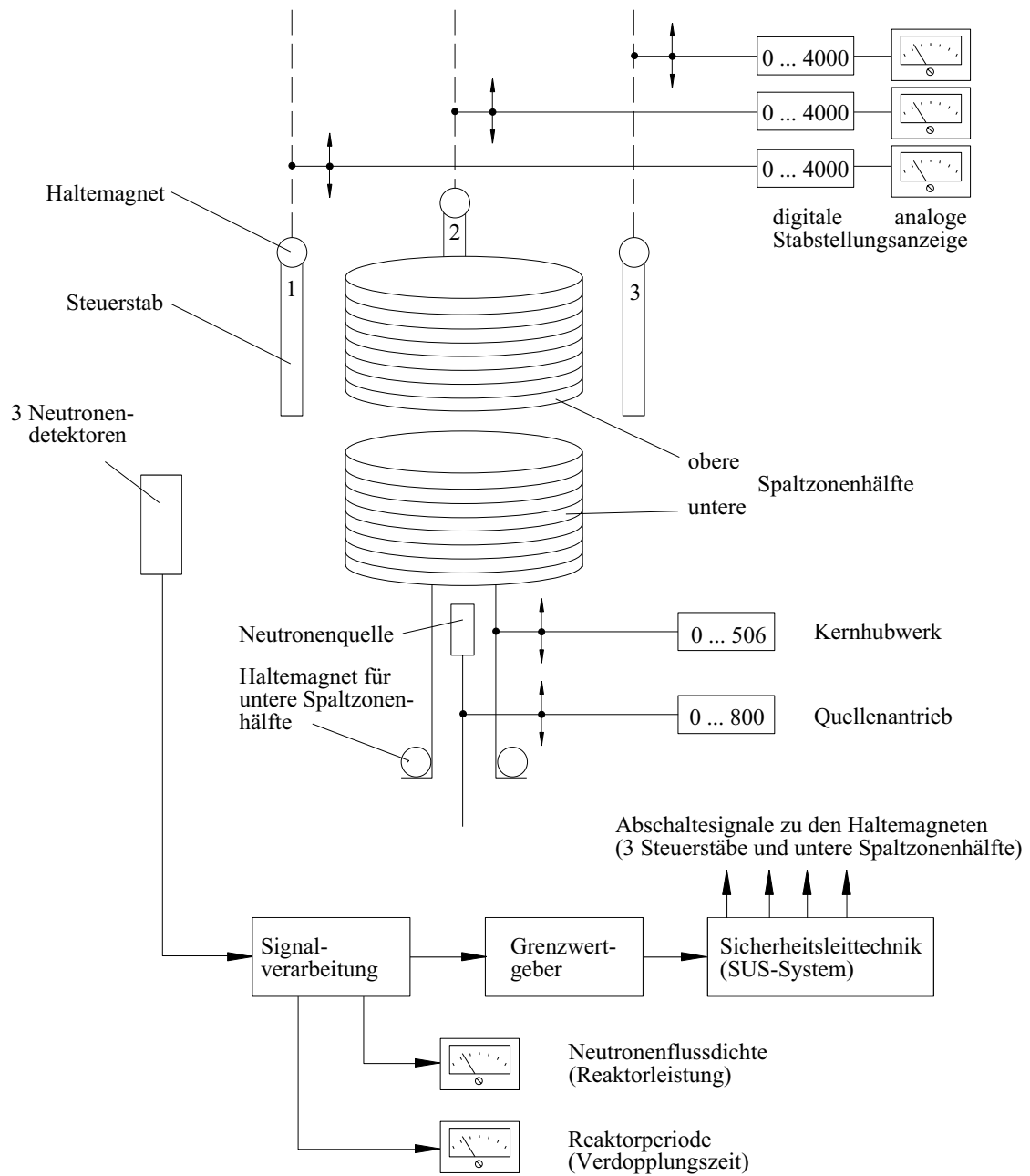


Abb. 4, Funktionsschema des AKR

zur Neutronenflussdichte proportionale elektrische Signale (Impulsdichten, Ströme) ab, aus denen in den Messkanälen die Betriebsgrößen Reaktorleistung und Reaktorperiode abgeleitet werden. Diese Signale werden mit Grenzwertgebern überwacht. Beim Überschreiten festgelegter Schwellen erzeugt das Steuerungs- und Schutzsystem (SuS-System) Abschaltensignale, die auf die Haltemagnete der Steuerstäbe und der unteren Spaltzonenhälfte wirken. Diese werden dadurch stromlos und werfen die Steuereinheiten ab, wodurch die Kettenreaktion abgebrochen, d.h. der Reaktor abgeschaltet wird.

5.2. Wiederholungsstart

Es muss verhindert werden, dass bei unsachgemäßem Anfahren eines Reaktors Störungen oder unzulässige Betriebszustände auftreten. Deshalb ist die Instrumentierung so ausgelegt, dass die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen automatisch eingehalten werden und Fehlbedienungen unwirksam bleiben oder zur Abschaltung führen. Dabei gewährleistet der Verriegelungskreis (VK) die Sicherheit während des Anlassens. Der Anlassvorgang kann nur bei Erfüllung bestimmter Anfangsbedingungen und durch konsequente Abarbeitung einer feststehenden Reihenfolge von Operationen vor sich gehen.

Das Anlassschema ist in Abb. 5 dargestellt.

Die Abarbeitung und Erfüllung der einzelnen Schritte wird auf Leuchttabelleaus am Steuerpult angezeigt. Aus dem Zeitverhalten von Leistung und Periode (bzw. Verdopplungszeit) ist der Betriebszustand des Reaktors erkennbar. Warn- und Havariesignale informieren den Operator optisch und akustisch über unzulässige Betriebskennwerte. Das SuS-System überwacht die Einhaltung sicherer Betriebskennwerte bereits während des Anlassvorganges und schaltet den AKR bei folgenden Bedingungen automatisch ab:

- Fehler im Verriegelungskreis
- Neutronenflussdichte in 2 von 3 Messkanälen $> 120\%$ des gewählten Messbereiches
- Verdopplungszeit der Reaktorleistung < 10 s in 1 von 2 Messkanälen.

Vor jeder Inbetriebnahme des Reaktors müssen stets alle für den sicheren Betrieb wesentlichen elektronischen und mechanischen Einrichtungen auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden.

Der Ablauf der Funktionskontrolle und des Anlassvorganges ist fest vorgegeben (siehe /2/). Die Ergebnisse müssen im Betriebsjournal dokumentiert werden.

Dementsprechend ist der Versuch in folgender Reihenfolge durchzuführen:

1. Information über den vorzunehmenden Reaktorstart durch Einsichtnahme in die dazu vorliegende Betriebsanweisung (BA) und die Eintragungen im Betriebsjournal über die letzte Inbetriebnahme, speziell über die kritischen Steuerstabstellungen.
2. Durchführung der Funktionskontrolle gemäß Prüfvorschrift. Der Reaktor darf nur bei voller Funktionstüchtigkeit der Anlagenkomponenten angelassen werden!
3. Inbetriebnahme gemäß Anlaßschema

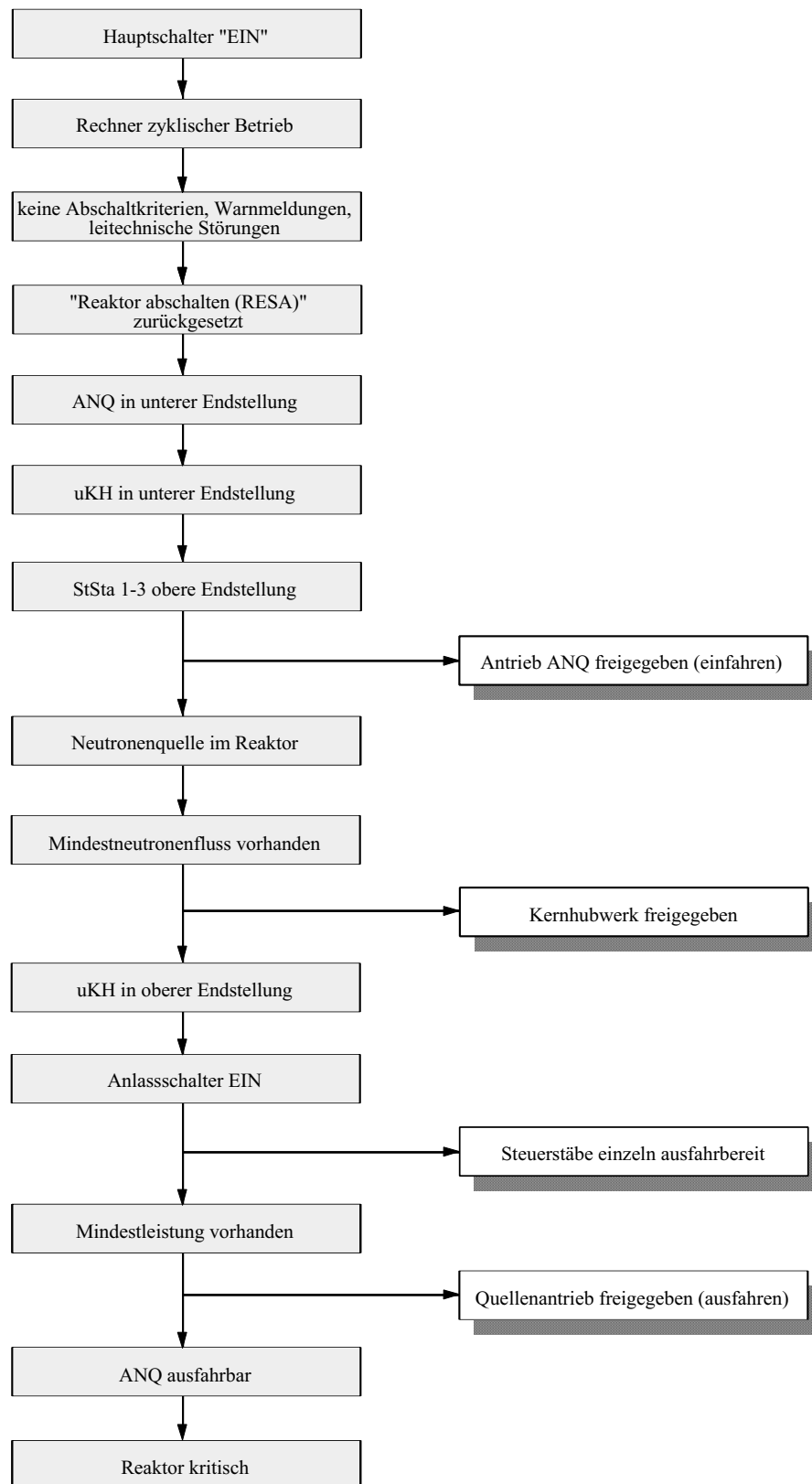


Abb. 5, Anlassschema des AKR

Hinweise:

- Die Anfahrneutronenquelle kann bei einer Leistung ≥ 0.25 Watt ausgefahren werden.
- Hat die Leistung ca. 80 % des gewünschten Wertes erreicht, so wird die Überkritizität durch Einfahren der Steuerstäbe vermindert, bis die vorgegebene Leistung mit einer Periode $T_S \approx \infty$ eingestellt ist.

5.3. Leistungsänderung

Unter Leistungsänderung versteht man eine beabsichtigte Erhöhung oder Senkung der Leistung.

Leistungserhöhung:

Die Erhöhung der Leistung wird durch Herausfahren eines oder mehrerer Steuerstäbe erreicht. Die Stäbe dürfen nur einzeln schrittweise und nacheinander herausgezogen werden.

Zur Ermittlung der erforderlichen Positionsänderung kann die Reaktivitätscharakteristik der Stäbe benutzt werden. Die Reaktorverdopplungszeit soll den Wert von 30 s nicht unterschreiten.

Liegen die Steuerstabenlinien nicht vor, so werden die Steuerstäbe nach der Anzeige des Verdopplungszeitmessers gefahren, d.h. noch vor Erreichen der 30-Sekunden-Marke ist das Herausfahren der Steuerstäbe zu stoppen.

Leistungsabsenkung:

Eine Senkung der Leistung wird durch das Einfahren der Steuerstäbe in den Spaltzonenbereich erreicht. Dabei ist der Betrag der negativen Periode sicherheitstechnisch ohne Bedeutung. Es können alle drei Stäbe gleichzeitig eingefahren werden.

5.4. Bestimmung des Betriebszustandes

Das Anheben der unteren Spaltzonenhälfte und die Positionsänderungen der Steuerstäbe lassen sich in ihrer Wirkung auf den Reaktor durch eine gemeinsame Größe ausdrücken, sie beeinflussen die **Reaktivität** in definierter Weise. Damit kann die Reaktivität als pauschale zeitabhängige Steuergröße $\rho = \rho(t)$ betrachtet werden.

Am AKR gibt es kein Messgerät für die Reaktivität. Der Operator muss den Betriebszustand des Reaktors aus dem Zeitverhalten der Messgrößen "Reaktorleistung" und "Periode" (bzw. "Verdopplungszeit") ableiten.

Das typische Verhalten der Reaktorleistung und der Periode während des Anlassvorganges, bei einer Leistungsänderung und bei der Abschaltung ist in Abb. 6 dargestellt.

Bei konstanter Reaktorleistung ist die Periode (bzw. die angezeigte Verdopplungszeit) unendlich. Eine Leistungserhöhung bzw. eine Leistungsabsenkung führt zu einer positiven bzw. negativen Periode. Nach einer Reaktivitätsänderung dauert es ca. 1 Minute, bis sich die stabile Periode eingestellt hat (Einstellung des Gleichgewichts der Entstehung prompter und verzögerter Neutronen). Bei sehr kleiner Reaktorleistung kann das Periodensignal etwas unruhig sein, da sich die statistischen Schwankungen der Neutronendichte stärker bemerkbar machen als bei größeren Leistungen.

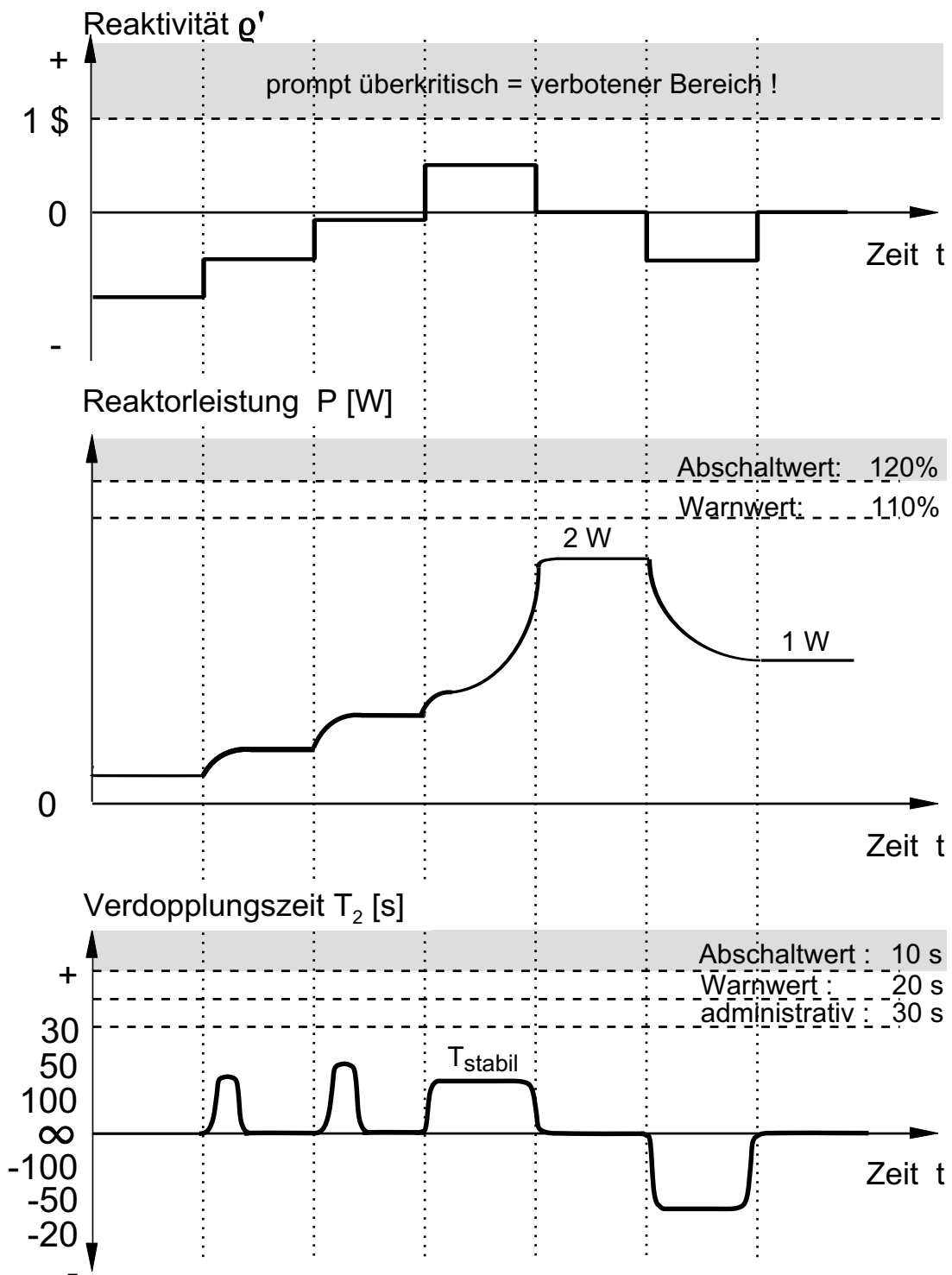


Abb. 6, Reaktorleistung P und Reaktorperiode (bzw. Verdopplungszeit) in Abhängigkeit von der Reaktivität ρ als Funktion der Zeit

6. Hinweise zum Versuchsprotokoll

- Kurzbeschreibung des Versuches
- Duplikat des Prüfprotokolls für die Funktionsprüfung
- Protokoll des Anlassvorganges
- Kritische Stabstellung als Funktion der Leistung
 - abgelesene Werte mit Angabe der Messunsicherheiten
 - Auswertung der Messergebnisse und Diskussion
- Bestimmung der Gamma-Dosisleistung als Funktion der Reaktorleistung
 - Anlagengrundriss mit eingezeichneten Messpunkten
 - Graphische Darstellung der Messwerte mit Fehlerangabe
 - Auswertung der Messergebnisse mit Diskussion

7. Erklärung verwendeter Formelzeichen

n Neutronendichte (proportional zu Neutronenflussdichte Φ , Zahl der Neutronen N, Reaktorleistung P)

k Multiplikationsfaktor

ρ Reaktivität $\rho = (k - 1) / k$

β Gesamtanteil der verzögerten Neutronen für U-235: $\beta = 0.641 \%$

l Neutronen-Generationsdauer $l^* = l / k$

λ mittlere Zerfallskonstante der Mutterkerne verzögerter Neutronen

C Konzentration der Mutterkerne verzögerter Neutronen

T Reaktorperiode, d.h. Zeitdauer, in der sich die Neutronenflussdichte bzw. die Reaktorleistung um den Faktor $e \approx 2.71$ ändert.

8. Kontrollfragen

1. Welche Hauptbestandteile sind für den Aufbau und Betrieb eines thermischen Reaktors notwendig und wie funktionieren sie?
2. Was ist ein Nullleistungsreaktor?
3. Welcher Parameter beschreibt den Reaktor hinsichtlich der Kritikalität und welcher sein Übergangsverhalten?
4. Welche Bedeutung hat die Neutronenquelle für das Betreiben eines Reaktors?

5. Welche neutronenphysikalische Erscheinung erlaubt die gefahrlose Steuerung eines Reaktors ?
Beweisen Sie das durch den entsprechenden Formalismus!
6. Welche Einrichtungen garantieren den sicheren Reaktorbetrieb und wie funktionieren sie ?
7. Warum soll ein Reaktor einen negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktivität besitzen ?
8. Was muss ein Reaktoroperator beim Start eines Reaktors beachten und wie muss er vorgehen ?
9. Was hat der Reaktoroperator bei einem sicherheitstechnisch relevanten Ereignis (außergewöhnlichen Ereignis) zu tun?

Literatur

- /1/ Glasstone, S., Edlund, M.C., The Elements of Nuclear Reactor Theory, New York 1952
- /2/ Beschreibung des Aufbaus, der Funktionskontrolle und der Betriebsprotokollierung der Reaktoranlage AKR-2, TU Dresden, Institut für Energietechnik
- /3/ Ackermann, G. (ed.), Betrieb und Instandhaltung von Kernkraftwerken, Leipzig 1982