



KfK 2867
November 1979

Untersuchungen zum Gaseintrag an KNK II

P. Hoppé, H. Massier, F. Mitzel, W. Väth
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Projekt Schneller Brüter

KFK 2867

Untersuchungen zum Gaseintrag an KNK II

P. Hoppé

H. Massier

F. Mitzel

W. Väth

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Kurzfassung

Bei der Inbetriebnahme von KNK II traten Betriebsschwierigkeiten auf, welche durch Gaseintrag ins Kühlmittel bedingt waren. Dieser Gaseintrag führte zu negativen Reaktivitätsschwankungen und damit verbunden zu wiederholten Reaktorschnellabschaltungen. Nachdem durch erste Untersuchungen eine wesentliche Ursache des Gaseintrags und die Anwesenheit von Gasspeichern festgestellt werden konnte, wurde eine technische Änderung (Einbau eines Drosselventils) an der Anlage zur Abhilfe vorgenommen.

In diesem Bericht werden Untersuchungen beschrieben, welche nach dieser technischen Änderung durchgeführt wurden. Das Hauptziel war dabei, die Wirksamkeit dieser Änderung festzustellen und folgende zunächst noch offene Probleme zu untersuchen: Lokalisierung des Gasspeichers, Nachweis und Abschätzung eines kontinuierlichen Gaseintrages sowie die Analyse von positiven Leistungsüberschwingern, welche in Zusammenhang mit den Blasen beobachtet wurden.

Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Durch die bisher getroffenen technischen Maßnahmen (Einbau eines Drosselventils) konnte der Gaseintrag zwar erheblich reduziert, jedoch noch nicht vollkommen unterbunden werden.
2. Der Ort des oder der Gasspeicher(s) läßt sich aufgrund dieser Untersuchungen mit großer Wahrscheinlichkeit auf den Bereich zwischen der Blendenverstelleinrichtung und dem Brennelementfuß im Primärkreislauf eingrenzen.
3. Ein kontinuierlicher Gastransport durch den Kern konnte auch bei Betriebsbedingungen, bei denen keine Schnellabschaltungen durch Gas erfolgen (40% Reaktorleistung), festgestellt werden. Der volumenbezogene Gasanteil im Kühlmittel wurde auf mindestens 10^{-4} abgeschätzt.
4. Die Beobachtungen von scheinbaren positiven Reaktivitätsüberschwingern beruhen auf der Verwendung einer inkorrekten Reaktivitätsleistungsübertragungsfunktion zur Reaktivitätsberechnung. Die Verwendung der gemessenen Reaktivitätsleistungsübertragungsfunktion führt zu der Schlußfolgerung, daß beim Blasendurchgang tatsächlich nur negative Reaktivitätsschwankungen auftreten.

Investigations Concerning Gas Entrainment at KNK II

Summary

During commissioning of KNK II operational difficulties were encountered due to gas entrainment in the coolant. This gas entrainment caused negative reactivity fluctuations which tripped the reactor repeatedly. Since first investigations indicated one main cause of the gas entrainment and the existence of an accumulation process a technical modification (installation of a throttle valve) for remedy was performed. This report describes the investigations being made after the plant modification. The main objective was to test the effectiveness of the modification and to look into the following problems which were still open: Localization of the gas storage, detection and estimation of a permanent gas entrainment and the analysis of positive power overshoots being observed in connection with the gas bubbles.

The following results have been obtained:

1. By means of the throttle valve the gas entrainment could be considerably reduced but not completely eliminated.
2. According to these investigations the gas storages can be localized with high probability to a region in the primary coolant circuit between a special throttle device and the lower part of the fuel elements.
3. A permanent gas entrainment could be detected even at operational plant conditions (40% reactor power) at which no scrams due to entrained gas bubbles have been encountered. The volume fraction referred to the coolant volume in the core was estimated to be at least 10^{-4} .
4. The observation of apparently positive reactivity overshoots is due to the application of an erroneous reactivity to power transfer function for the reactivity calculation. From the use of the measured reactivity to power transfer function it can be concluded that only negative reactivity fluctuations are induced by gas bubbles passing the core.

INHALT

1. Überprüfung der Wirksamkeit der eingebauten Drosselarmaturen durch Vergleich der Ergebnisse aus Nulleistungs- und Leistungsbetrieb
2. Lokalisierung der Gasspeicher
3. Nachweis und Abschätzung einer kontinuierlich durch den Kern transportierten Gasmenge
 - 3.1 Theoretische Grundlagen
 - 3.2 Bestimmung des volumenbezogenen Gasanteils g
4. Erklärung der positiven Leistungs- bzw. Reaktivitätsüberschwinger

Nomenklatur

Referenzen

Abbildungen

Untersuchungen zum Gaseintrag an KNK II

Beim Betrieb des KNK II - Reaktors mit ca. 60 bis 80% seiner Nennleistung führte mit dem Kühlmittel in den Kern des Reaktors eingetragenes Schutzgas zu wiederholten Schnellabschaltungen durch die Reaktimeter. Durch erste Untersuchungen bei Nulleistung /1,2/ konnte eine wesentliche Ursache des Gaseintrages (die "Entgasungsleitung") ermittelt werden; weiterhin wurde die Existenz von Gasspeichern festgestellt. Das Aufladen dieser Gasspeicher und deren plötzliche Entleerung bewirkte über den im gesamten Kern negativen Voidkoeffizienten der KNK eine schnelle Absenkung der Reaktivität und damit auch die Schnellabschaltung über die Reaktimeter. Nach dem Einbau von Drosselarmaturen in die Entgasungsleitung konnte die Anlage über mehrere Wochen bei 80 bis 95% der Nennleistung betrieben werden, so daß die Untersuchungen zum Gaseintrag mit den folgenden speziellen Zielsetzungen fortgesetzt werden konnten:

1. Überprüfung der Wirksamkeit der eingebauten Drosselarmaturen durch Vergleich der Ergebnisse aus Nulleistungs- und Leistungsbetrieb
2. Lokalisierung des Gasspeichers bzw. der Gasspeicher
3. Abschätzung des kontinuierlichen Gaseintrages
4. Erklärung der positiven Leistungs- bzw. Reaktivitätsüberschwinger

Im folgenden wird für jeden einzelnen Punkt getrennt dessen spezielle Problematik erläutert. Weiterhin werden jeweils die durchgeführten Arbeiten beschrieben, die Ergebnisse dargestellt und die darauf beruhenden Folgerungen gezogen.

1. Überprüfung der Wirksamkeit der eingebauten Drosselarmaturen durch Vergleich der Ergebnisse aus Nulleistungs- und Leistungsbetrieb
-

Durch die verschiedenen Messungen bei Nulleistung (Aug. 78) /1,2/ war festgestellt worden, daß ein kontinuierlicher Gaseintrag für das Aufladen von Gasspeichern verantwortlich ist, deren Ort und Anzahl nicht bekannt war. Dieser kontinuierliche Gaseintrag wird wesentlich beeinflusst vom Natriumdurchsatz durch die Entgasungsleitung. Nach dem Einbau von Drosselarmaturen

in diese Leitung sollte deren Durchsatz auf solche Werte reduziert werden können, bei denen nach Modellversuchen /2/ kein Gaseintrag und somit auch keine Reaktivitätsstörungen mehr über diesen Mechanismus zu erwarten waren. Nach der Wiederinbetriebnahme des Reaktors (Febr. 79) erfolgten jedoch wiederum nach kurzer Betriebszeit 2 Schnellabschaltungen, deren zeitlicher Verlauf sich von den früheren (vor dem Umbau) nicht wesentlich unterschied (Abb.1) und die deshalb ebenfalls dem Entladen der Gasspeicher zuzuschreiben sind. Bereits diese Abschaltungen zeigten deutlich, daß das Gasproblem weiterhin existent ist. Aufgrund der Erfahrungen aus den Nullleistungsexperimenten, daß mit größer werdendem Kühlmitteldurchsatz zwar auch die Häufigkeit der Einbrüche zunimmt, deren max. Amplituden hingegen abnehmen, wurde versucht, größere Reaktorleistungen bzw. Kühlmitteldurchsätze anzufahren. Diese Maßnahme erwies sich als erfolgreich, da der Reaktor über mehrere Wochen bei 80% bzw. 95% der Nennleistung betrieben werden konnte. Innerhalb dieses Betriebszeitraumes traten eine Vielzahl von Reaktivitätseinbrüchen bis zu max. - 6,5 ϵ auf, die gemeinsam mit einer Vielzahl weiterer Signale auf Magnetband aufgezeichnet bzw. on-line gemessen werden konnten. Der Vergleich dieser Reaktivitätseinbrüche mit denen aus den Nulleistungsexperimenten zur Beurteilung der Wirksamkeit der Umbaumaßnahmen ist jedoch nur von bedingter Aussagekraft, da der mögliche Einfluß der Natriumtemperatur ($\approx 200^{\circ}\text{C}$ bei Nulleistung, $\approx 360^{\circ}\text{C}$ bis $\approx 580^{\circ}\text{C}$ bei Leistung) nicht näher untersucht werden konnte.

In Abb.2 wird die Häufigkeitsverteilung der bei einem Reaktivitätseinbruch maximal auftretenden Amplituden aus Nulleistungs- und Leistungsmessungen verglichen. Es wird deutlich, daß diese sich nicht wesentlich unterscheiden und die häufigsten Werte bei etwa -2,8 ϵ liegen. Da die Spitzenwerte des inhärenten Reaktivitätsrauschens ebenfalls Werte von - 1,5 ϵ bis - 2 ϵ erreichen können, erwies sich die Erfassung bzw. die Berücksichtigung von kleinen Reaktivitätseinbrüchen als problematisch. Die in Abb.2 ausgewerteten 59 Einbrüche bei 95% Leistung, 95% Kühlmitteldurchsatz und dem auf ca. 2 m³/h gedrosselten Durchsatz in der Entgasungsleitung wurden in 210 h beobachtet. Die 132 Einbrüche bei Nulleistung, jedoch 100% Kühlmitteldurchsatz und ca. 14 m³/h Durchsatz in der Entgasungsleitung traten in 1 h 41 min auf. Die Häufigkeit der Einbrüche wurde danach durch die Drosselung des Na-durchsatzes in der Entgasungsleitung um den Faktor 200 reduziert. Dieses Ergebnis zeigt, daß

- die Entgasungsleitung bei großem Na-durchsatz betrieben Hauptursache für den Gaseintrag ist.

- die getroffenen baulichen Maßnahmen richtig waren
- aber immer noch ein Gaseintrag existiert.

Dieser ist vermutlich einem anderen Mechanismus zuzuschreiben, da aufgrund sowohl der Wasserversuche von IA /2/ als auch der Abhängigkeit des Neutronenrauschens vom Entgasungsleistungsdurchsatz /1/ für Durchsätze kleiner $4 \text{ m}^3/\text{h}$ kein Gaseintrag über diese Leitung erwartet wird.

Der Vergleich des Zeitverlaufes der Reaktivitätseinbrüche bei Nulleistungs- und Leistungsmessungen ergibt folgendes: Auch bei Leistungsbetrieb kann unterschieden werden zwischen Einzel- (Abb. 3.1) und Mehrfachereignissen (Abb.3.2). Weiterhin stimmen überein: Die Steigung zu Beginn der Reaktivitätsstörung (typisch: $- 3 \text{ } \$/\text{s}$ bis $- 5 \text{ } \$/\text{s}$) sowie die Dauer eines Einbruches bei einem Einzelereignis (typisch: 3 s bis 4 s). Hingegen wurde häufig nach einem Einbruch ein positives Überschwingen der Reaktivität $\rho_o(t)$ (siehe z. B. Abb. 3.2) bzw. der Reaktorleistung sowie der BE-Temperaturen beobachtet. Dieser Effekt ist bei keiner der Nulleistungsmessungen beobachtet worden und wird in Kap. 4 näher untersucht. Zwischen dem Betrag der negativen ($\rho_{o,\text{max}}^-$) und positiven ($\rho_{o,\text{max}}^+$) Maximalwerte bei einem Einbruch wurde durch Auswertung von ca. 100 Einbrüchen der in Abb. 4 dargestellte Zusammenhang ermittelt. Demnach ist der positive Überschwinger umso größer, je größer zuvor der Reaktivitätseinbruch gewesen ist. Die Werte der negativen Reaktivitätsintegrale betragen max. etwa $- 30 \text{ } \$/\text{s}$ und typisch etwa $- 5 \text{ } \$/\text{s}$ bis $- 10 \text{ } \$/\text{s}$; beide Werte sind gut mit den Ergebnissen aus den Nulleistungsexperimenten vergleichbar. Die nur bei den Leistungsmessungen beobachteten positiven Reaktivitätsintegrale erreichten Werte bis zu etwa $+ 20 \text{ } \$/\text{s}$; die typischen Werte lagen ebenfalls bei $+ 5 \text{ } \$/\text{s}$ bis $+ 10 \text{ } \$/\text{s}$.

2. Lokalisierung der Gasspeicher

Neben der Identifizierung der Gaseintragsmechanismen ist die Lokalisierung der Gasspeicher die wichtigste Voraussetzung zur Vermeidung der Selbstabschaltungen bzw. Reaktivitätseinbrüche. Daher wurden verschiedene Messungen und Analysen zur Lokalisierung der Gasspeicher durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Neutronenflußschwankungen, welche den Blasendurchgang am deutlichsten anzeigten, mit den Signalen von anderen Meßwertaufnehmern korreliert.

Mit den Meßsignalen für den Kühlmitteldurchsatz, eines Blasennachweisgerätes⁺⁾ und eines Schallaufnehmers⁺⁾ wurden keine Korrelationen festgestellt. Folglich muß der Ort des Speichers zwischen der in Strömungsrichtung dem Core am nächsten gelegenen Meßstelle und dem Core liegen, vorausgesetzt, daß mit den genannten Detektoren einmalige Gasspeicherentleerungen nachweisbar sind. Für die in Strömungsrichtung nach den Blasennachweisgeräten angeordneten Durchflußmesser trifft dies - wie einfache Abschätzungen zeigen - auch zu: der Durchlauf eines Gasschwall, dessen maximales Volumen um $0,5 \text{ l}^1)$ beträgt, verursacht Signaländerungen von einigen Prozent, die nach /3/ sicher nachweisbar sind. Mit dem am Blendenverstellkopf angeordneten Schallaufnehmer - die in Strömungsrichtung dem Core am nächsten gelegene Meßstelle (Abb.6) - kann vermutlich das Durchlaufen eines Gasschwall erfaßt werden /10/. Der bzw. die Speicherorte liegen demnach mit Sicherheit zwischen den Durchflußmessern und dem Kern; wahrscheinlich befinden sich die Speicher jedoch nur im Bereich von "unterhalb des Blendenverstellkopfes" bis zum Kern.

Im Gegensatz dazu wurden eindeutig auch beim Leistungsbetrieb Korrelationen zwischen dem Neutronenfluß und allen vertikal empfindlichen Schwingwegaufnehmern sowie einem Differenzwegaufnehmer festgestellt. In Abb.5 ist als typisches Beispiel dafür der zeitliche Verlauf der Reaktivität und des Effektivwertes eines Schwingwegaufnehmers (im Frequenzbereich von 20 bis 40 Hz) dargestellt. Man erkennt deutlich ca. 1,3 s vor dem Reaktivitätsabfall einen großen Ausschlag des Schwingwegaufnehmers, dem während des Blasendurchganges mehrere kleinere folgen. Dieses Bild ist typisch für die Mehrfachereignisse (s. Abb. 3.2), bei denen der Reaktivitätsverlauf eine Überlagerung von mehreren Einzelereignissen darstellt /1/. Im Gegensatz dazu war nur etwa die Hälfte der Einzelereignisse (s. Abb.3.1) relativ schwach mit den Vibrationen korreliert. Außerdem bestand zwischen beiden Ereignistypen ein Unterschied in der Zeitdifferenz Δt zwischen der ersten nachweisbaren Vibration und dem Beginn des Reaktivitätseinbruches. Bei den Mehrfachereignissen lag dieser zeitliche Vorsprung immer zwischen 1,2 und 1,4 s, bei den Einzelereignissen lag er, sofern überhaupt beobachtbar, zwischen 0,3 und 0,7 s. Diese Ergebnisse lassen sich folgendermaßen interpretieren:

^{+) von INTERATOM installiert}

^{1) dieser Wert ist nicht zu verwechseln mit dem größeren gesamten Gasvolumen, sondern er ist der Maximalwert des momentan im Kern befindlichen Gasvolumens. Er ergibt sich aus dem Maximalwert der Reaktivitätsstörungen unter Verwendung eines mittleren Voidkoeffizienten von $-0,93 \cdot 10^{-2} \text{ l/cm}^3$.}

Die gemessenen Schwingungen werden durch Druckstöße hervorgerufen, welche die Gasblasen beim Expandieren an Orten mit hydraulischen Druckdifferenzen erzeugen. Solche Orte können die in den Gitterplatteneinsätzen eingebauten Festdrosseln sein. Bei den Treiberelementen ist der Druckverlust in diesen Drosseln groß im Vergleich zum Druckverlust im zugehörigen Brennelement; für das Zentralelement und die Testelemente trifft dies nicht zu. Außerdem beträgt die Laufzeit des Kühlmittels von der Drossel bis zur Core-Unterkante bei den Treiberelementen ca. 1,25 s, bei den Testelementen dagegen nur ca. 0,5 s. Der Vergleich mit den gemessenen Zeitdifferenzen Δt führt daher zu der Vermutung, daß Gaseinbrüche, welche die Mehrfachereignisse bewirken, bevorzugt durch die Treiberelemente, kleinere Gaseinbrüche dagegen häufiger durch die Testelemente laufen. Wenn letztere die Testzone durchlaufen, sind die Schwingungen aber wegen der geringeren Gasmenge und des geringeren Drosseldruckverlustes entweder überhaupt nicht nachweisbar oder rufen nur eine geringe Signalamplitude hervor.

Aus den Ergebnissen der Schwingungsmessungen und der Korrelationsversuche, und unter der Annahme, daß der Schallaufnehmer am Blendenverstellknopf die Gaseinbrüche detektieren kann, kommt für die Lage der Speicher der Bereich von "unterhalb des Blendenverstellkopfes" bis zu den Festdrosseln (einschl.) in den Gitterplatteneinsätzen in Betracht. Möglicherweise kann jede der Festdrosseln selbst eine gewisse Gasmenge speichern. Dies würde auch erklären, warum größere Gasmengen bevorzugt durch die Treiberelemente, kleinere hingegen häufiger durch die Testzone laufen: Die Gitterplatteneinsätze der Treiberelemente enthalten nämlich 2 bzw. 3 Festdrosseln die der Testzone hingegen nur eine bzw. keine.

3. Nachweis und Abschätzung einer kontinuierlich durch den Kern transportierten Gasmenge

Die Reaktivitätseinbrüche können durch das plötzliche Entleeren eines oder auch mehrerer Gasspeicher erklärt werden. Das Aufladen der Speicher erfolgt offensichtlich kontinuierlich mit so kleinen Gasmengen, die keiner der installierten Meßwertaufnehmer nachweisen kann. Ein empfindliches Blasennachweisgerät ist der Reaktor selbst. Auch ein Transport von statistisch verteilten kleinen Einzelblasen durch das Core ist - unter bestimmten Voraussetzungen - im Spektrum des Neutronenflusses (=Leistung) nachweisbar. In diesem Abschnitt wird eine ständig mit dem Kühlmittel durch das Core transportierte Gasmenge nachgewiesen und der volumenbezogene Gasgehalt des Natriums abgeschätzt.

3.1 Theoretische Grundlagen

Wenn kleine Gasblasen kontinuierlich, aber mit einer statistisch um einen Mittelwert schwankender Häufigkeit mit dem Kühlmittel durch das Core laufen, dann erzeugen sie aufgrund des Kühlmitteldichtekoeffizienten einen Beitrag zum Reaktivitäts- bzw. Neutronenflußrauschen.

Dieser Beitrag zur autospektralen Leistungsdichte (APSD) des Reaktivitätsrauschens ($S_{pp}(f)$) ist nach /4/ gegeben durch folgenden Ausdruck:

$$S_{pp}(f) = 2 n \bar{q}^2 \left(\frac{h}{v_0}\right)^2 |\Psi(f)|^2 \quad (1)$$

wobei

$$\Psi(f) = \frac{v_0}{h} \int_{-\frac{h}{2v_0}}^{\frac{h}{2v_0}} y_0(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

und $y_0(\tau = \frac{z}{v_0})$ eine Wichtungsfunktion ist, welche zur Berechnung des integralen Reaktivitätseffektes einer Blase aus dem axialen Reaktivitätsverlauf dient.

Für die hier durchgeführte Abschätzung wird $y_0(\tau = \frac{z}{v_0}) = 1$ gesetzt und man erhält

$$|\Psi(f)|^2 = \frac{\sin^2 \omega t_0}{(\omega t_0)^2} \quad (3)$$

wobei $t_0 = \frac{h/2}{v_0}$ die Zeit ist, in welcher die Blase die halbe Core-Höhe durchläuft.

Der in Gl. (1) auftretende Ausdruck

$$k = 2 n \bar{q}^2 \left(\frac{h}{v_0}\right)^2 \quad (4)$$

läßt sich folgendermaßen umformen:

$$k = 2 n \frac{\bar{v}}{q^2} \left(\frac{h}{v_0} \right)^2 = \frac{2 \rho_B^2 V_{Na} \bar{v}_B}{v_0 \cdot F} g |\phi^2_s| \quad (5)$$

wobei

$$g = \frac{\bar{v}_B}{V_{Na}} n \cdot \frac{h}{v_0} = \text{Gasvolumenanteil im Core} \quad (6)$$

Unter Verwendung der Gln. (1, 3, 5) sowie der Übertragungsfunktion G_p zwischen der Reaktivität und der Leistung erhält man für die auf den quadratischen Mittelwert normierte autospektrale Leistungsdichte des Neutronenflusses $S_{yy}(f)$ folgenden Ausdruck

$$S_{yy}(f) = k \frac{\sin^2 \omega t_0}{(\omega t_0)^2} |G_p(f)|^2 \quad (7)$$

Da $|G_p(f)|$ nur relativ schwach von der Frequenz f abhängt⁺, wird es für die näherungsweise Berechnung des relativen effektiven Schwankungsquadrates σ_{eff}^2 des Neutronenflusses konstant gesetzt:

$$\sigma_{\text{eff}}^2 \approx \int_{f_1}^{f_2} S_{yy}(f) df = k |G_p|^2 \frac{\pi}{2t_0} \quad (8)$$

hieraus läßt sich der volumenbezogene Gasanteil g wie folgt bestimmen:

$$g \approx \frac{\sigma_{\text{eff}}^2}{V_B} \cdot \frac{1}{|G_p|^2} \cdot \frac{1}{2\pi\rho_B^2 V_{Na}} \left| \frac{1}{1} \right| \quad (9)$$

⁺ in dem für diesen Effekt relevanten Frequenzbereich
 $f_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ Hz bis $f_2 = 0,5$ Hz

3.2 Bestimmung des volumenbezogenen Gasanteils g

Hierzu muß man nach Gl. (9) das mittlere Volumen \bar{V}_B der Gasblasen kennen und ihren Beitrag zum Effektivwert σ_{eff} der Neutronenflußschwankungen messen.

Beide Voraussetzungen sind im vorliegenden Fall nur unvollkommen erfüllt, so daß man für g nur eine sehr grobe Abschätzung erhalten kann:

Bezüglich \bar{V}_B gibt es zur Zeit noch keine direkten Beobachtungen. Modellversuche zum Gaseintragsmechanismus können zwar einen Hinweis über die Blasengröße im oberen Plenum geben, diese kann sich jedoch beim Durchgang durch den Primärkreislauf besonders unter Einwirkung der Pumpen verändern. In /5/ wird die maximale stabile Blasengröße theoretisch abgeschätzt und mit Messungen verglichen. Es wird für den Blasendurchmesser eine obere Grenze von 1,3 cm angegeben.

In den Arbeiten /6 - 9/ wird zum Einfluß von Gasblasen deren Bildung durch Unterschreitung der Löslichkeitsgrenze bei Temperaturerniedrigung im Wärmeaustauscher betrachtet. Für diese Fälle ergeben sich wesentlich kleinere Blasendurchmesser (von 0,1 bis 0,6 mm), welche aber für das vorliegende Problem nicht maßgeblich sind. In /6/ wird der maximal mögliche Blasendurchmesser, der sich für den P F R durch Pumpeneinwirkung ergibt, zu 0,22 mm angegeben. Für die KNK II liegen keine entsprechenden Abschätzungen vor.

Der Beitrag der Blasen zum Effektivwert der Neutronenflußschwankungen kann nicht direkt gemessen werden, da bei der Messung zwischen diesem Beitrag und noch weiteren größtenteils unbekanntem Ursachen nicht unterschieden werden kann.

Nachdem erkannt wurde /10,1/, daß der Gaseintrag vom Durchsatz Q_S durch die Entgasungsleitung abhängt, wurde σ_{eff} in Abhängigkeit von diesem Durchsatz gemessen (Abb. 7). Die Differenz zwischen σ_{eff} beim eingestellten Durchsatz Q_S und beim Durchsatz $Q_S = 0$ (extrapolierter Wert) kann daher als untere Grenze für den Beitrag zu σ_{eff} betrachtet werden, welcher durch Gasblasen bedingt ist. (Dieser Wert gilt dann für den betreffenden Durchsatz Q_S). Mit diesem Mindestwert für σ_{eff} und dem maximal möglichen Blasenvolumen kann nach

Gl.(9) ein unterer Grenzwert für den volumenbezogenen Gasanteil g bestimmt werden. Messungen zur Bestimmung des durch Gasblasen erzeugten Anteils am Effektivwert der Neutronenflußschwankungen wurden vor und nach dem Einbau des Drosselventils in der Entgasungsleitung durchgeführt.

Erstere erfolgte bei 50% Leistung und 50% Kühlmitteldurchsatz (Abb.7). Bei dieser Betriebsweise wurden keine Reaktivitätseinbrüche, verursacht durch plötzlich freigesetzte größere Gasmengen, beobachtet, welche zur Schnellabschaltung des Reaktors durch das Reaktimeter hätten führen können. Als unterer Grenzwert für den volumenbezogenen Gasanteil ergibt sich aus diesen Messungen nach Gl.(9)

$$g > 10^{-4}$$

$$| \text{mit } r_B = 0,6 \text{ cm; } \rho_B = -0,93 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3 ; V_{Na} = 1,42 \cdot 10^5 \text{ cm}^3 ; G_p = 2 \text{ \%/\text{d}} |$$

Da der mittlere Gasblasenradius sicher kleiner als der hier verwendete Maximalwert $r_B = 0,6 \text{ cm}$ ist, wurde in Abb.8 g in Abhängigkeit von r_B dargestellt. Unterstellt man, daß mit Sicherheit $g \leq 0,1$ (was die BE-Austrittstemperaturmessungen bestätigen), dann läßt sich mittels Gl. (9) eine untere Grenze für den Blasenradius zu $r_B > 0,05 \text{ cm}$ abschätzen. Dies Ergebnis zeigt, daß selbst bei 50% Reaktorleistung, d.h. bei einer Betriebsweise, bei der weder Reaktivitätseinbrüche noch Schnellabschaltungen auftraten, ein kontinuierlicher Gastransport durch das Core erfolgt. Der mit der geringeren Leistung verbundene reduzierte Durchsatz bewirkt aber offenbar hydraulische Bedingungen, welche den Speichermechanismus bei diesem geringen Durchsatz unwirksam machen.

Entsprechende Messungen nach Einbau eines Drosselventils zur Verminderung des Durchsatzes durch die Entgasungsleitung waren geplant. Sie konnten aber nur unter ungünstigen Bedingungen (d.h. in großen Zeitabständen) durchgeführt werden. Dies führte zu einer großen, nicht abschätzbaren Ungenauigkeit von σ_{eff} . Mit diesem Vorbehalt ist das in Abb.8 für diesen Fall ebenfalls aufgetragene Ergebnis $Q_g = 1 \text{ m}^3/\text{h}$ zu werten. Zumindest qualitativ wurden die Beobachtungen der Einzelergebnisse bestätigt, daß nämlich durch den Einbau des Drosselventils auch die kontinuierlich durch das Core transportierte Gasmenge um über eine Größenordnung verringert wurde.

4. Erklärung der positiven Leistungs- bzw. Reaktivitätsüberschwinger

Wie bereits in Kap. 1 beschrieben, wurden häufig im Anschluß an den negativen Einbruch auch positive Überschwinger mit fast gleich großer Amplitude registriert. Abb. 9 zeigt hierfür ein Beispiel, wobei die Leistungsschwankung bereits in Reaktivität umgerechnet ist; dabei wurde der Reaktivitätsverlauf ρ_0 aus dem Leistungssignal durch Anwendung der inversen Kinetik des Nulleistungsreaktormodells gewonnen entsprechend dem an der KNK II installierten Reaktimeter. Aufgrund des Durchlaufs von Blasen kann aber dieser Reaktivitätsverlauf nicht erklärt werden, da Gasblasen infolge des überall negativen Natriumdichtekoeffizienten nur negative Reaktivitätsschwankungen erzeugen können. Für diese positiven Leistungsüberschwinger, welche auch in den Kühlmittelaustrittstemperaturen der Brennelemente nachweisbar sind, wurden folgende Ursachen in Betracht gezogen:

1. Verzögerte Reaktion der Regelung auf die negativen Leistungsschwankungen
2. Beeinflussung des permanenten Gasanteils im Core durch große Einzelblasen
3. Einfluß der inhärenten Leistungs-Reaktivitätsrückführung des Reaktors

Zu Pkt. 1:

Einfluß der Regelung auf die negativen Leistungsschwankungen

Dieser Einfluß konnte durch Messung der Regelstabbewegung eindeutig bestimmt werden: In Abb. 9 sind außer dem Reaktivitätsverlauf auch die zeitliche Folge der gemessenen Ansteuerimpulse für die Regelstabantriebe aufgetragen, welche die verzögerte Reaktion des Reaktorregelsystems (über die Brennelementeaustrittstemperatur θ_R) auf den negativen Leistungseinbruch darstellen, sowie der daraus berechnete Verlauf der Regelstabreaktivität $\rho_S(t)$. Zieht man diesen Anteil von der aus dem Leistungsverlauf berechneten Reaktivität ρ_0 ab (schraffierter Anteil), dann erhält man die extern auf den geregelten Reaktor

einwirkende Reaktivität (gestrichelte Linie), welche in diesem Fall immer noch einen positiven Überschwinger von ca. 2 ϕ Amplitude aufweist. Das zeigt, daß der Einfluß der Regelung nur einen Teil der positiven Reaktivitätsschwankung erklären kann. Dies wird auch durch die Beobachtung von kleineren negativen Reaktivitätseinbrüchen bestätigt, an welche sich positive Überschwinger ohne Eingriff der Reaktorregelung anschlossen.

Zu Pkt. 2:

Beeinflussung des permanenten Gasanteils im Core durch große Gasschwalle

Nach Abschnitt 3, ist stets ein bestimmter Gasanteil im Kühlmittel und damit auch im Core vorhanden. Theoretisch sind nun folgende Prozesse denkbar, welche diesen permanenten Gasanteil kurzfristig vermindern und damit zu einer positiven Reaktivitätsschwankung führen könnten:

- a) Beim Durchgang von größeren Einzelblasen durchs Core könnten diese die sehr kleinen permanent im Kühlmittel vorhandenen Blasen infolge des unterschiedlichen Innendruckes aufsaugen. Dieser Effekt allein würde noch keine positive Reaktivitätsschwankung bewirken, wenn nicht zusätzlich noch durch den erhöhten positiven Schlupf⁺⁾ der großen Blasen das ihnen nachfolgende Kühlmittel von den kleineren Blasen abgereichert würde. Folgende Abschätzung mit Hilfe der unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten der Blasen zum Natrium und ein Vergleich mit dem beobachteten zeitlichen Verlauf zeigte aber, daß diese Hypothese auszuschließen ist:

Für den Schlupf in Abhängigkeit vom Blasenradius gibt es teilweise unterschiedliche Angaben, da kein allgemein gültiges Gesetz existiert, welches die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes der Blasen von allen Einflußgrößen beschreibt /5, 6, 12/. Nach /5/ und den in Abschnitt 3.2 beschrieb-

+) Da der Auftrieb proportional zu r_B^3 ist, der Strömungswiderstand von Blasen aber proportional zu $(r_B \cdot v_{rel})^\chi$, mit $\chi \leq 2$; haben größere Blasen in vertikaler Strömung immer eine größere Relativgeschwindigkeit v_{rel} zur Flüssigkeit als kleinere.

nen Analysen kann man davon ausgehen, daß auch die großen Reaktivitätseinbrüche durch viele Einzelblasen von maximal 0,6 cm Radius erzeugt werden, da größere instabil sein würden. Für Blasen dieser Größe ergibt sich nach /5,12/infolge des Auftriebes eine aufwärts gerichtete Relativgeschwindigkeit von $v_{rel} \approx 24$ bis 28 [cm/s] relativ zum Natrium. Da v_{rel} mit dem Blasenradius abnimmt, der mittlere Radius der permanent vorhandenen kleinen Blasen aber nicht bekannt ist, wird zur konservativen Abschätzung für letztere $v_{rel} = 0$ gesetzt.

Aus den Zeitdauern $t_1 \approx 5$ s für den positiven Reaktivitätsüberschwinger (Abb. 3) und der mittleren Kühlmittelgeschwindigkeit $v_{Na} \approx 1$ m/s läßt sich die Strecke Δs berechnen, auf der hinter einem Einzelereignis das Kühlmittel einen im Vergleich zum Mittelwert geringeren permanenten Gasanteil aufweisen müßte ($\Delta s = 5$ m). Für diesen Abreicherungseffekt bräuchten die großen Blasen aufgrund ihres größeren Schlupfes mindestens eine Zeit $t_o = \frac{5 \text{ m}}{0,28 \text{ m/s}} \approx 18$ s bzw. einen vertikalen Strömungsweg von mindestens $s = t_o \cdot v_{Na} = 18$ m. Da die Entfernung vom Tankboden bis zur Coremitte nur ca. 3,5 m beträgt, scheidet diese Hypothese aus.

- b) Unmittelbar nach dem Auftreten einzelner größerer Reaktivitätseinbrüche ist der Gasspeicher leer. Falls er sich in der kurzen Zeitspanne ($t_1 \approx 5$ s) während des Auftretens der positiven Überschwinger wieder füllen würde, könnte dies ebenfalls zu einer Abreicherung des permanenten Gasanteils während dieser Zeit und damit zu den positiven Überschwingern führen. Dieser Effekt hängt natürlich von der Aufnahmefähigkeit, d. h. vom Wirkungsquerschnitt des Speichers ab. Setzt man diesen 1 und den Gasanteil $g = 10^{-3}$, dann erhält man bei vollem Kühlmitteldurchsatz μ für die während der Zeitspanne Δt_1 absorbierbare Gasmenge $V_{tot} = \mu \cdot g \cdot \Delta t_1 = 1100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 10^{-3} \cdot 5 \text{ s} = 1,5$ ltr. Für die permanent im Core befindliche Gasmenge ergibt sich $V_{max} = V_{Na} \cdot g = 1,42 \cdot 10^5 \text{ cm}^3 \cdot 10^{-3} = 142 \text{ cm}^3$. Es ist nun zu prüfen, inwiefern diese Werte mit dem gemessenen Reaktivitätsverlauf in Einklang stehen. Dazu wird der zeitliche Verlauf der positiven Überschwinger durch folgenden Verlauf approximiert:

Linearer Anstieg während der Zeit $\Delta t_s = 2$ s von $\rho = 0$ auf $\rho_{\max} = 2,5$ ϕ .
Anschließend in der Zeit $\Delta t_f = 3$ s wieder ein linearer Abfall auf $\rho = 0$.
Um diesen Verlauf mit dem Na-void-koeffizienten von $-0,93 \cdot 10^{-2}$ ϕ/cm^3 zu erzeugen, müßte dem Kühlmittel während der Zeit $t_1 = \Delta t_s + \Delta t_f = 5$ s vom stets vorhandenem Gasanteil ein Volumen $V_{\text{tot}} = 1,8$ ltr. entzogen werden. Beim Reaktivitätsmaximum müßte dabei das Natrium im Core um die Gasmenge $V_{\max} = 269$ cm^3 abgereichert werden. Die relativ gute Übereinstimmung mit den obigen Abschätzungen bezüglich der verfügbaren Gasmenge scheint die zugrunde gelegte Modellvorstellung zunächst zu bestätigen. Die dabei getroffene Voraussetzung, daß nämlich der Speicher sämtliches Gas aus dem vorbeiströmenden Kühlmittel absorbiert, ist aber äußerst unrealistisch. Deshalb ist auch diese Hypothese mit großer Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Eine eindeutige diesbezügliche Klärung könnten hydrodynamische Modellversuche ergeben.

- c) Es wurde angenommen, der permanente Gasanteil im Core sei nicht allein durch kleine, mit dem Kühlmittel transportierte Gasbläschen bedingt, sondern noch durch Gasblasen, welche sich im Core festgesetzt haben (z. B. an den Abstandshaltern). Beim Durchgang von größeren Blasen oder eines Gaschwalles könnten erstere dann losgerissen werden und bis zur Herstellung des ursprünglichen Zustandes vorübergehend zu einer positiven Reaktivitätsschwankung führen.

Aus folgenden Gründen muß aber auch diese Vorstellung praktisch ausgeschlossen werden:

Nach Abschnitt b) müßten in diesem Fall im Core stets Gasbläschen mit einem Gesamtvolumen von ca. 1,5 ltr. gespeichert sein. Dies ist aber infolge der guten Benetzung von Metallen durch Natrium besonders bei hohen Temperaturen /13/ sehr unwahrscheinlich, es sei denn, es gibt Brennelemente mit lokalen Blockaden, hinter denen in den Rezirkulationszonen eingetragenes Gas gespeichert werden könnte /14/.

Zu Pkt. 3:

Einfluß der inhärenten Reaktivitätsrückkopplung des Reaktors

Die Tatsache, daß bei den Nulleistungsexperimenten keine positiven Leistungsüberschwinger beobachtet worden sind, weist darauf hin, daß diese durch die Übertragungsfunktion des Reaktors bei Leistung zu erklären sind. Der in den Abb. 3, 5, 9 und 10 gezeigte Reaktivitätsverlauf $\rho_0(t)$ wurde aus dem Leistungssignal $p(t)$ durch die inverse Kinetik nach dem Nulleistungsreaktormodell gewonnen⁺⁾ . Dieses Signal entspricht also dem Signal des Reaktimeters, wie es an der KNK II installiert ist. Die so ermittelte Reaktivität gibt daher die Nettoreaktivität ρ_0 des Reaktors ohne seine internen und externen Rückkopplungen an (vgl. Abb. 11).

Infolge der inhärenten Reaktivitätsrückkopplung des Reaktors, bei welcher der negative Doppler- und Kühlmittelkoeffizient dominieren, muß im Prinzip eine negative Leistungsänderung eine positive Reaktivitätsrückkopplung und diese ihrerseits eine positive Leistungsänderung erzeugen. Die Größe dieses Effektes hängt von der Größe der Reaktivitätskoeffizienten und von der betreffenden Zeitkonstanten für den Wärmeaustausch ab. Zur Berücksichtigung dieses Effektes wurde die Übertragungsfunktion zwischen der Reaktivität und der Leistung des Reaktors für 95 % Reaktorleistung mit den im Sicherheitsbericht /11/ angegebenen Daten mit dem Programm Hetra /16/ berechnet.

Verwendet man diese Leistungsübertragungsfunktion zur Berechnung des Reaktivitätsverlaufes aus dem Leistungssignal, so wird der positive Überschwinger des Reaktivitätssignals etwas kleiner gegenüber der "Nulleistungsreaktivität". Es bleibt jedoch immer noch der größte Teil des positiven Überschwingers ungeklärt ($\rho_R(t)$ in Abb. 10).

⁺⁾ Dabei wurde ein linearisiertes Reaktimeter mit einer effektiven Gruppe verzögerter Neutronen ($\lambda_{eff} = .08/s$) verwendet.

Zur Überprüfung der zur Berechnung der Leistungsübertragungsfunktion verwendeten Modellvorstellungen und Reaktivitätskoeffizienten wurde die Leistungsübertragungsfunktion gemessen. Hierzu wurde die Reaktivität des Reaktors durch eine pseudostatistische Anregung des Regelstabs moduliert und mit der Kreuzkorrelationstechnik die Übertragungsfunktion zwischen Reaktivität und Leistung gemessen. Abb. 12 zeigt die gemessene Übertragungsfunktion zusammen mit den für den Nulleistungsreaktor $K(\omega)$ und für den Leistungsreaktor $G_p(\omega)$ berechneten. Obwohl der statistische Fehler der Messung relativ groß ist, kann doch eine systematische Abweichung der gemessenen Übertragungsfunktion von der berechneten (G_p) abgelesen werden. Diese Diskrepanz ist noch nicht geklärt; hierfür sind weitere Untersuchungen vorgesehen. Die relativ große Verstärkung bei Frequenzen um 0,1 Hz und die Tatsache, daß die Leistungsüberschwinger eine Periodenlänge von ca. 10 sec zeigen, läßt vermuten, daß die Überschwinger mit der **signifikanten Übertragungsfunktion erklärt werden** können. Eine Rückrechnung des Leistungsverlaufes von Abb. 10 auf externe Reaktivität entsprechend der gemessenen Übertragungsfunktion führt zu einem Reaktivitätssignal ($\rho_{ex}(t)$ in Abb. 10), das - nach Korrektur auf die Regelstabbewegungen (ρ_s) - denselben Wert zeigt wie vor Eintritt der Reaktivitätsstörung.

Damit ist folgendes gezeigt:

- Es gab keine (externen) positiven Reaktivitätsüberschwinger. Die beobachteten positiven Leistungsüberschwinger wurden durch ausschließlich negative Reaktivitätsstörungen erzeugt.
- Das verwendete Reaktimeter zeigt in solchen Fällen nicht die externe Störreaktivität an.
- Die für KNK II berechnete Reaktivitäts-Leistungsübertragungsfunktion stimmt mit der gemessenen Funktion nicht zufriedenstellend überein. Durch Variation der Reaktivitätskoeffizienten innerhalb vertretbarer Grenzen sind die Abweichungen nicht erklärbar /15/.

Die Tatsache, daß die positiven Überschwinger unter Verwendung der gemessenen Übertragungsfunktion verschwinden, deutet darauf hin, daß diese trotz der Meßungenauigkeiten die dynamischen Eigenschaften der KNK II relativ gut beschreibt.

Die Ursache für das resonanzähnliche Verhalten der gemessenen Übertragungsfunktion zwischen externer Reaktivität und Leistung im Bereich um 0,1 Hz ist möglicherweise im Na-Durchfluß der Primärkreise zu suchen: sowohl das Autospektrum der Durchflußmessersignale als auch die Kohärenz zwischen Durchflußmesser- und Temperatursignalen zeigen in diesem Frequenzbereich deutlich größere Werte als in der Umgebung. Dieser Effekt sowie die gesamte Problematik der Diskrepanz von berechneter und gemessener Übertragungsfunktion wird gegenwärtig untersucht.

Nomenklatur

f	Frequenz (Hz)
F	Kühlmittelquerschnittsfläche im Core
g	Gasanteil bezogen auf das Corevolumen
$G_p(\omega)$	Reaktivitäts-Leistungsübertragungsfunktion
h	Corehöhe (cm)
K	Reaktivitäts-Leistungsübertragungsfunktion ohne Leistungsrückkopplung
n	mittlere Anzahl der pro Zeiteinheit in den Reaktor ein- bzw. austretenden Gasblasen
p	Reaktorleistung
q	Reaktivitätseffekt einer Gasblase (ϕ)
Q_S	Kühlmitteldurchsatz durch die Entgasungsleitung (m^3/h)
r_B	Blasenradius
t	Zeit
v_o	Blasengeschwindigkeit (cm/s)
\bar{V}_B	mittleres Volumen einer Gasblase (cm^3)
V_{Na}	Natriumvolumen im Core = $F \cdot h$ (cm^3)
Z	axiale Ortskoordinate
ρ_R	Brennelementaustrittstemperatur
ρ_S	Regelstabreaktivität
ρ_o	Reaktivität mit K aus p bestimmt
ρ_R	Reaktivität mit berechneter G_p aus der Leistung bestimmt
ρ_{ex}	Reaktivität mit gemessener G_p aus der Leistung bestimmt
τ	Zeit
$\Delta\tau$	Zeitdifferenzen zwischen Signal der Schwingwegaufnehmer und dem Leistungseinbruch
γ_o	Wichtungsfunktion
ω	Kreisfrequenz

Literatur

- /1/ J. Ehrhardt, P. Hoppé: unveröffentlichte Ergebnisse
- /2/ G. Finke, H. Richard, P. Hoppé, F. Mitzel: Untersuchungen zur
Aufklärung der Schnellabschaltungen durch Schutzgasblasen an der
KNK II
KfK-Hausmitteilungen 2/79 (1979) 12-14
- /3/ P. Hoppé, F. Mitzel: Untersuchungen zum Ansprechvermögen von Brenn-
elementdurchflußmessern und Thermoelementen ...
Tagungsbericht Reaktortagung Düsseldorf 1976 DtAF/KTG Seite 593 (1976)
- /4/ A. I. Mogilner: Noise Associated with Inhomogeneities in
the Heat Carrier of a Reactor, Soviet Atomic Energy 30 (6), 629 (1971)
- /5/ M. D. Carelli, E. D. Shoua: Transient Effect on LMFBR Fuel
Rods by Gas Bubbles Entrained in the Coolant, Nuclear Eng. and
Design 17 (1971) 322 - 328
- /6/ R. H. S. Winterton: Cover-Gas Bubbles in Recirculating Sodium
Primary Coolant, Nuclear Eng. and Design 22 (1972) 262 - 271
- /7/ W. J. Minkowycz, D. M. France, R. M. Singer: Behaviour of Inert
Gas Bubbles in Forced Convective Liquid Metal Circuits. Journal
of Heat Transfer, Febr. 1976, 5 - 11
- /8/ K. Thormeier: Solubility of the Noble Gases in Liquid Sodium,
Nuclear Eng. and Design 14 (1970) 69 - 82
- /9/ W. J. Minkowycz, D. M. France, R. M. Singer:
Transport of Inert Gas Bubbles in a LMFBR-Core
Technical Memorandum ANL-CT-76-14, August 1975
- /10/ K. Förster, Interatom, pers. Mitteilung, Okt. 1979
- /11/ KNK II Sicherheitsbericht, unveröffentlicht

- /12/ Seminar über Zweiphasenströmung Nov. 1965 - Febr. 1966
KfK Externer Bericht 8/66-8 (1966)
- /13/ A. A. Bishop, F. C. Engel, R. A. Markley: Heat Transfer
Effect of Entrained Gas in Liquid Sodium Systems
Nuclear Eng. and Design 52 (1979) 1 - 13
- /14/ F. Huber, KfK-IRE, pers. Mitteilung
- /15/ F. Mitzel, P. Hoppé: Theoretical and Experimental Analysis
of Fast Reactor Transfer Functions for the Identification
of Plant Dynamics and Core Parameters, International Meeting
on Fast Reactor Safety Technology, August 19 - 23, 1979
Seattle, Wash.
- /16/ L. Caldarola, P. Ferranti, F. Mitzel: Fast Reactor Transfer
Functions with Special Reference to the Nonlinearities and the
Spatial Dependence of the Heat Transfer Process. Nuclear Technology
Vol. 31 (Dec. 1976) 306 - 318

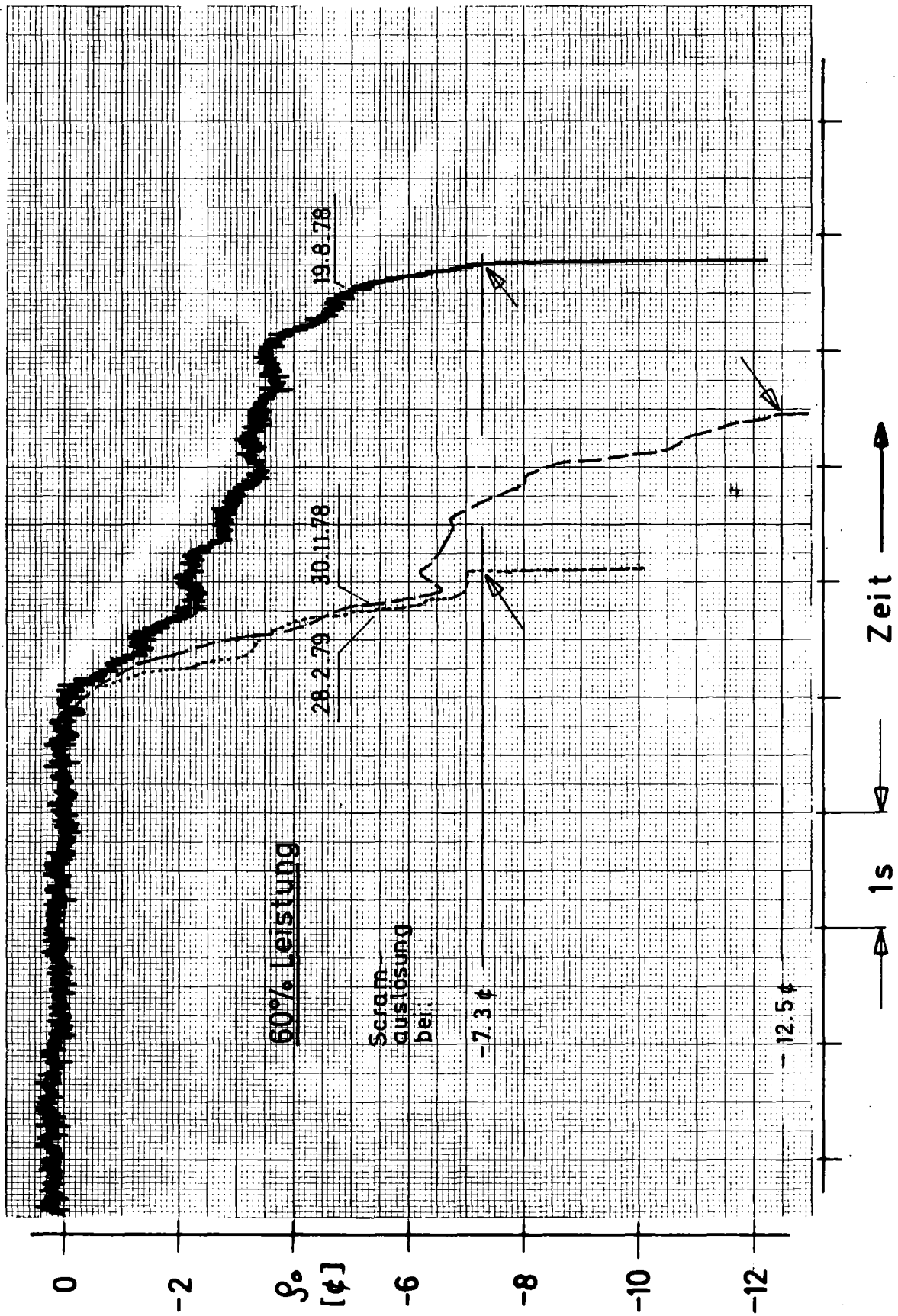


Abb. 1 Schnellabschaltungen der KNKII

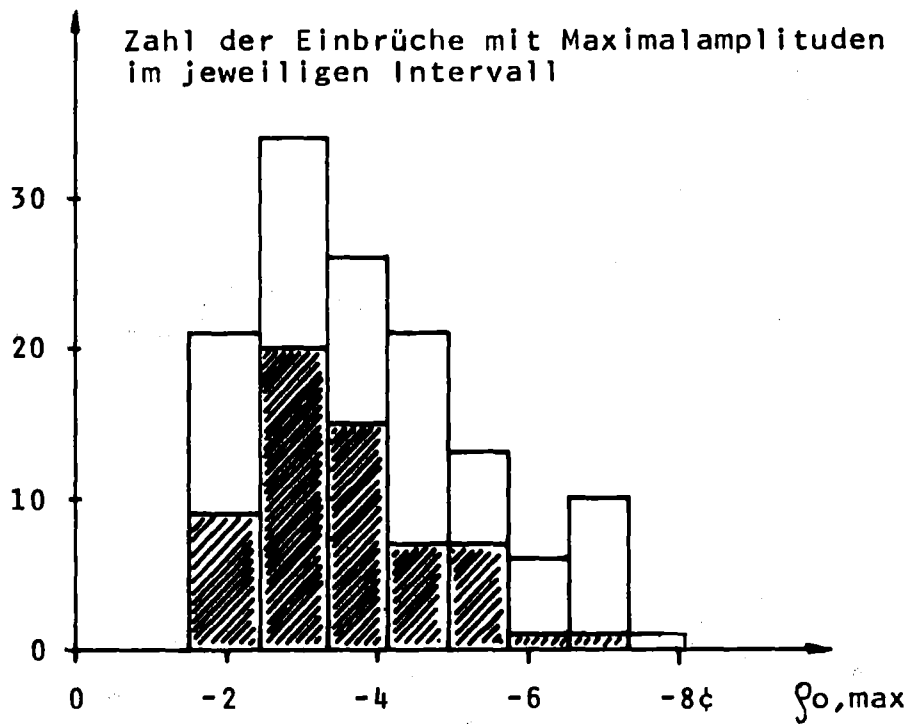


Abb. 2 Häufigkeitsverteilung der maximalen Reaktivitätsamplituden

gesamt: bei Nulleistung in 1h41

schraffiert: bei 95% Nennleistung in 210h

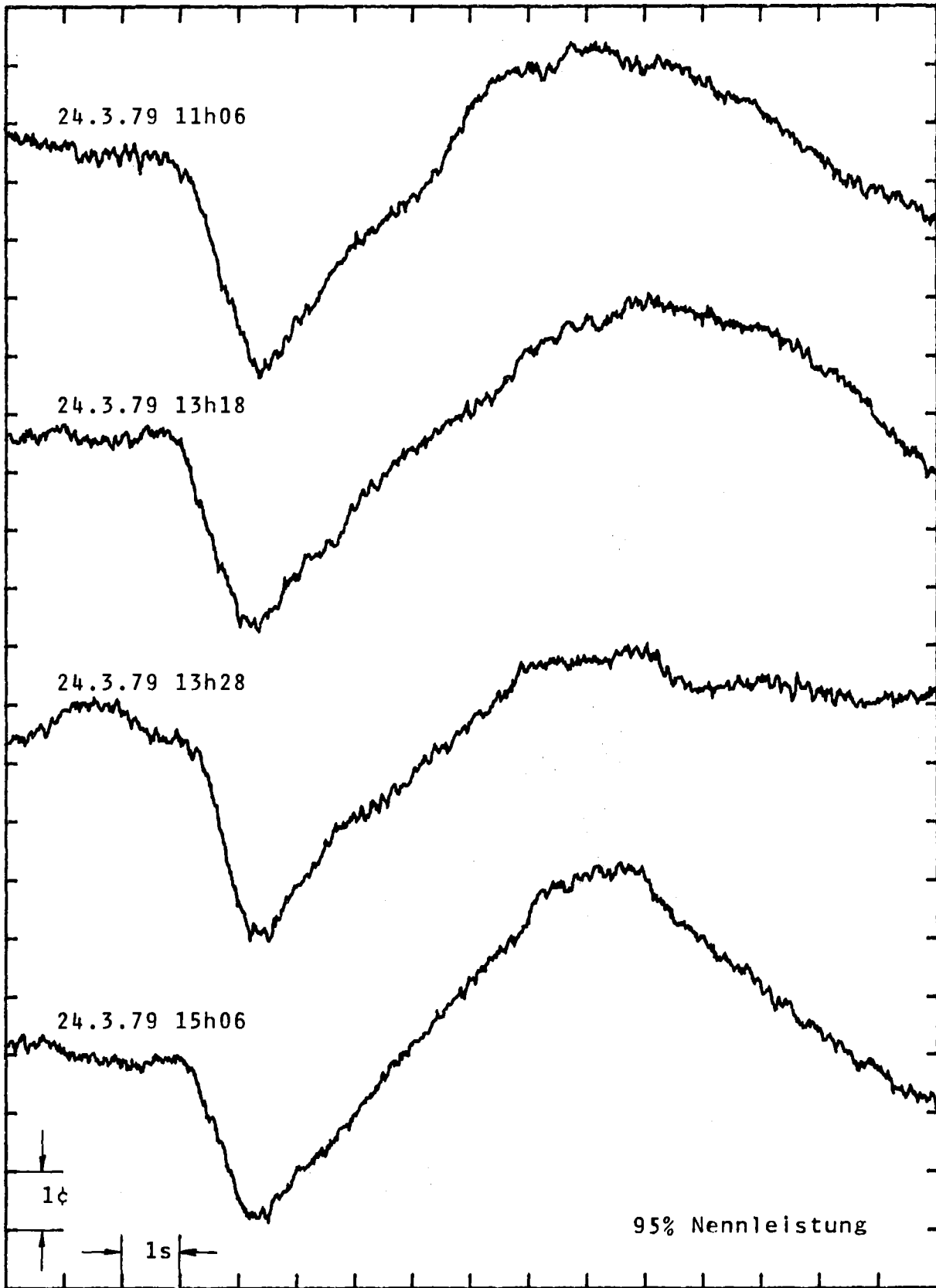


Abb. 3.1 Zeitlicher Verlauf der Reaktivität bei
E i n z e l e r e i g n i s s e n

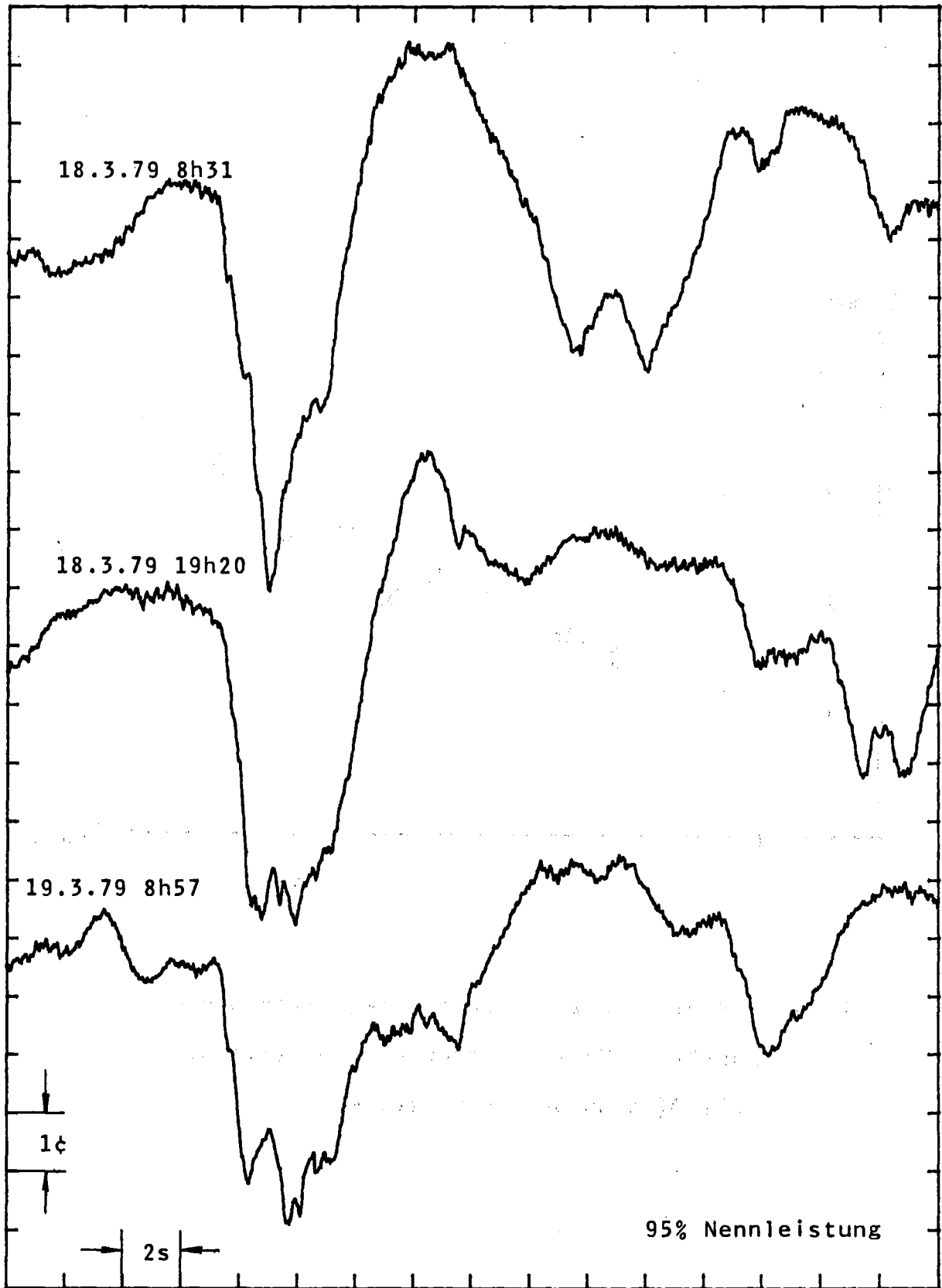


Abb. 3.2 Zeitlicher Verlauf der Reaktivität bei
M e h r f a c h e r e i g n i s s e n

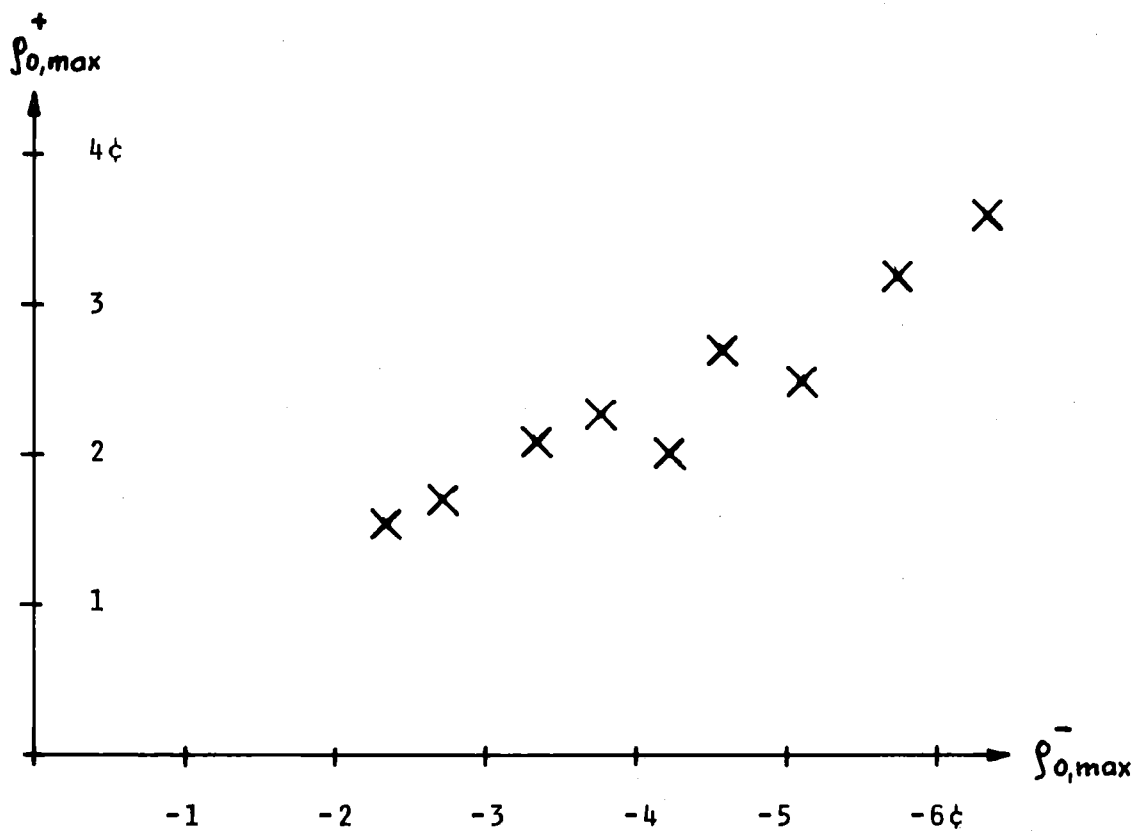


Abb. 4 Korrelation zwischen den negativen und den positiven Maximalwerten der Reaktivität (die X sind Gruppenmittelwerte)

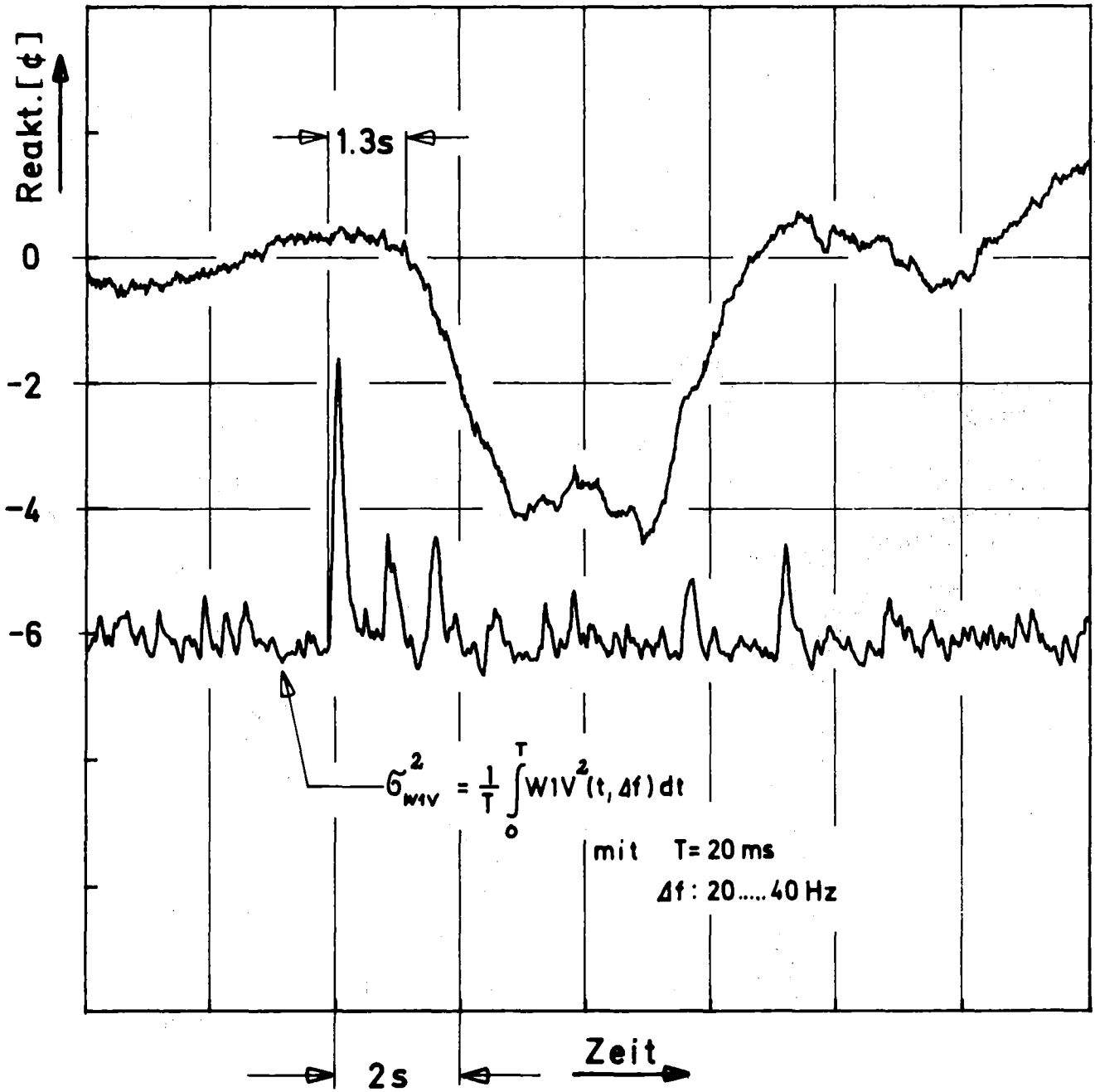


Abb. 5 Zeitlicher Verlauf der Reaktivität und des eff. Wertes des Schwingweges WIV

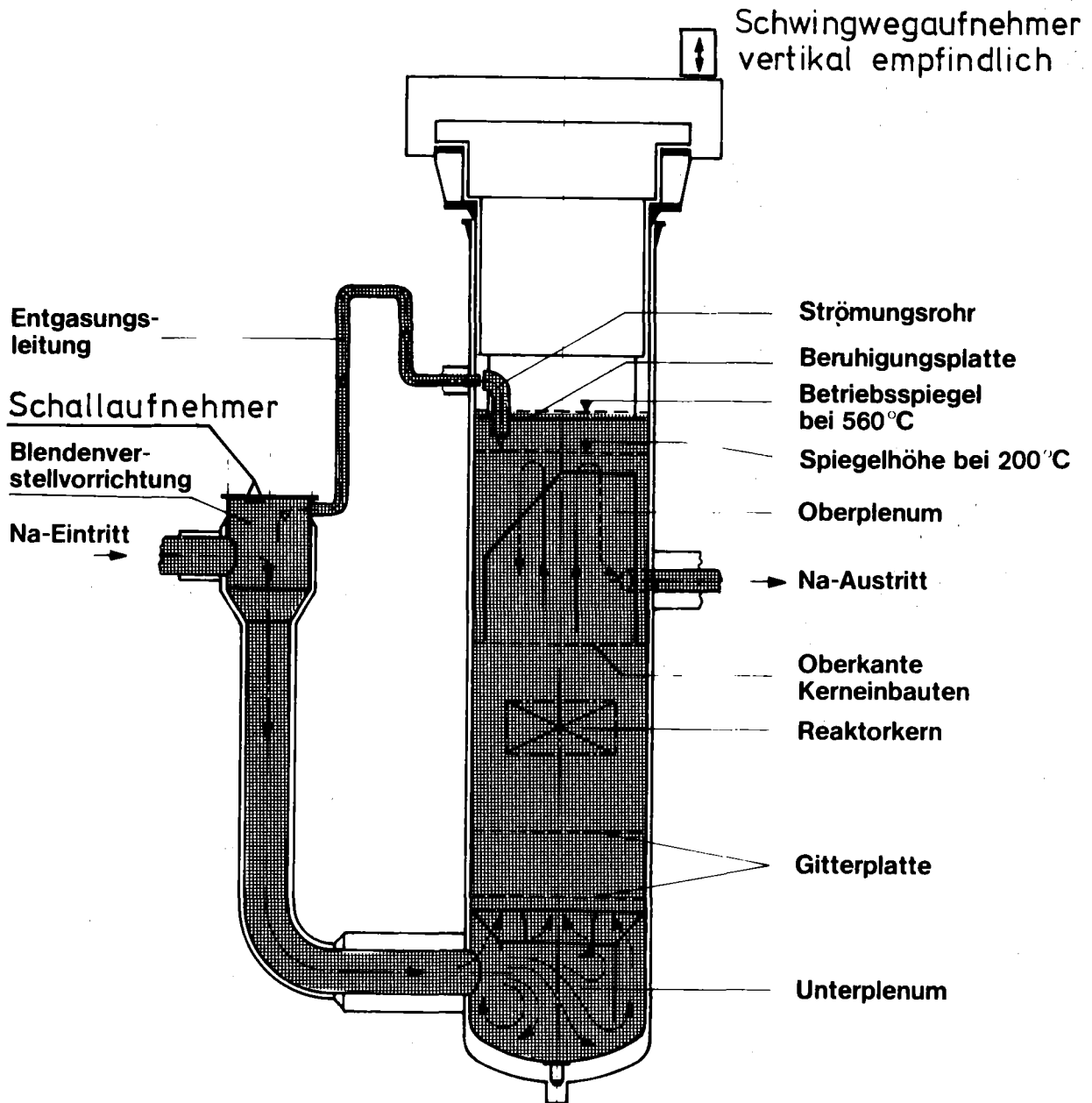


Abb. 6 Strömungsführung im Reaktortank KNK II

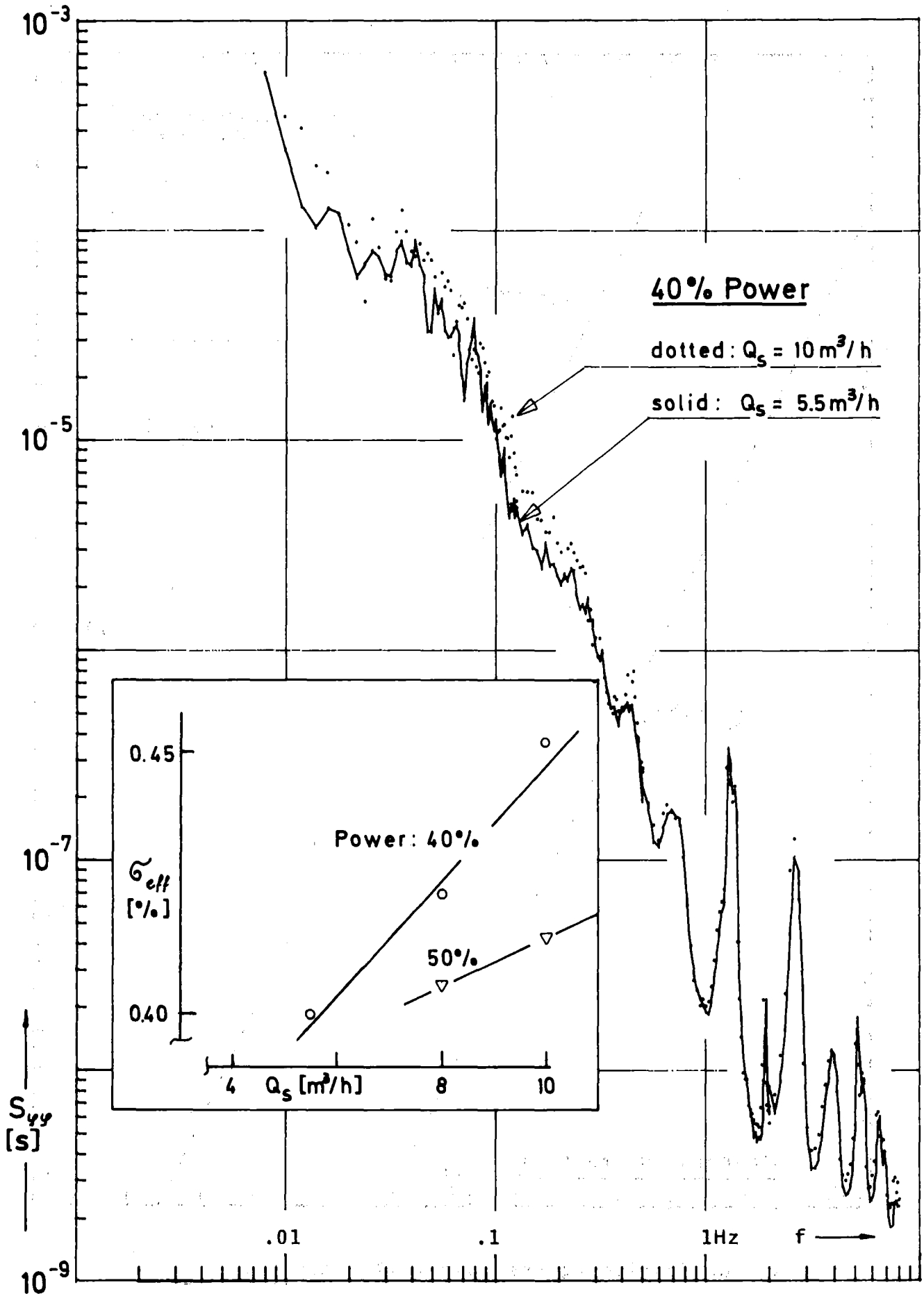


Abb. 7 Abhängigkeit des Neutronenflussspektrums vom Natriumdurchsatz in der Entgasungsleitung

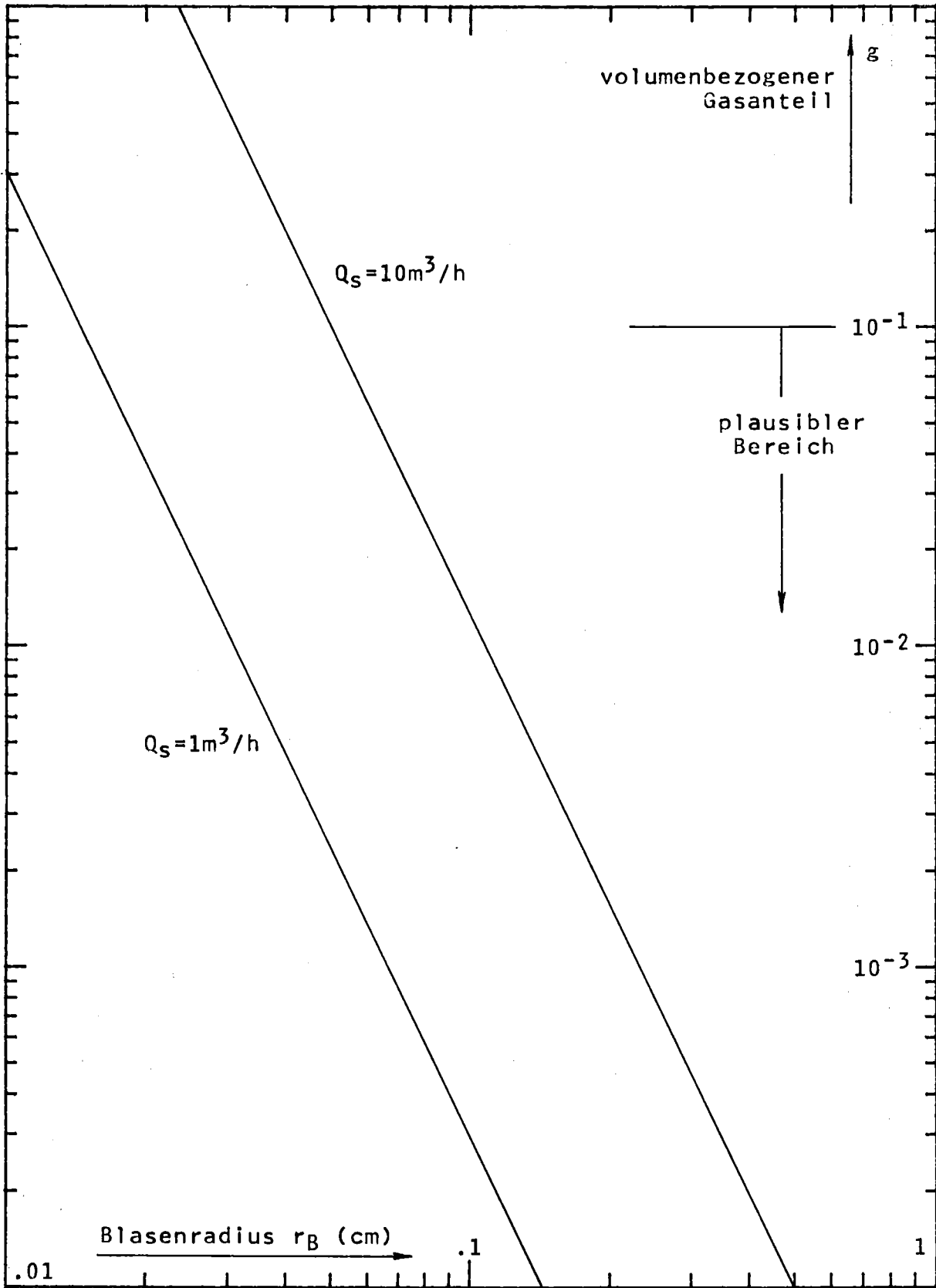


Abb. 8 Zur Bestimmung des Gasanteils nach Gl.9

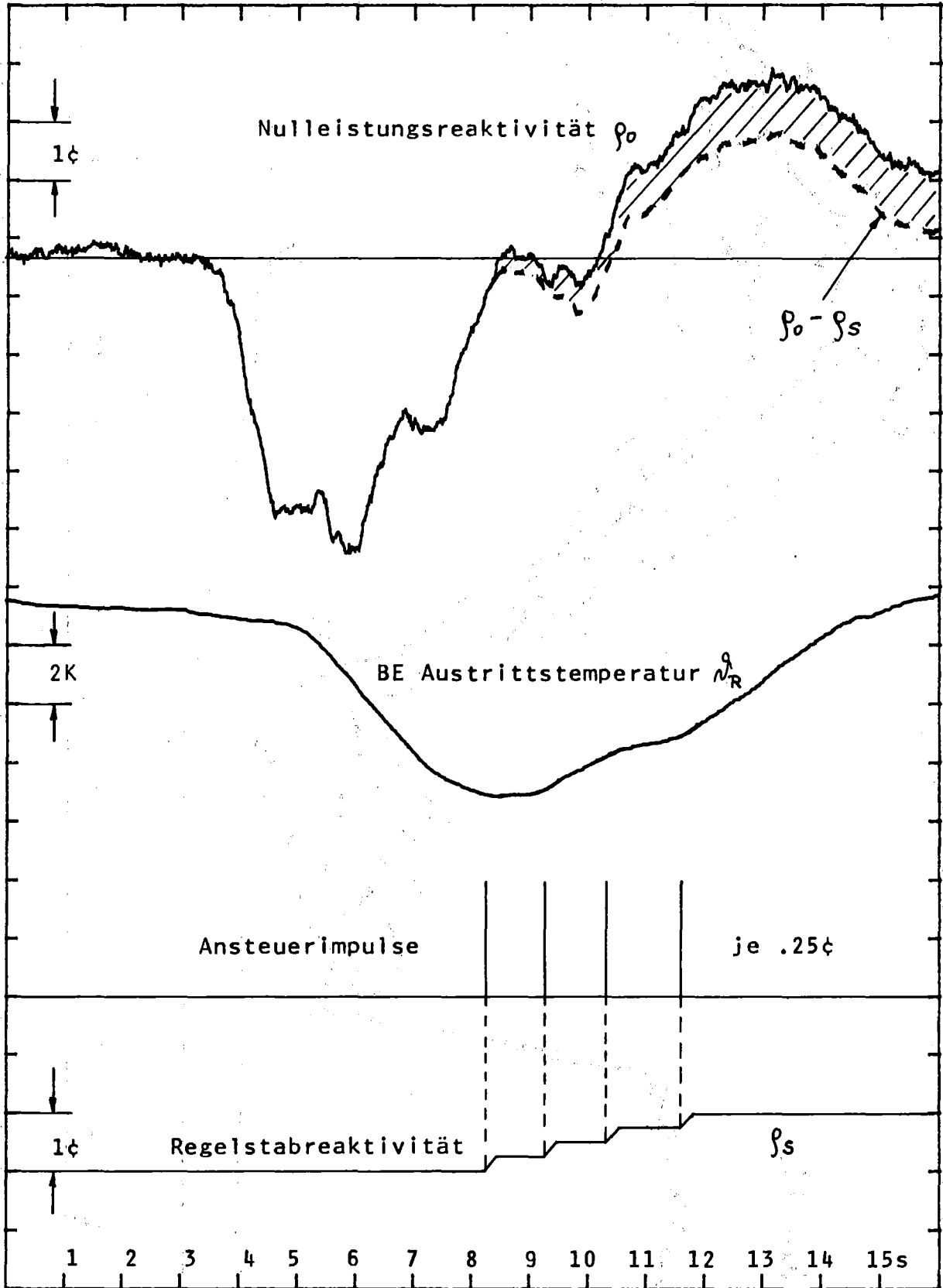


Abb. 9 Reaktion der Reaktorregelung auf den Reaktivitäts-
einbruch vom 29.3.79 um 21Uhr17

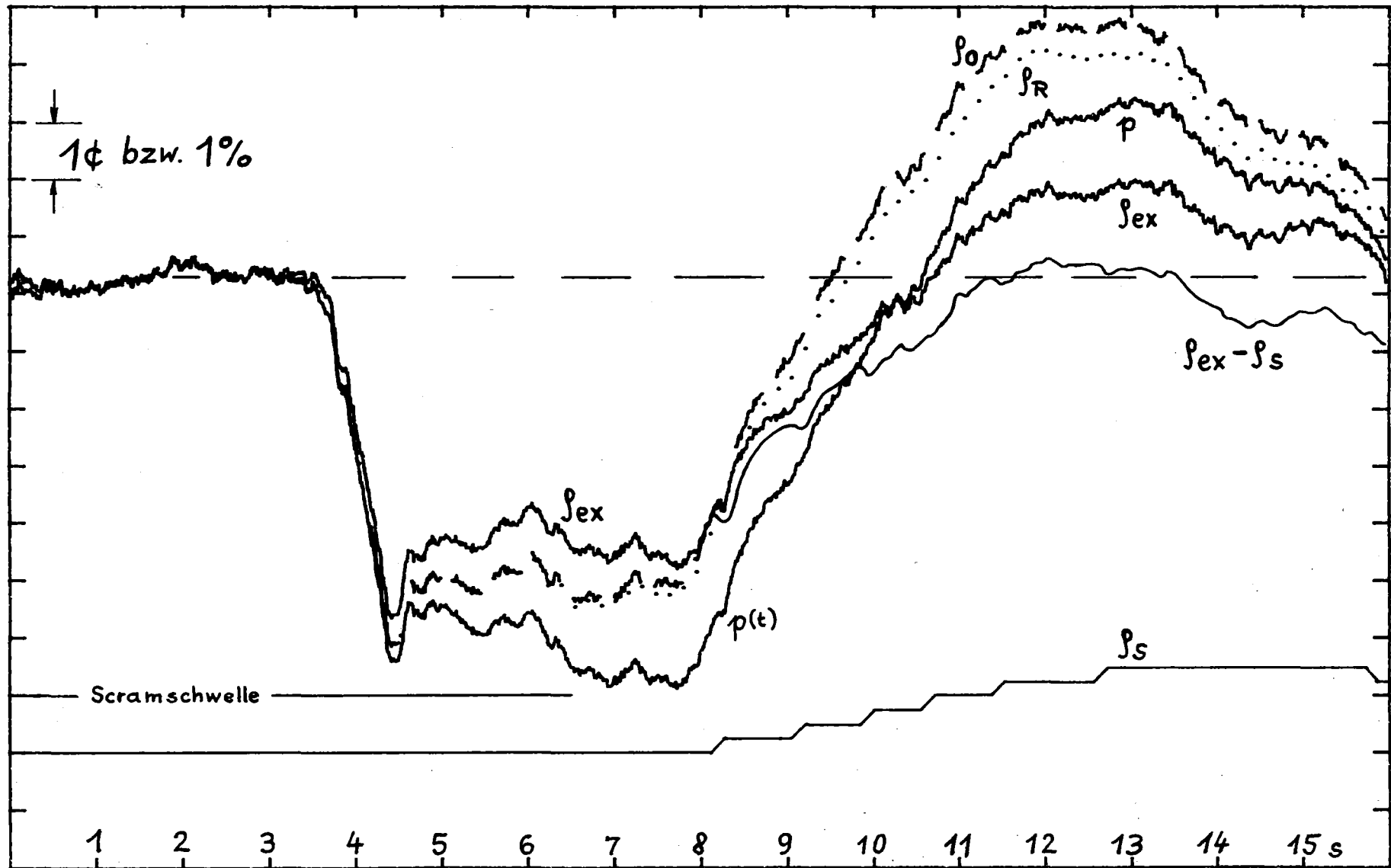


Abb.10.1 Zeitlicher Verlauf von Leistung und Reaktivität beim Einbruch am 26.3.79 um 18Uhr34

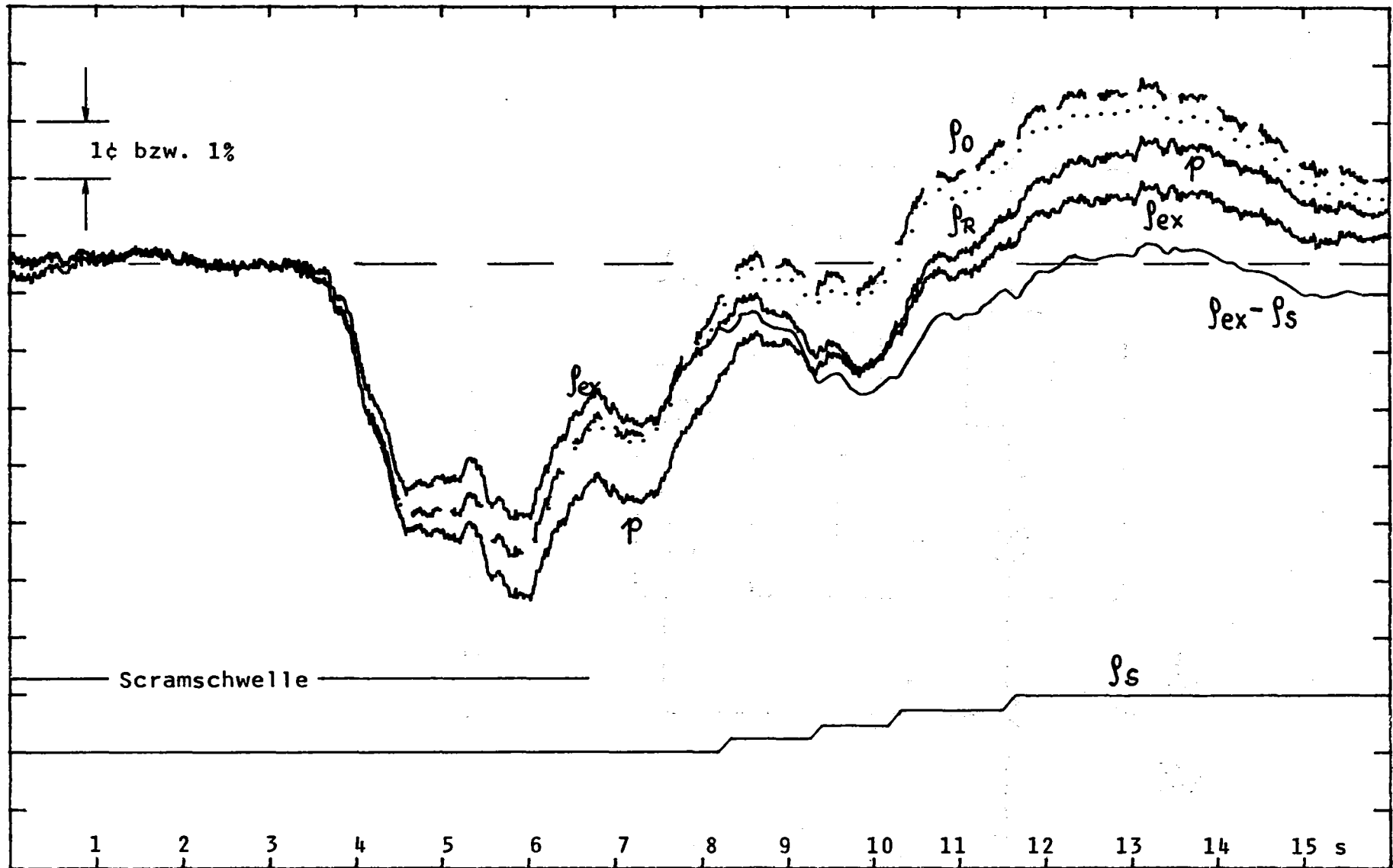


Abb.10.2 Zeitlicher Verlauf von Leistung und Reaktivität beim Einbruch am 29.3.79 um 21Uhr17

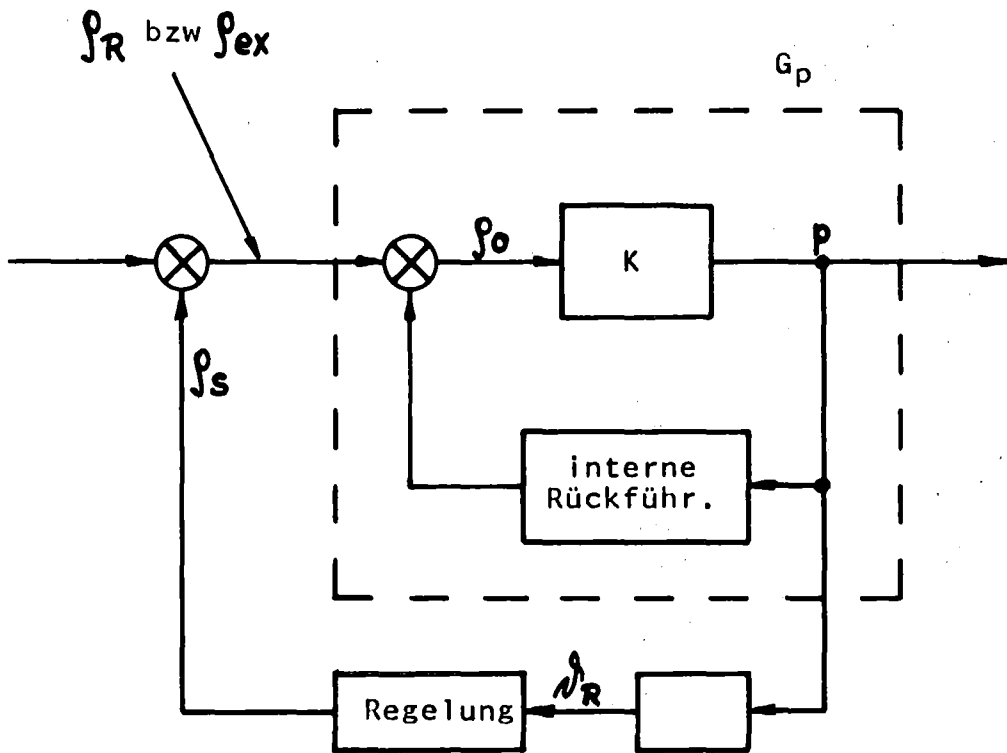


Abb. 11. Blockdiagramm der KNKII

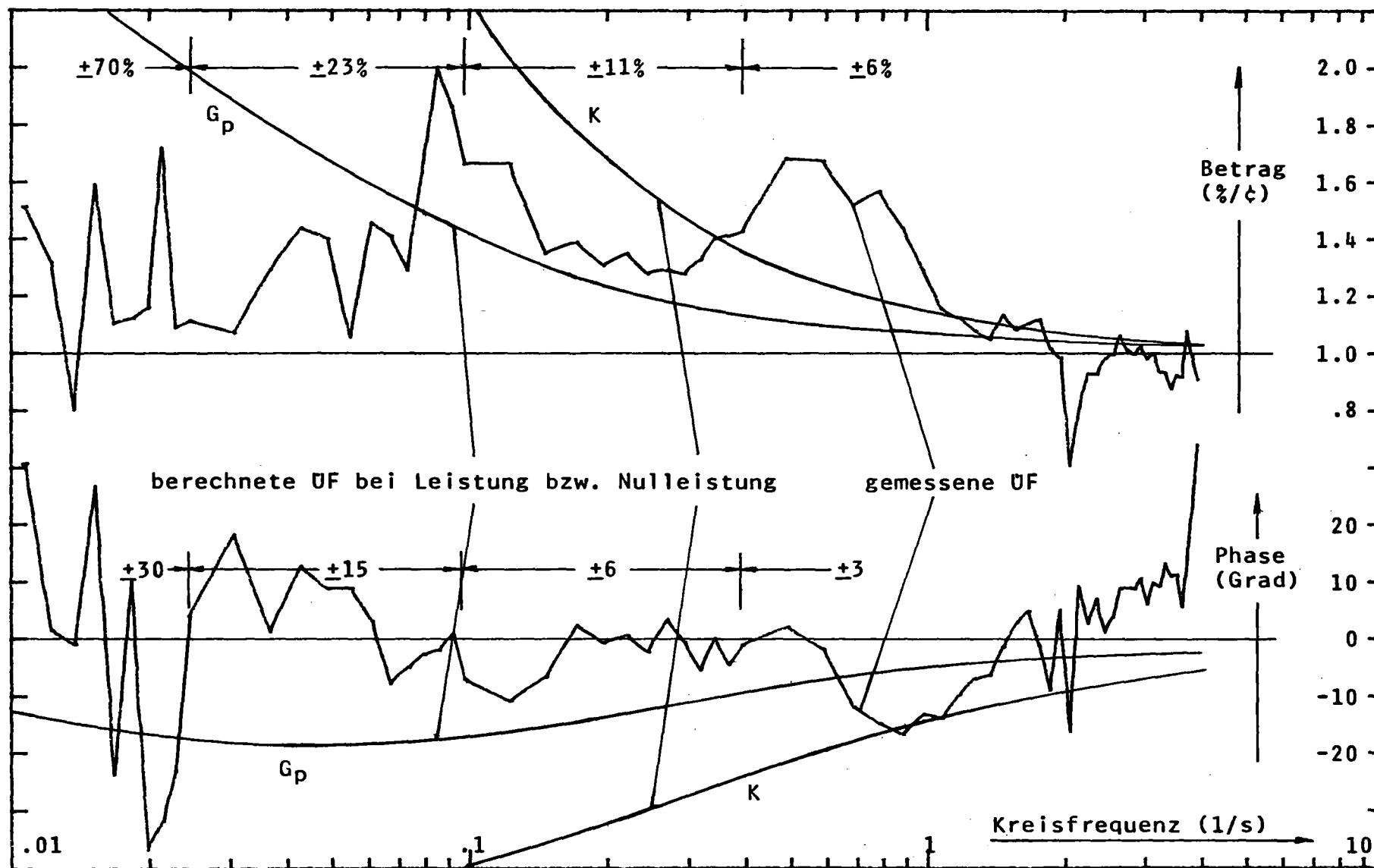


Abb. 12 Gemessene und berechnete Übertragungsfunktionen der KNKII bei 95% Nennleistung