

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

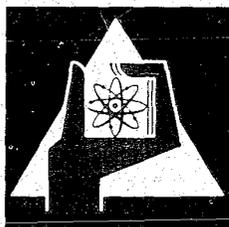
März 1968

KFK 739
EUR 3722 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Aufbau und Betriebsweise des SNEAK-Reaktivitätsmeters

H. Walze



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1968

KFK 739
EUR 3722 d

Institut für Angewandte Reaktorphysik

Aufbau und Betriebsweise des
SNEAK-Reaktivitätsmeters*

H. Walze

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

* Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Kinetische Gleichungen und Blockschalbild
3. Programmierung
4. Dimensionierung und Einstellung der Parameter
5. Inbetriebnahme
6. Reaktivitätsmessungen an SNEAK
7. Meßgenauigkeit
8. Verbesserungsmöglichkeiten
9. Zusammenfassung

1. Einleitung

Das Reaktivitätsmeter (im folgenden mit RM abgekürzt) wurde im Rahmen des SNEAK-Neutronenmeßprogramms /1/ gebaut und bei den ersten SNEAK-Anordnungen erprobt. Im folgenden wird über den prinzipiellen Aufbau, die Dimensionierung und die Erfahrungen beim Einsatz des Gerätes bei SNEAK-1 /2/ berichtet. Im Prinzip ist das RM ein kleiner Analogrechner mit festem Programm, der in Echtzeit die Reaktivität aus der Reaktorleistung berechnet. Dem Programm liegt eine geeignete Form der reaktorkinetischen Gleichungen zugrunde. Der Experimentator kann bei fast allen Experimenten aufgrund der augenblicklichen Anzeige entscheiden, ob seine digitalen Meßdaten brauchbar sind, oder ob die Messung wiederholt werden muß. Die Registrierung der Reaktivität erfolgt durch parallel geschaltete Drehspullinienschreiber im Meßraum und in der Schaltwarte, so daß auch der Reaktoroperator die Möglichkeit hat, den Reaktivitätsverlauf zu beobachten.

Für die Planung des RM standen Unterlagen über ein ähnliches Gerät zur Verfügung /3/. Dieses wurde für den Einsatz am Schwerwasserreaktor HBWR in Halden, Norwegen, von A.J.W. Andersson und T. Hveding entwickelt. Es unterscheidet sich jedoch von dem hier beschriebenen dadurch, daß es als Zusatzgerät für einen röhrenbestückten Analogrechner konstruiert wurde und daher als Recheneinheit 100 V hat. Das im folgenden beschriebene Gerät ist voll transistorisiert, hat als Recheneinheit 10 V und kann unabhängig von einem Analogrechner eingesetzt werden. Es ist mit einem servomechanischen Multiplizierer und 6 Rechenverstärkern aufgebaut, wie sie für halbleiterbestückte Analogrechner handelsüblich sind. Das RM ist in ein 19"-Gestell eingebaut.

2. Kinetische Gleichungen und Blockschaltbild

Die kinetischen Gleichungen für ein Reaktorpunktmodell lauten:

$$(1) \quad \frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta)-1}{l} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S$$

und

$$(2) \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{k \beta_i}{l} n - \lambda_i C_i$$

Dabei ist:

$n = n(t)$	Konzentration der Neutronen im Reaktor
$C_i = C_i(t)$	Konzentration der i-ten Gruppe von Vorläuferkernen verzögerter Neutronen
$k = k(t)$	Multiplikationsfaktor
S	zeitunabhängige Neutronenquellstärke
β	Anteil aller verzögerten Neutronen
β_i	Anteil der verzögerten Neutronen in der i-ten Gruppe
λ_i	Zerfallskonstante der i-ten Gruppe von Vorläuferkernen
l	Neutronenlebensdauer

Es sind alles ortsunabhängige Effektivwerte; i ist der Index für eine Gruppe von verzögerten Neutronen. Sechs Gruppen werden berücksichtigt.

Um die Gleichungen (1) und (2) für einen Analogrechner ohne ein passives Netzwerk programmieren zu können, müssen sie umgeformt werden.

Mit der Einschränkung $\beta \cdot k \approx \beta$ läßt sich schreiben

$$(3) \quad \Delta k = \beta + \frac{1}{n} \left(l \frac{dn}{dt} - l \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i - S \cdot l \right)$$

und

$$(4) \quad l \frac{dC_i}{dt} = n \beta_i - \lambda_i l C_i$$

Für 6 verzögerte Neutronengruppen braucht man zur Realisierung der Rechenschaltung am Analogrechner 7 Integratoren, 7 Rechenverstärker, 1 Multiplizierer und 16 Rechenpotentiometer (Abb. 1). Außer der großen Anzahl an Rechenelementen bestehen bei dieser Methode die Nachteile, daß kleine Reaktivitäten als Differenz zweier u. U. großer Werte berechnet werden, und daß $\beta \cdot k \approx \beta$ erfüllt sein muß. Zur Umgehung solcher Schwierigkeiten wird hier eine Schreibweise der Gleichungen (1) und (2) benutzt, die es gestattet, passive Netzwerke zu verwenden:

Löst man Gleichung (2) formal nach $\lambda_i C_i$

$$(5) \lambda_i C_i = \frac{k \beta_i}{1} n - \frac{dC_i}{dt}$$

und setzt diesen Ausdruck in (1) ein, so erhält man

$$(6) \frac{dn}{dt} = \frac{\Delta k}{1} n - \frac{k \beta}{1} n + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{k \beta_i}{1} n - \frac{dC_i}{dt} \right) + S$$

also

$$(7) \frac{\Delta k}{k \beta} = \rho = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\beta k} \left(\frac{dn}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt} - S \right).$$

Gleichungen (7) und (2) zeigen, daß zur analogen Darstellung von ρ theoretisch nur ein Summierer und ein Dividierer erforderlich sind, falls der Term dn/dt sowie die 6 Summanden dC_i/dt mit geeigneten passiven Netzwerken simuliert werden können. Daß dies möglich ist, soll in Abschnitt 3. gezeigt werden.

Abb. 2 zeigt das Blockschaltbild der Rechenschaltung. Als Eingangssignal dient die dem Neutronenfluß proportionale Ausgangsspannung eines linearen Gleichstromverstärkers (Typ HR 10 von AEG, Zeitkonstante ca. 10 ms), der den Strom einer im Reaktor installierten Ionisationskammer mißt. Bei SNEAK-1 war es eine V -unkompensierte und moderierte BF_3 -Kammer der Fa. Reuter + Stokes (RSN 77A), die am Corerand installiert war. Ihre Empfindlichkeit beträgt $3 \cdot 10^{-13}$ A/n/cm²s für thermische Neutronen. Bei einer Reaktorleistung von 10 W wurden $1.4 \cdot 10^{-6}$ A gemessen. Wegen dieser hohen Empfindlichkeit ist das Detektorrauschen gegenüber dem Reaktorrauschen vernachlässigbar.

Die Ausgangsspannung des Dividierers im RM ist proportional zu $\Delta k/(k \cdot \beta)$.

3. Programmierung

Wenn man Gleichung (7) in eine elektrische Schaltung übersetzen will, müssen Maßstabsfaktoren eingeführt werden. Einer bestimmten Ausgangsspannung U_a wird eine bestimmte Reaktivität mit Hilfe der Faktoren q und p zugeordnet; q ist der Proportionalitätsfaktor des Dividierers, und p verknüpft U_a/q mit ρ . Die Eingangsspannung braucht der Neutronenkonzentration nur proportional zu sein, so daß eine Leistungseichung nicht erforderlich und die Ausgangsspannung des Meßverstärkers für die Programmierung identisch mit n ist. Die Ausgangsspannung beträgt dann

$$(8) \quad U_a = q \cdot p \cdot \rho = \frac{q}{n} \left[\frac{p}{\beta k} \left(\frac{dn}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt} - S \right) \right] \quad \text{Volt}$$

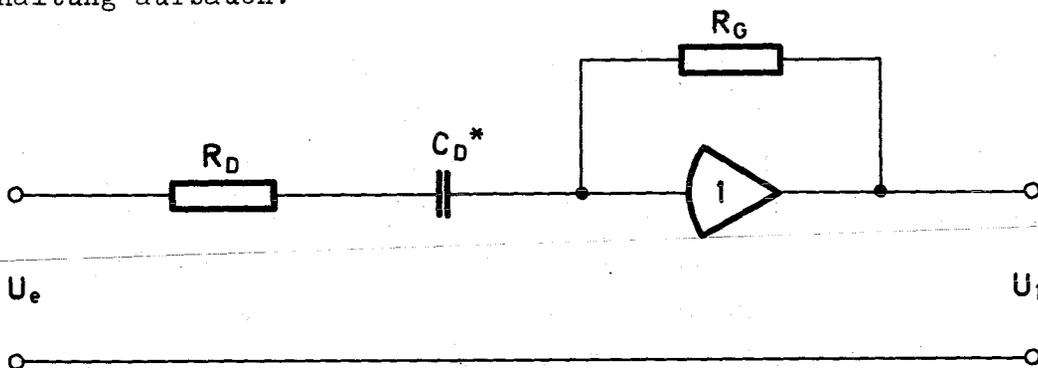
und ist der Reaktivität proportional, wenn diese in Dollar (\$) angegeben wird.

Bei der Programmierung wird von dieser Gleichung ausgegangen. Warum nicht wie in /3/ $\Delta k/k$ sondern $\Delta k/(k\beta)$ berechnet wird, wird am Schluß von Abschnitt 3. näher erläutert.

Es werden nun die Summanden in der eckigen Klammer von (8) der Reihe nach durch elektrische Schaltungen dargestellt:*)

a) Prompter Term $\frac{p}{\beta k} \cdot \frac{dn}{dt}$

Mit einem nichtbeschalteten (offenen) Rechenverstärker läßt sich folgende Schaltung aufbauen:



*) Das Grundprinzip dieser Programmierung wurde aus /3/ übernommen.

Wenn der Verstärker eine sehr große Spannungsverstärkung V_0 und einen sehr großen Eingangswiderstand hat, wie es bei nichtbeschalteten Rechenverstärkern der Fall ist, darf für eine sinusförmige Eingangsspannung mit der Kreisfrequenz ω geschrieben werden:

$$(9) \quad \frac{U_1}{U_e} = - \frac{R_G}{R_D + \frac{1}{j\omega C_D^*}}$$

bzw.

$$(10) \quad U_1 = -j\omega \cdot \frac{R_G C_D^*}{j\omega C_D^* R_D + 1} \cdot U_e$$

Für eine beliebige Eingangsspannung U_e besteht dann der Zusammenhang

$$(11) \quad U_1 = -R_G \cdot C_D^* \cdot \frac{dU_e}{dt}$$

falls sich U_e aus sinusförmigen Einzelschwingungen zusammensetzt, für die

$$(12) \quad \left| j\omega C_D^* R_D \right| \ll 1$$

erfüllt ist.

Wird $U_e = -n$ gesetzt, sowie $R_G \cdot C_D^* = (p/\beta) \cdot l$ gemacht, so ist die Ausgangsspannung U_1 bis auf den Faktor $1/k$ gleich dem Summanden in der eckigen Klammer von (8).

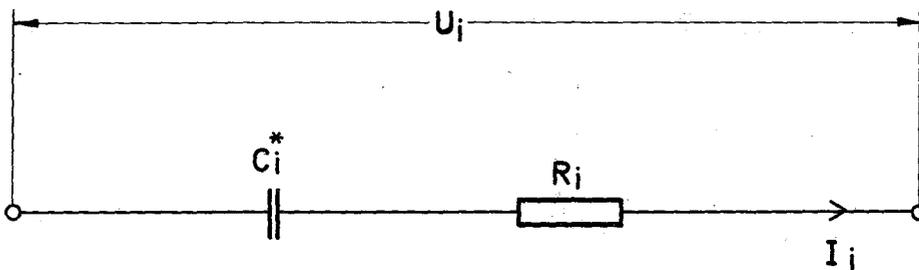
Der Widerstand R_D bildet zusammen mit dem Kondensator C_D^* eine Zeitkonstante, die verhindert, daß das Rauschen in der Eingangsspannung einen wesentlichen Beitrag zur Spannung U_1 liefern kann. Die Bedingung gemäß (12) ist für Frequenzen $f \leq 15$ Hz hinreichend genau erfüllt, wenn $R_D \cdot C_D^*$ nicht größer als 10^{-3} s gemacht wird. Erfahrungsgemäß verlaufen die Leistungsänderungen bei allen SNEAK-Experimenten relativ langsam, so daß größere Frequenzen als 15 Hz im prompten Term praktisch nicht enthalten sind. R_D kann dann Null sein, wenn die Reaktivität mit elektromechanischen Schreibern registriert wird, die ja durch ihre Trägheit Tiefpasseigenschaften haben.

b) Verzögerter Neutronenterm $\frac{\rho - \beta}{\Lambda} \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt}$

Um eine Schaltung zu finden, die den zweiten Term in der eckigen Klammer von (8) erzeugt, muß von (2) ausgegangen werden. Diese Gleichung kann auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$(13) \quad \rho - \beta = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{dC_i}{dt} \cdot \frac{1}{\beta_i} + \lambda_i C_i \cdot \frac{1}{\beta_i} \right)$$

Einen analogen Ausdruck erhält man aber für die Spannung über einem RC-Glied.



Für die Kondensatorladung Q_i zur Zeit t ist die Spannung über der Reihenschaltung

$$(14) \quad U_i = \frac{dQ_i}{dt} \cdot R_i + \frac{Q_i}{C_i^*}$$

Ein Koeffizientenvergleich zwischen (13) und (14) führt zu

$$(15) \quad \frac{Q_i}{C_i^*} = \frac{1}{\beta_i} \cdot C_i$$

und

$$(16) \quad R_i \cdot \frac{dQ_i}{dt} = \frac{1}{\beta_i} \cdot \frac{dC_i}{dt}$$

Wird außerdem

$$(17) R_i C_i^* = \frac{1}{\lambda_i}$$

gemacht, sowie $U_i = n$ gesetzt, so ergibt sich für den Strom durch das RC-Glied:

$$(18) I_i = \frac{dQ_i}{dt} \cdot \frac{1}{k} = \frac{1}{R_i \beta_i} \cdot \frac{dC_i}{dt} \cdot \frac{1}{k}$$

Das so dimensionierte RC-Glied kann einem Rechenverstärker als komplexer Eingangswiderstand vorgeschaltet werden. Mit der Eingangsspannung $U_i = n$ und dem Gegenkopplungswiderstand R_G erhält man dann als Ausgangsspannung

$$(19) U_{2i} = - I_i R_G = - \frac{1}{R_i \beta_i} \cdot \frac{dC_i}{dt} \cdot \frac{R_G}{k}$$

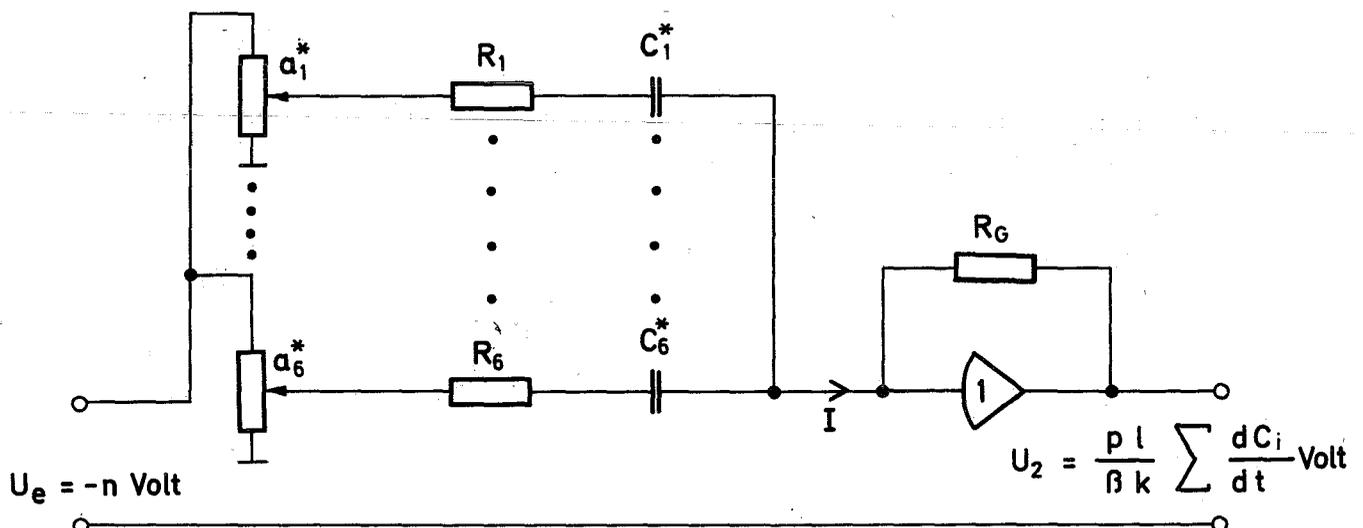
Diese wird identisch mit dem Summanden des verzögerten Terms, wenn die Eingangsspannung U_i noch mit dem Faktor

$$-a_i \cdot p \cdot R_i / R_G$$

multipliziert wird ($a_i = \beta_i / \beta$). Das bedeutet aber, daß die Spannung U_i von einem Potentiometer abgegriffen werden muß, an dem die Spannung $-n$ liegt, und an dem der Koeffizient

$$(20) a_i^* = a_i \cdot p \cdot \frac{R_i}{R_G}$$

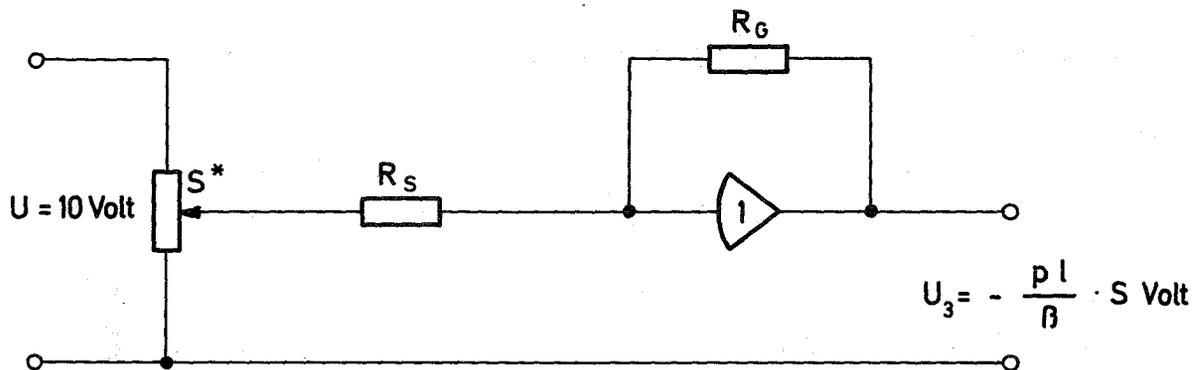
eingestellt ist. Beschaltet man den Verstärkereingang mit 6 RC-Gliedern, die für jede Gruppe der verzögerten Neutronen wie beschrieben dimensioniert sind, ist die Ausgangsspannung gleich dem gesamten Term der verzögerten Neutronen:



Diese Schaltung erzeugt den gewünschten Term für beliebige Eingangssignale exakt. Sie ist ein vollkommenes elektrisches Analogon.

c) Quellterm $-\frac{p \cdot l}{\beta \cdot k} \cdot S$

Der Quellterm ist für die einschränkende Annahme $k = 1$ konstant. Er wird daher an einem Potentiometer eingestellt, an dem eine konstante Spannung liegt, deren Betrag gleich der Recheneinheit (10 V) ist. Diese Spannung muß eine der Eingangsspannung n entgegengesetzte Polarität haben (Minuszeichen vor dem Quellterm in (8)). Der Potentiometerabgriff wird über einen Widerstand R_S mit dem Eingang eines Rechenverstärkers verbunden:



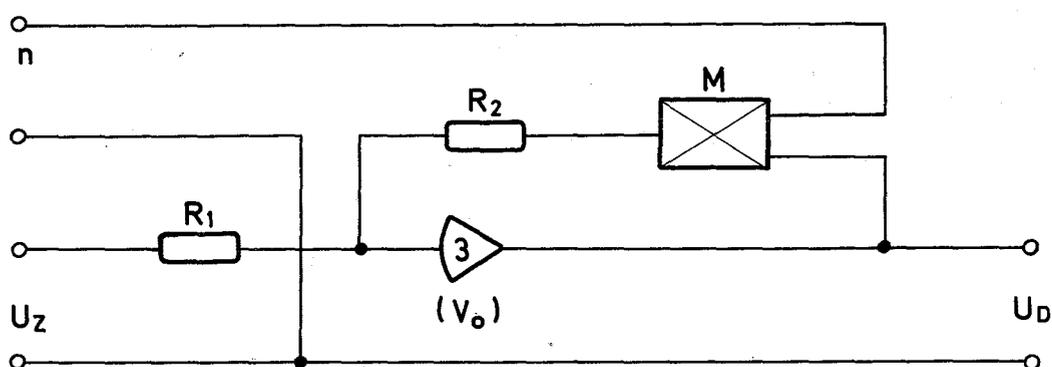
Die Ausgangsspannung der Schaltung ist bis auf den Faktor $1/k$ gleich dem Quellterm in (8), wenn am Potentiometer der Koeffizient

$$(21) S^* = \frac{p \cdot l}{\beta \cdot 10} \cdot \frac{R_S}{R_G} \cdot S$$

eingestellt wird.

Weil dieser Wert eingestellt und nicht aus dem Eingangssignal abgeleitet wird, muß bei Bereichsumschaltung des Gleichstrommeßverstärkers der Proportionalitätsfaktor des Quellterms im gleichen Maß geändert werden. Das geschieht mit Relais, die bei Bereichsänderung einen entsprechend anderen Widerstand R_S einschalten. Wenn z.B. der Meßverstärker um einen Faktor 2 empfindlicher geschaltet wird, wird R_S durch $R_S/2$ ersetzt und damit auch die Spannung U_3 verdoppelt. Die S^* -Potentiometer-einstellung bleibt dabei unverändert (Abb. 3).

Die 3 beschriebenen Schaltungsgruppen sind im RM mit ein und demselben Rechenverstärker realisiert und dadurch zu einer Schaltung zusammengefaßt. Am Eingang des Verstärkers werden die Ströme aus den einzelnen Schaltungen summiert, und am Ausgang kann eine Spannung abgenommen werden, die gleich dem Wert des Ausdrucks in der eckigen Klammer von (8) ist. Diese Spannung (U_Z) wird einem Dividierer als Divident zugeführt. Der Divisor ist die Eingangsspannung n . Der Dividierer ist gemäß folgender Abbildung aufgebaut:



Ein Servomultiplizierer (Proportionalitätsfaktor $-\frac{1}{q}$) liegt im Rückkopplungszweig eines Rechenverstärkers, der dann die Ausgangsspannung

$$(22) U_D = -q \frac{\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_Z}{n}}{1 - q \frac{R_1 + R_2}{V_o R_1 n}}$$

hat. Diese ist dem Quotienten U_Z/n proportional, wenn der Verstärkungsfaktor V_o genügend groß ist:

$$\lim_{V_o \rightarrow \infty} U_D = -q \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{U_Z}{n}$$

mit $R_1 = R_2$ wird

$$U_D = -q \cdot \frac{U_Z}{n} \cdot$$

Wenn U_Z und n ungleiche Polarität haben, kann am Ausgang des Dividierers eine Spannung $q \cdot p \cdot q$ Volt abgenommen werden. Sie steht zur Registrierung mit Schreibern bzw. zur Anzeige mit einem Voltmeter zur Verfügung.

Verschiedene Reaktivitätsmeßbereiche erhält man mit verschiedenen Gegenkopplungswiderständen für den Summierverstärker. Das geht anschaulich aus der folgenden Schreibweise von Gleichung (8) hervor:

$$(23) \quad q \cdot p \cdot g = \frac{q}{n} \cdot U_Z = \frac{q}{n} \left[C_D^* \frac{dn}{dt} R_G + \sum_{i=1}^6 I_1 a_i^* R_G - S^* 10 \frac{R_G}{R_S} \right] \text{ Volt}$$

Bei einer Änderung des Gegenkopplungswiderstandes um ΔR_G wird $q \cdot p \cdot g$ um den Faktor $(R_G + \Delta R_G)/R_G$ geändert.

Diese Rechenschaltung hat im Vergleich zu der in /3/ beschriebenen den Vorteil, daß der relativ schlecht bekannte Wert β nur in die Berechnung des prompten Terms eingeht, der bei fast allen Experimenten vernachlässigbar ist.

Es ist auch möglich, die Anzeige in Prozent $\Delta k/k$ zu erhalten. Dazu wird der Eingangswiderstand des Dividierers um den Faktor $\sqrt{\beta}$ geändert. Dann ist allerdings das Ergebnis wie in /3/ nicht genauer als β selbst.

Wenn das Eingangssignal des RM eine untere Schwelle (0.5 V) unterschreitet, rechnet der Dividierer nicht mehr mit der spezifizierten Genauigkeit. Aus diesem Grund wird ein elektronischer Schwellwertanzeiger (Abb. 4) verwendet, der ein Kontrollämpchen dann an Spannung legt, wenn diese Schwelle unterschritten wird. Das Lämpchen wird ausgeschaltet, wenn das Eingangssignal die Schwelle wieder überschreitet. Nach Möglichkeit soll beim Ansprechen dieses Indikators auf einen empfindlicheren Bereich des Meßverstärkers umgeschaltet werden.

4. Dimensionierung und Einstellung der Parameter

Bei der Dimensionierung wurden folgende Gesichtspunkte beachtet:

- a) Die Potentiometer, an denen für eine nachfolgende Schaltung eine Spannung abgegriffen wird, müssen im Vergleich zum Lastwiderstand niederohmig sein.

- b) Die Werte, die an Koeffizientenpotentiometern eingestellt werden, dürfen nicht zu klein sein, weil ein Einstellfehler für kleine Koeffizienten relativ größer ist als für große.
- c) Die Festwiderstände müssen induktions- und kapazitätsarm sein.
- d) Der Gegenkopplungswiderstand eines Rechenverstärkers darf einen bestimmten vom Hersteller angegebenen Wert nicht überschreiten, weil sonst die Verstärkerlinearität abnimmt.
- e) Die Recheneinheitsspannung muß hochstabil sein (Abb. 5).

Wird $p/R_G = M$ gesetzt, so können die in Abschnitt 3. abgeleiteten Dimensionierungsvorschriften folgendermaßen geschrieben werden:

$$(24) C_D^* = \frac{M l}{\beta}$$

$$(25) R_D C_D^* \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$(26) C_i^* = \frac{1}{\lambda_i R_i}$$

$$(27) a_i^* = a_i \cdot M \cdot R_i$$

$$(28) S^* = \frac{S M l R_S}{10 \beta} \cdot$$

M muß so gewählt werden, daß einmal die Forderungen a), b) und d) erfüllt sind und außerdem für C_i^* , R_G und p möglichst glatte Werte erhalten werden. Als günstigster Wert ergibt sich

$$M = 5 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}.$$

Mit diesem Wert, mit den Gleichungen (24) bis (28) und mit den Reaktorparametern für SNEAK-1 kann die Schaltung dimensioniert werden:

a) Reaktorparameter für SNEAK-1

Multigruppen-Diffusionsrechnungen lieferten für SNEAK-1 folgende Effektivwerte:

$$l = 1.1 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

$$\beta = 7.09 \cdot 10^{-3}$$

Tabelle 1

i	a_i	λ_i/s^{-1}
1	0.043	3.940
2	0.162	1.410
3	0.401	0.340
4	0.178	0.125
5	0.187	0.032
6	0.029	0.013

b) Prompter Term

Mit (24) und (25) erhält man

$$C_D^* = 775 \text{ pF}$$

$$R_D \sim 1 \text{ M } \Omega$$

R_D wird an einem 2 M Ω -Trimpotentiometer eingestellt.

c) Verzögerter Term

Die a_i^* -Koeffizienten sollen zwischen 0 und 1 liegen. Sie wurden in einer vorläufigen Rechnung (gemäß (26) und (27)) zu 0.5 angenommen. Man erhält so vorläufige Werte. Für C_i^* wird dann ein genormter Wert gewählt, der möglichst nahe an dem vorläufigen liegt, und mit dem die endgültigen a_i^* - und R_i -Größen bestimmt werden können.

Handelsübliche Kondensatoren müssen ausgemessen werden, so daß der endgültigen Dimensionierung diese Werte zugrunde gelegt werden können.

Für SNEAK-1 erhielt man:

Tabelle 2

i	$C_i^*/\mu F$	$R_i/k\Omega$	a_i^*
1	2.17	116.70	0.253
2	9.95	71.53	0.581
3	100.97	29.13	0.584
4	97.12	82.37	0.731
5	411.99	75.87	0.709
6	200.56	383.58	0.559

Die a_i^* -Koeffizienten werden an 3 $k\Omega$ -Trimpotentiometern eingestellt. Für die R_i -Widerstände werden Kombinationen von Trimpotentiometern mit Festwiderständen gewählt.

d) Meßbereiche

Durch Umschalten von 6 Gegenkopplungswiderständen des Summierverstärkers können 6 verschiedene Meßbereiche gewählt werden:

Tabelle 3

Bereich	Vollausschlag (\$)	$R_G/k\Omega$
1	5.0	4
2	2.0	10
3	0.5	40
4	0.1	200
5	0.02	1000
6	0.005	4000

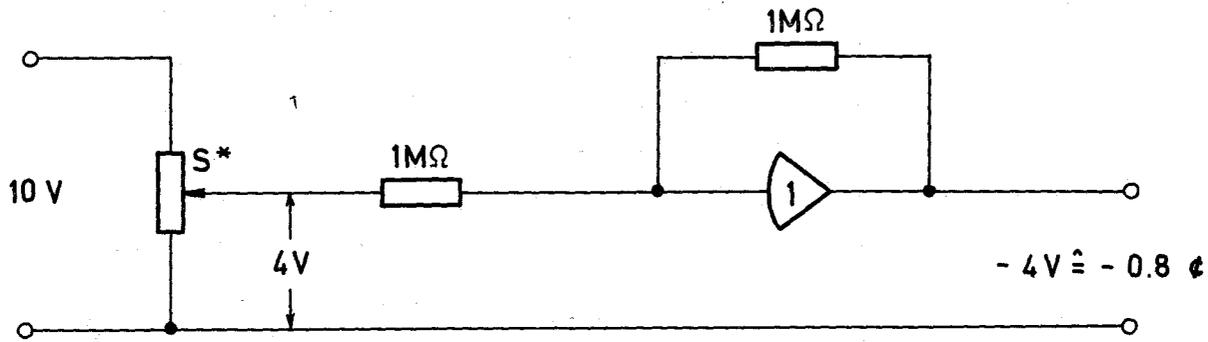
Damit ist das ~~SNEAK-RM~~ 28mal empfindlicher als das in /3/ beschriebene.

Um den Gegenkopplungsweig des Verstärkers beim Bereichsschalten nicht zu öffnen, wurde ein beim Schalten kurzschließender Schalter gewählt.

e) Quellterm

Der S^* -Koeffizient wird zweckmäßigerweise an einem 100Ω -Potentiometer eingestellt. Die R_S -Widerstände werden so gewählt, daß der Quellterm für jeden Meßverstärkerbereich richtig berücksichtigt wird:

Bei einer konstanten Reaktorleistung von 3.3 Watt war SNEAK-1 mit eingefahrener Anfahrquelle ca. 0.8β unterkritisch. Der Ionisationskammerstrom betrug dann $4.5 \cdot 10^{-7}$ A und wurde auf dem Meßverstärkerbereich $1 \cdot 10^{-6}$ A gemessen. -0.8β können auf dem 2β -Bereich mit dem S^* -Potentiometer gut eingestellt werden, wenn R_S zu $1 \text{ M}\Omega$ gewählt wird:



Alle anderen R_S -Widerstände erhält man mit der Bereichsabstufung des Meßverstärkers:

Tabelle 4

Bereich/A	$R_S/\text{K}\Omega$
$1 \cdot 10^{-11}$	-
$1 \cdot 10^{-10}$	-
$3 \cdot 10^{-10}$	-
$1 \cdot 10^{-9}$	1
$3 \cdot 10^{-9}$	3
$1 \cdot 10^{-8}$	10
$3 \cdot 10^{-8}$	30
$1 \cdot 10^{-7}$	100
$3 \cdot 10^{-7}$	300
$1 \cdot 10^{-6}$	1000
$3 \cdot 10^{-6}$	3000
$1 \cdot 10^{-5}$	10000
$3 \cdot 10^{-5}$	30000
$1 \cdot 10^{-4}$	100000

Für die 3 empfindlichsten Verstärkerbereiche sind keine R_S -Widerstände eingebaut. Wenn nämlich die Reaktorleistung so gering ist, daß mit der Ionisationskammer Ströme von nur 10^{-10} A gemessen werden, ist der Reaktor mit Quelle mehr als 5 \$ unterkritisch.

f) Die gesamte Schaltung

Abb. 6 ist der Schaltplan des Gerätes. Alle Verstärker und der Servomultiplizierer sind Einschübe für die transistorisierten Analogrechner TR 10 bzw. TR 20 der Fa. EAI. Durch Buchsen auf den Frontplatten sind alle Anschlußstellen der Einschübe von vorn zugänglich. Die Verstärker sind zerhackerstabilisiert und dürfen mit 500Ω belastet werden. Sie sind übersteuerungssicher und haben eine Zeitkonstante < 0.1 ms. Die Linearität beträgt ca. 0.1 %. Der Servomultiplizierer enthält einen Gleichstrommotor, der von einem Gleichstromverstärker angesteuert wird. Mit seiner Achse sind die Abgriffe von 4 Präzisionsdrahtpotentiometern zu je $5 \text{ K}\Omega$ verbunden. Seine Einstellgeschwindigkeit liegt bei ca. 20 ms. Der statische Einstellfehler beträgt ebenso wie die Potentiometerlinearität 0.1 %.

Verstärker 2 und 6 sind Eingangsverstärker. Ihr Verstärkungsfaktor beträgt 1. Sie haben die Aufgabe, die direkte Belastung des Meßverstärkers durch die verhältnismäßig niederohmigen R_i -Potentiometer zu verhindern und störende Rückwirkungen des Dividierers auf die $R_i C_i^*$ -Zeitkonstanten zu vermeiden. Die C_i^* -Kondensatoren sind Metallfolie-Lacktypen der Fa. Bosch. Ihre Eigeninduktivität liegt bei 20 nH. Da ihr Isolationswiderstand nur ca. $50 \text{ M}\Omega$ beträgt, sind Leckströme nicht vernachlässigbar. Sie führen besonders bei Messungen auf dem 0.5 μ -Bereich zu einem Nullpunktfehler, der bei quasistatischen Änderungen des Eingangssignals diesem proportional ist. Mit einem Kompensationsnetzwerk kann ein derartiger Nullpunktfehler eliminiert werden, indem ein dem Leckstrom entgegengerichteter Strom von der Eingangsspannung abgeleitet und zum Eingang von Verstärker 1 geführt wird.

Wenn Schalter S2 auf Position 2 steht, werden alle C_i^* -Kondensatoren über einen mit RE bezeichneten $5\text{ K}\Omega$ -Widerstand entladen. Damit können undefinierte Anfangsladungen, die sich beim Einschalten des RM aufbauen, beseitigt werden. Die größte Entladezeitkonstante beträgt 2 s. Bei konstanter Reaktorleistung muß nach Einschalten des Gerätes und nach Bereichsschaltung des Meßverstärkers normalerweise eine Wartezeit von ca. $R_i C_i^* \max = 77\text{ s}$ eingehalten werden, bevor sich die C_i^* -Kondensatoren auf den richtigen Wert aufgeladen haben und die Reaktivitätsanzeige korrekt ist. Da diese Wartezeit in den meisten Fällen sehr lästig ist, wurde eine Möglichkeit vorgesehen, mit der die Zeitkonstanten kurzzeitig verringert werden können. Wenn Taste T1 gedrückt wird, werden alle R_i -Widerstände mit Hilfe eines Relais von $3,3\text{ K}\Omega$ -Widerständen überbrückt und so $R_i C_i^* \max = 77\text{ s}$ durch 66 s ersetzt.

Verstärker 1 ist der Summierverstärker. Der Dividierer ist mit Verstärker 3 und mit dem in seinem Gegenkopplungszweig liegenden Multiplizierer aufgebaut. Die Nennerspannung muß dem Dividierer auch mit umgekehrtem Vorzeichen zugeführt werden. Diese Vorzeichenumkehr besorgt Verstärker 4. Bei sehr kleiner Reaktorleistung hat das Eingangssignal einen relativ großen Rauschanteil, der ein ständiges Vibrieren des Servomultiplizierers verursacht. Die damit verbundene mechanische Abnutzung kann durch das Einfügen einer Zeitkonstanten von 1 s in den Eingang von Verstärker 6 verringert werden. Dadurch wird nur die effektive Einstellzeit des Servomotors vergrößert. Auf die Funktion der $R_i C_i^*$ -Glieder hat es keinen Einfluß. Wenn die Reaktorleistung hoch und das Rauschen im Eingangssignal vernachlässigbar ist, dreht sich der Motor des Multiplizierers bei sich kontinuierlich ändernder Eingangsspannung ruckweise. Dieser Effekt kommt durch mechanische Reibung der Motorachse und der Potentiometerabgriffe zustande und macht sich durch Stufen im Reaktivitätssignal vor allem dann störend bemerkbar, wenn das Eingangssignal sehr klein ist. Aus diesem Grund kann der Nennerspannung des Dividierers eine 50 Hz-Wechselspannung überlagert werden, die bewirkt, daß der Servomotor nie stehenbleibt, sondern mit dieser Frequenz vibriert und dem Mittelwert der Nennerspannung folgt. Diese 50 Hz-Komponente wird dann durch die Eigenzeitkonstante des Schreibers wieder unterdrückt.

Um auch auf dem empfindlichsten Bereich bei kleiner Reaktorleistung eine brauchbare Anzeige zu bekommen, kann in den Eingang von Verstärker 5 eine Zeitkonstante von 1.2 s eingefügt werden. Mit diesem Verstärker ist es außerdem möglich, das Reaktivitätssignal zu kompensieren und nochmals zu verstärken.

Mit Schalter 11 wird von β - auf pcm-Anzeige ^{*)} umgeschaltet, wenn der R_p -Widerstand zu

$$R_p = \frac{100 \text{ K}\Omega}{\beta \cdot 100} = 141 \text{ K}\Omega$$

eingestellt wird. Dann können die Bereiche 2000, 500, 100, 20 und 5 pcm gewählt werden.

Alle Beschaltungsfestwiderstände sind Kohleschichttypen und haben eine Toleranz von $\pm 0.02 \%$. Alle Koeffizienten werden an 25-gängigen Draht-trimmpotentiometern eingestellt. Sie sind auf der Frontplatte des RM angeordnet. Ebenfalls auf der Frontplatte befindet sich ein Voltmeter, das mit Schalter S10 wahlweise an den Ausgang des Dividierers, des Verstärkers 1 oder 5 geschaltet werden kann.

Die Funktionen der Schalter S2, S3 und S7 werden unter g) beschrieben. Die Bedeutung aller übrigen Bauteile kann aus dem Gesamtschaltbild ersehen werden.

g) Einstellung der Werte

1) a_i^*

Beim Abgleich der a_i^* -Potentiometer wird Schalter S3 auf eine der Stellungen 1 bis 6 geschaltet, je nachdem welcher a_i^* -Koeffizient eingestellt werden soll. Dadurch werden -10 V an den Eingang gelegt, so daß bei richtiger Potentiometereinstellung an der a_i^* -Buchse eine Spannung von $+a_i^* \cdot 10 \text{ V}$ gemessen werden kann.

^{*)} 1 pcm = 0.001 %

2) R_i

Zur Einstellung der R_i -Potentiometer muß Schalter S2 auf Position 2 stehen. Dann wird für die mit Schalter S3 gewählte Gruppe der verzögerten Neutronen an den Ausgangsbuchsen von Verstärker 1 eine Spannung gemessen, die bei richtig eingestellten R_i und a_i^* den Wert $R_G/R_i \cdot a_i^* \cdot 10$ V hat. Die Summenspannung $\sum R_G/R_i \cdot a_i^* \cdot 10$ Volt liegt dann am Verstärkerausgang, wenn Schalter S2 auf Position 1 steht. Die Spannungen werden mit einem Digitalvoltmeter gemessen.

3) R_p, R_D

Die R_p - und R_D -Potentiometer werden mit einer Widerstandsmeßbrücke abgeglichen. Dabei steht Schalter 11 auf Position 1.

4) S^*

Das S^* -Potentiometer kann erst dann mit Hilfe eines Reaktorexperimentes eingestellt werden, wenn alle anderen Parameter bereits richtig eingestellt sind. Wenn, wie bei SNEAK-1, nur der Einfluß einer Anfahrquelle berücksichtigt zu werden braucht, ist die Justierung relativ einfach: Der Reaktor wird z.B. bei ausgefahrener Quelle bei ca. 100 mW Leistung kritisch geregelt, so daß das Reaktivitätsmeter mit ausgeschaltetem Quellterm (Schalter S7) $\rho = 0$ anzeigt. Dann wird die Quelle in den Reaktor eingefahren und gleichzeitig der Quelltermsimulator des RM eingeschaltet. S^* muß dann so eingestellt werden, daß wieder $\rho = 0$ angezeigt wird.

Kommt der Quellterm jedoch durch Spontanspaltungen in einem Plutonium-core zustande, muß bei der S^* -Einstellung anders vorgegangen werden: Zunächst wird der unterkritische Reaktor bei einer Leistung von ca. 100 mW stabilisiert. Dann wird, z.B. mit einem Kontrollstab, ein negativer Reaktivitätsschritt verursacht und während sich die Leistung noch ändert S^* so justiert, daß die gemessene negative Reaktivität konstant bleibt.

Bei SNEAK-1 wurde die S^* -Einstellung bei ca. 100 mW vorgenommen, weil sie bei Leistungen < 100 mW durch das Reaktorraschen und bei Leistungen > 100 mW durch den relativ geringen Quelleinfluß ungenauer wurde.

5) Kompensationspotentiometer

Wenn an den Eingang des RM eine stabilisierte Spannung zwischen 0 und -10 V gelegt wird, kann der Nullpunkt auf dem 0.5 μ -Bereich mit dem Kompensationspotentiometer eingestellt werden.

h) Schreiber

Zur Registrierung von Reaktorleistung und Reaktivität wurden 2 zweifach Linienschreiber der Fa. Hartmann und Braun angeschlossen. Es sind Drehspulschreiber mit der Typenbezeichnung R2/88K. Ihre Einstellzeit beträgt 1.2 s. Pro Meßstelle steht eine Schreibbreite von 100 mm zur Verfügung. Der eine Schreiber befindet sich mit dem Reaktivitätsmeter im Meßraum, der zweite ist in das Kontrollpult der SNEAK-Schaltwarte eingebaut.

Abb. 7 zeigt das in ein 19"-Gestell eingebaute RM. Über dem RM befindet sich der Bereichsschalter für den Meßverstärker, unter ihm der Schreiber.

5. Inbetriebnahme

Um eine Übersteuerung des Verstärkers 1 zu vermeiden, wird Bereichsschalter S1 vor Inbetriebnahme des RM auf den 5 μ -Bereich geschaltet. Während einer Messung muß Schalter S3 auf Position "Messen" stehen. Der Funktionsschalter S2 wird für einige Sekunden nach Anlegen der Eingangsspannung auf Position "Entladen" und dann ebenfalls auf "Messen" geschaltet. Um schon beim Beginn einer Messung eine korrekte Reaktivitätsanzeige zu bekommen, muß immer mit stabiler Reaktorleistung begonnen und solange gewartet werden, bis auf dem 0.5 μ -Bereich $q = 0$ angezeigt wird.

6. Reaktivitätsmessungen

Das RM ist bei SNEAK-1 für viele Reaktivitätsmessungen als Monitorgerät eingesetzt worden. Es funktionierte zufriedenstellend, wenn die Aussteuerung des Meßverstärkers immer ausreichend, d.h. $\geq 5\%$ des eingestellten Bereichs war. Es erwies sich als nützliches Instrument bei Kontrollstab-, Reproduzierbarkeits- und Materialwertmessungen.

Abb. 8 zeigt den Reaktivitätseffekt, wie er durch Ein- und Ausschalten der SNEAK-Corekühlung bei einer Reaktorleistung von ca. 5 W auf dem 0.5 β -Bereich gemessen wurde ("Neutronenfluß" ist hier proportional zu n). Das Rauschen im Reaktivitätssignal ist eine Folge des Rauschens in der Reaktorleistung. Die Ausgangszeitkonstante des RM war bei dieser Messung nicht wirksam.

Abb. 9 zeigt den Reaktivitätsverlauf bei der Eichung eines mit Spaltmaterial beladenen Kontrollstabes. Zu Beginn der Eichung war der Reaktor mit eingefahrenem Stab kritisch. Dann wurde der Stab ganz ausgefahren, in dieser Position ca. 40 s belassen und dann wieder eingefahren. Der abgelesene Wert stimmt bis auf 1.5 % mit dem überein, der mit einer digitalen Auswertemethode erhalten wurde.

Abb. 10 zeigt ein Beispiel, bei dem die Eingangsspannung des RM während der Messung eines Kontrollstabes soweit abgesunken war, daß sich das ruckweise Drehen des Servomotors als falscher Reaktivitätswert des ausgefahrenen Stabes bemerkbar machte. Die Abweichung von dem digital gemessenen Stabwert betrug ca. 15 %.

Abb. 11 ist die gleiche Messung mit eingeschalteter 50 Hz-Erregung des Motors. Sie lieferte einen Wert, der bis auf $\sim 5\%$ mit dem der digitalen Methode übereinstimmte.

Abb. 12 und 13 veranschaulichen die Wirkung der Ausgangszeitkonstanten. Bei zwei ähnlichen Messungen war diese Zeitkonstante einmal wirksam (Abb. 12) und einmal nicht (Abb. 13).

7. Meßgenauigkeit

Die Meßfehler werden im folgenden in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung behandelt:

- a) Die unzureichende Aussteuerung des Meßverstärkers kann Fehler in der Größenordnung von 15 % im Ausgangssignal zur Folge haben. Das Einschalten der Motorerregung vermindert diesen Fehler bis auf einige Prozent.
- b) Bauelementtoleranzen führen zu Fehlern $\cong 1$ %.
- c) Der Einfluß von manuellen Einstellfehlern der Potentiometer kann vernachlässigbar klein gehalten werden, d.h. nur einige Promille betragen, wenn zum Abgleich digitale Meßinstrumente benutzt werden.
- d) Die einfügbaren Glättungszeitkonstanten können zusammen mit der Schreiberzeitkonstanten bei sehr schnellen Vorgängen (Übergangszeiten < 1.2 s) zu einer verzögerten Anzeige führen.
- e) Durch unzureichende Isolationswiderstände der C_1^* -Kondensatoren kann ein für alle Bereiche gleich großer Nullpunktfehler von max. ca. 0.08 % entstehen. Durch richtige Einstellung des Kompensationspotentiometers kann dieser Fehler beseitigt werden.
- f) Wenn die Voraussetzung $k \approx 1$ nicht erfüllt ist, entsteht über den prompten Term und über den Quellterm ein Fehler im Ausgangssignal. Er ist bei allen vorkommenden Messungen < 1 %.

Auf dem 0.5 %-Bereich konnten bei einer Reaktorleistung von ca. 30 W Reaktivitätswerte bis auf ± 0.02 % genau abgelesen werden. Die Reaktivitätsanzeige wird mit dem Signal-Rausch-Verhältnis bei zunehmender Leistung entsprechend dem Faktor \sqrt{n} besser.

8. Verbesserungsmöglichkeiten

a) Die Nullpunktseigenschaften des RM können durch den Einbau von C_i^* -Kondensatoren mit höherem Isolationswiderstand wesentlich verbessert werden. Wenn man die verwendeten Metallfolielacktypen durch Polystyroltypen ersetzt, können die Leckströme um einen Faktor 10^3 reduziert werden. Da diese Kondensatoren jedoch nur bis zu einem Wert von $1\mu F$ erhältlich sind, müssten die berechneten C_i^* -Werte um den Faktor 10 verkleinert und die R_i -Widerstände um den gleichen Faktor vergrößert werden. Um dann die a_i^* -Koeffizienten noch einstellen zu können, müßte Verstärker 2 für 10 V Eingangsspannung 100 V Ausgangsspannung abgeben können. Mit dieser Änderung würde die Nullpunkt-kompensationsschaltung überflüssig werden, weil dann die Leckströme vernachlässigbar sind.

b) Eine weitere Verbesserung kann mit dem Einsatz eines rein elektronischen Multiplizierers nach dem Impulsmodulationsprinzip erreicht werden. Dann würde das RM auch bei Eingangssignalen $< 0.5 V$ ohne besondere Schaltungsmaßnahmen einwandfrei funktionieren. Derartige Multiplizierer kosten jedoch ca. 10.000.- DM und sind damit für ein Monitorgerät wie es das RM darstellt zu teuer.

c) Durch das automatische Betätigen der Taste T_1 könnte die Bedienung vereinfacht werden: Die beim Einschalten des RM bzw. beim Bereichsschalten des Meßverstärkers am Eingang auftretenden Spannungssprünge könnten einen monostabilen Multivibrator anstoßen, der T_1 für eine bestimmte Zeit schließt.

9. Zusammenfassung

Das beschriebene RM ist ein einfaches und empfindliches Reaktor-kontrollinstrument, mit dem Reaktivitätsänderungen schnell festgestellt werden können. Wenn auf die Glättung des Ausgangssignals verzichtet und ein verzögerungsfreies Registriergerät angeschlossen wird, beträgt die charakteristische Zeitkonstante des RM ca. 25 ms.

Die noch bestehenden Unvollkommenheiten könnten durch Verwendung anderer C_1^* -Kondensatortypen sowie eines besseren Multiplizierers beseitigt werden, so daß das RM nicht nur als Monitorgerät, sondern als zuverlässige Reaktivitätsmeßeinrichtung zu verwenden wäre.

Der Verfasser dankt den Herren Dr. F.W.A. Habermann und Dipl.-Phys. P.L. van Velze im Institut für Angewandte Reaktorphysik des Kernforschungszentrums Karlsruhe für die Anregung zum Bau des SNEAK-Reaktivitätsmeters sowie für die wertvolle Unterstützung bei der praktischen Ausführung des Gerätes.

Literatur

- /1/ P. Engelmann et al.: "Aufbau und Versuchseinrichtungen der schnellen kritischen Anordnung Karlsruhe SNEAK"
KFK-471 (1966)

- /2/ L. Barleon et al.: "Comparison of Measurements in SNEAK-1 and ZPR 3-41"
KFK-626 (1967)

- /3/ A.J.W. Andersson and T. Hveding: "A Reactivitymeter design used at HBWR"
HPR 44 (1964)

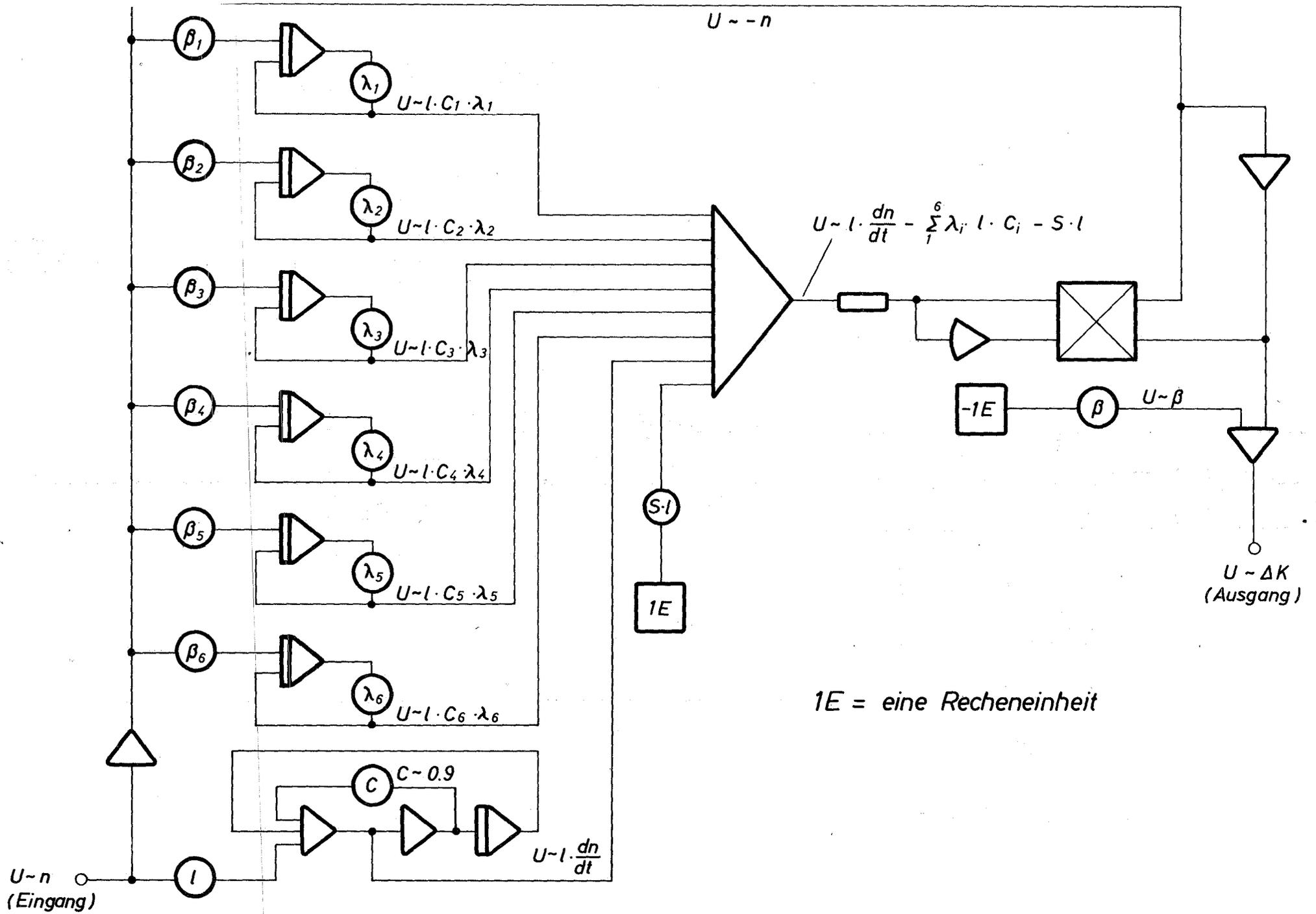


Abb. 1 Analogrechnerprogramm ohne passive Netzwerke

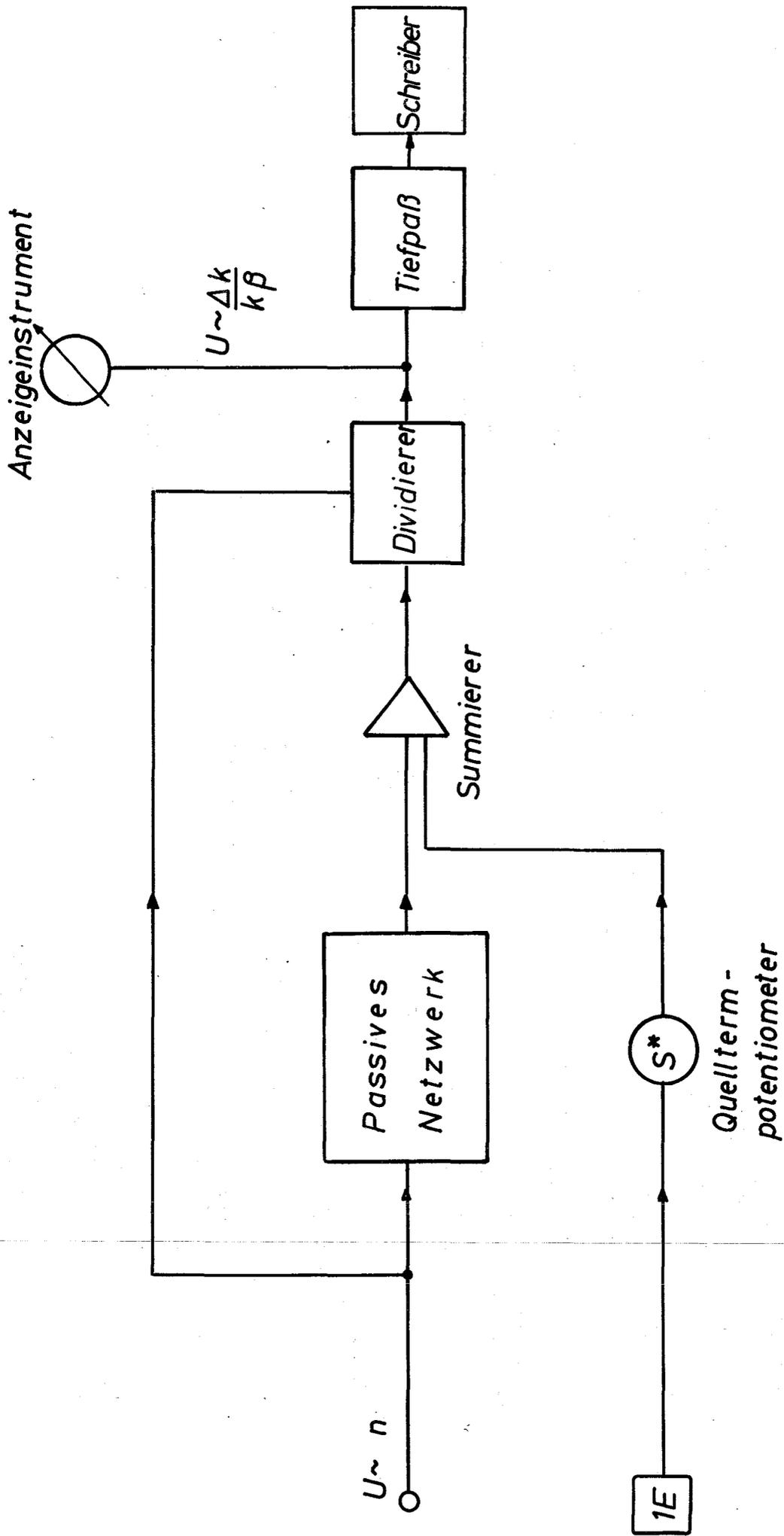
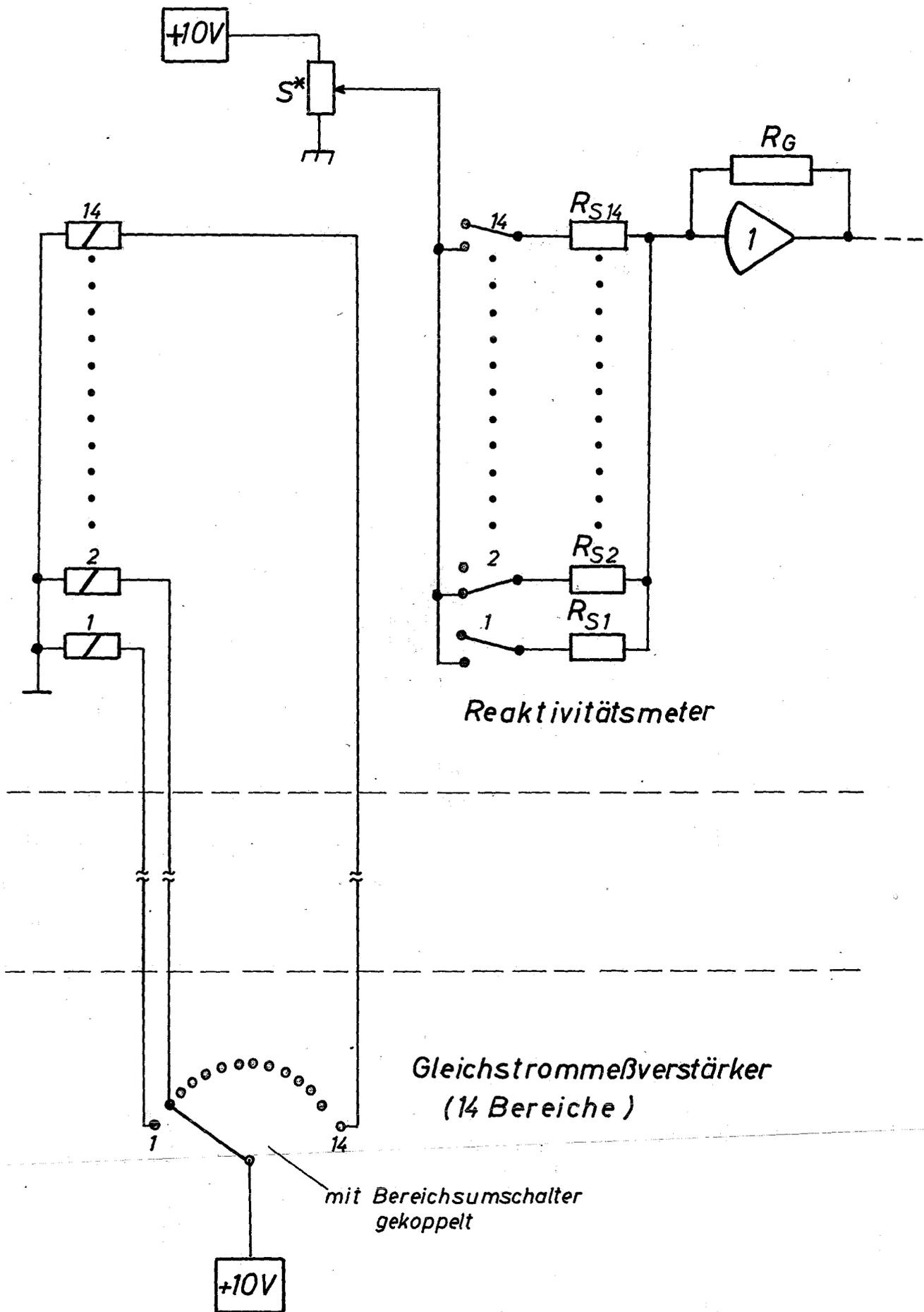


Abb. 2 Blockschaltbild Reaktivitätsmeter



Reaktivitätsmeter

Gleichstrommeßverstärker
(14 Bereiche)

mit Bereichsumschalter
gekoppelt

Abb. 3 Automatische R_S - Umschaltung

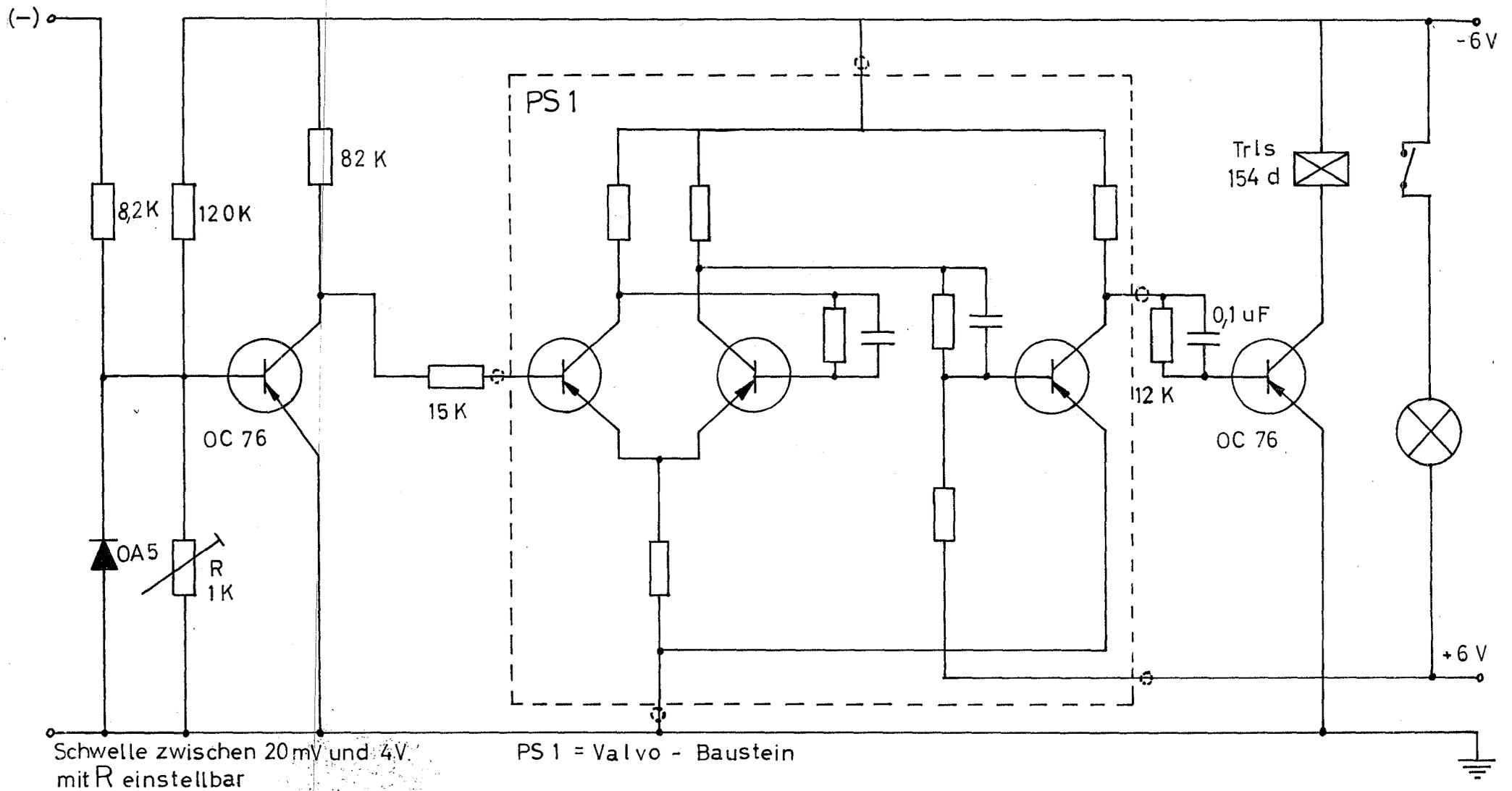
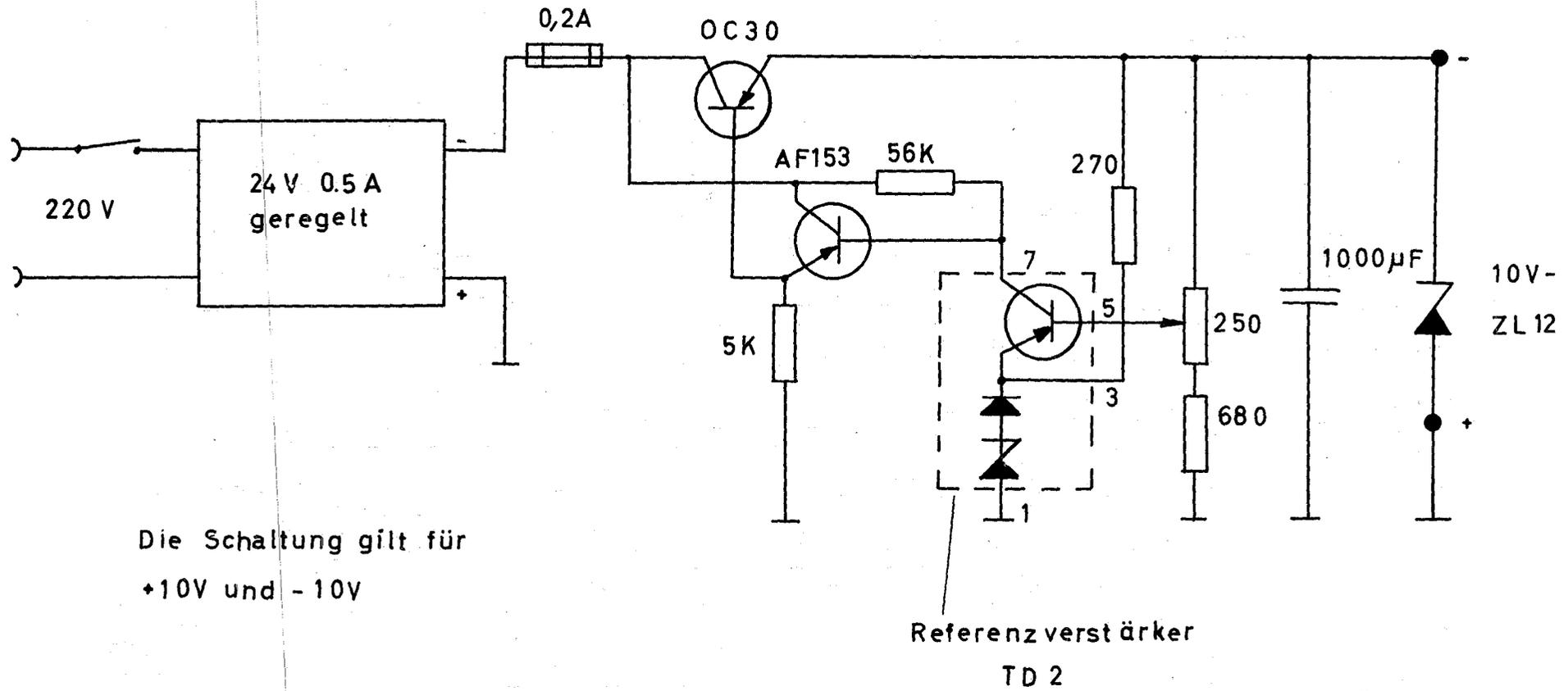


Abb. 4

Elektronischer Schwellwertanzeiger



Die Schaltung gilt für
+10V und -10V

Abb. 5 Spannungsstabilisierung

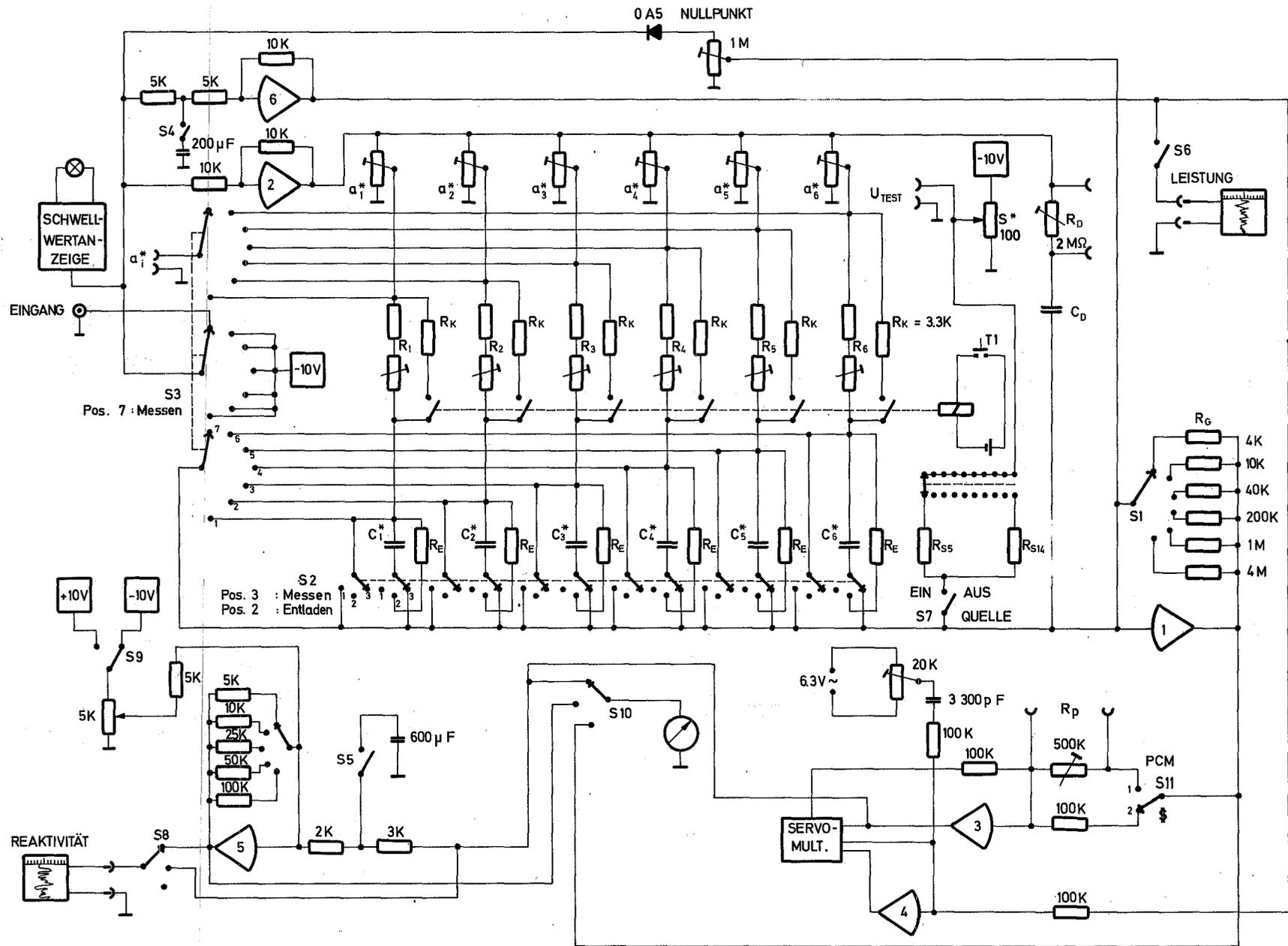


Abb.6 Gesamtschaltplan

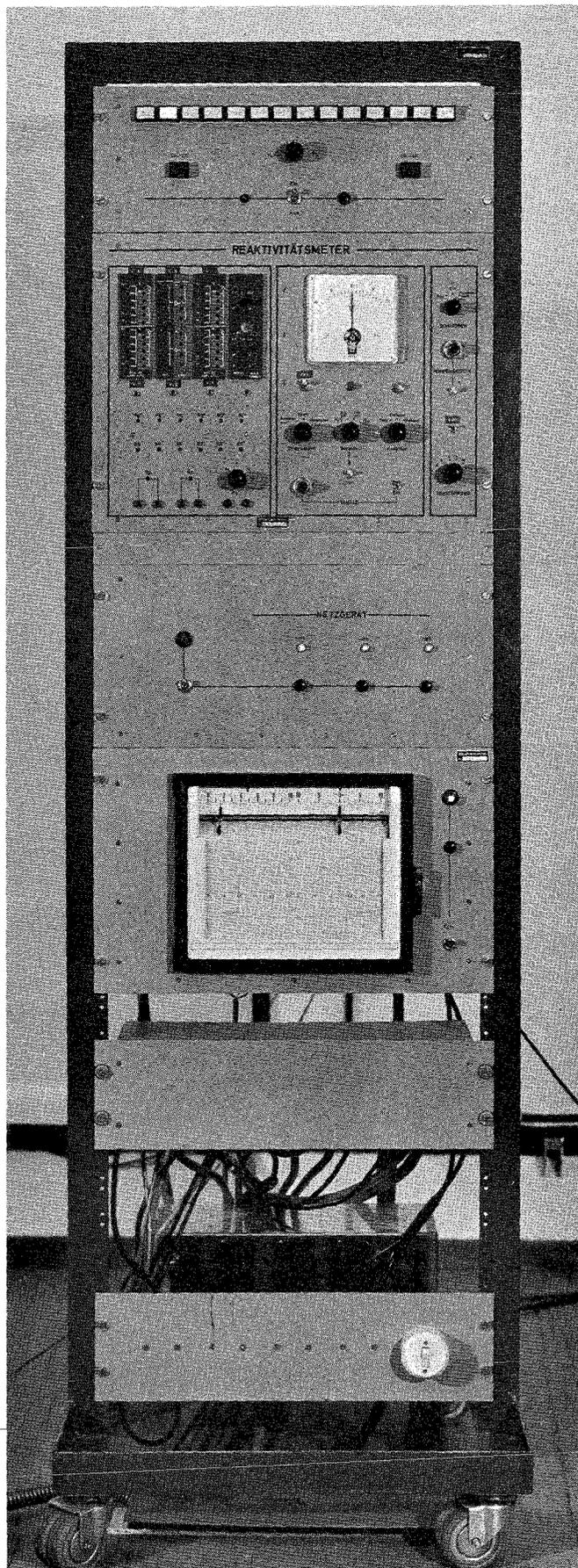


Abb. 7

SNEAK - REAKTIVITÄTSMETER

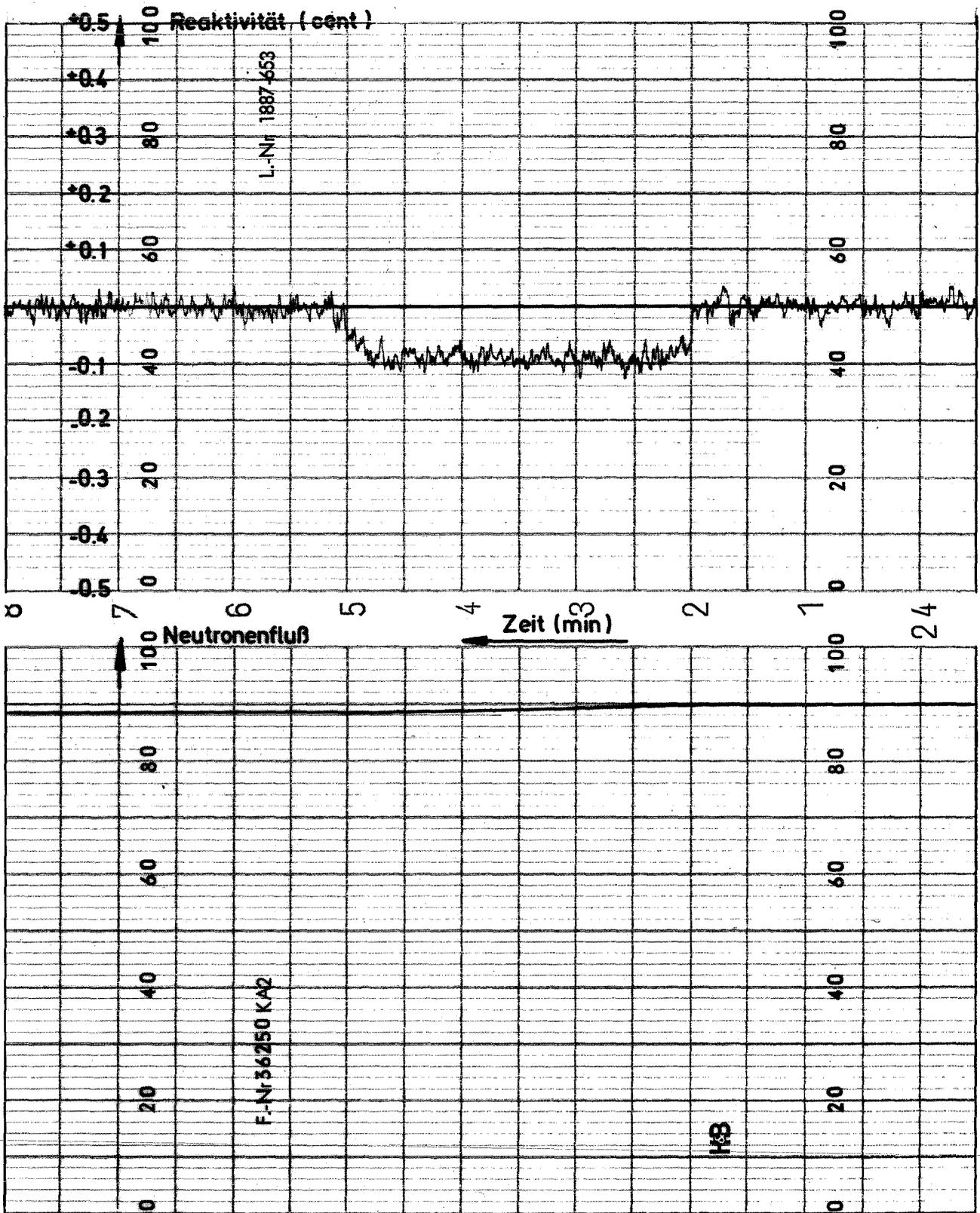


Abb. 8 Ein - und Ausschalten der Corekühlung

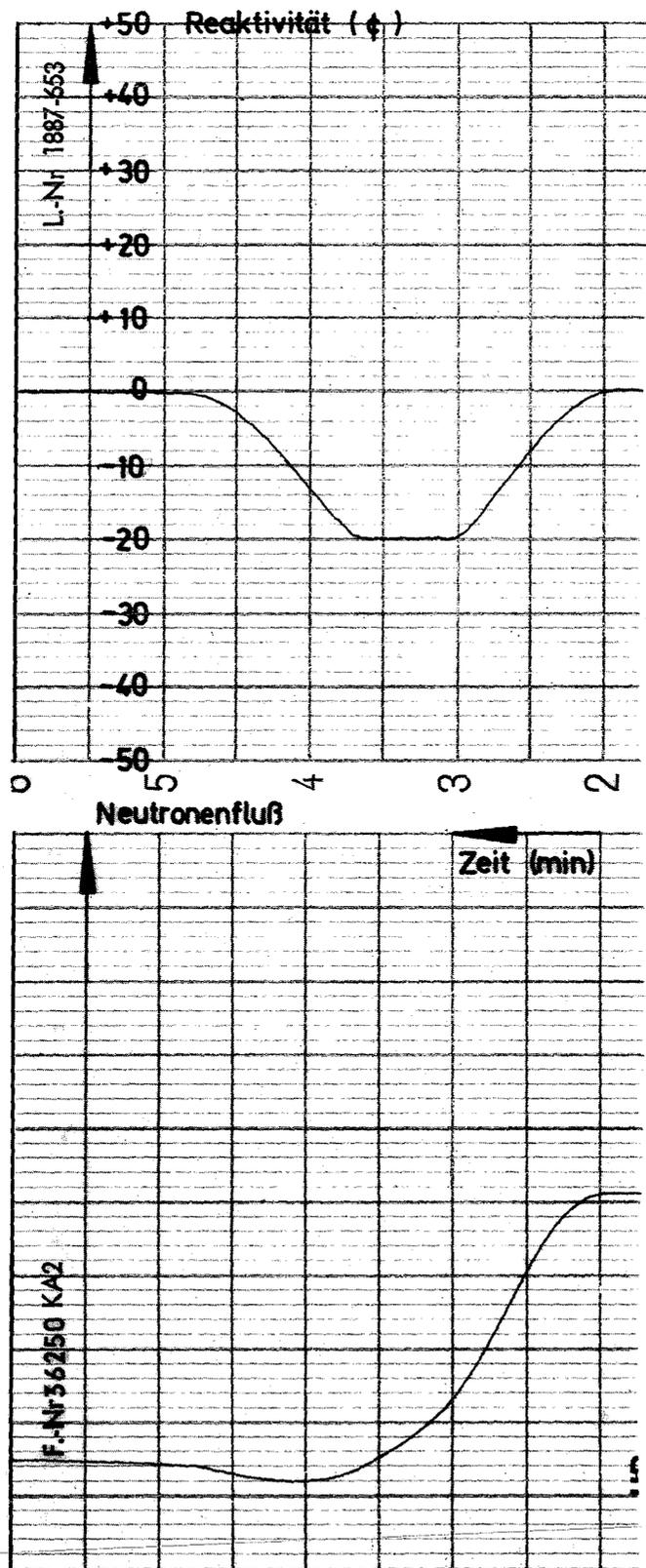


Abb. 9

Kontrollstabeichung

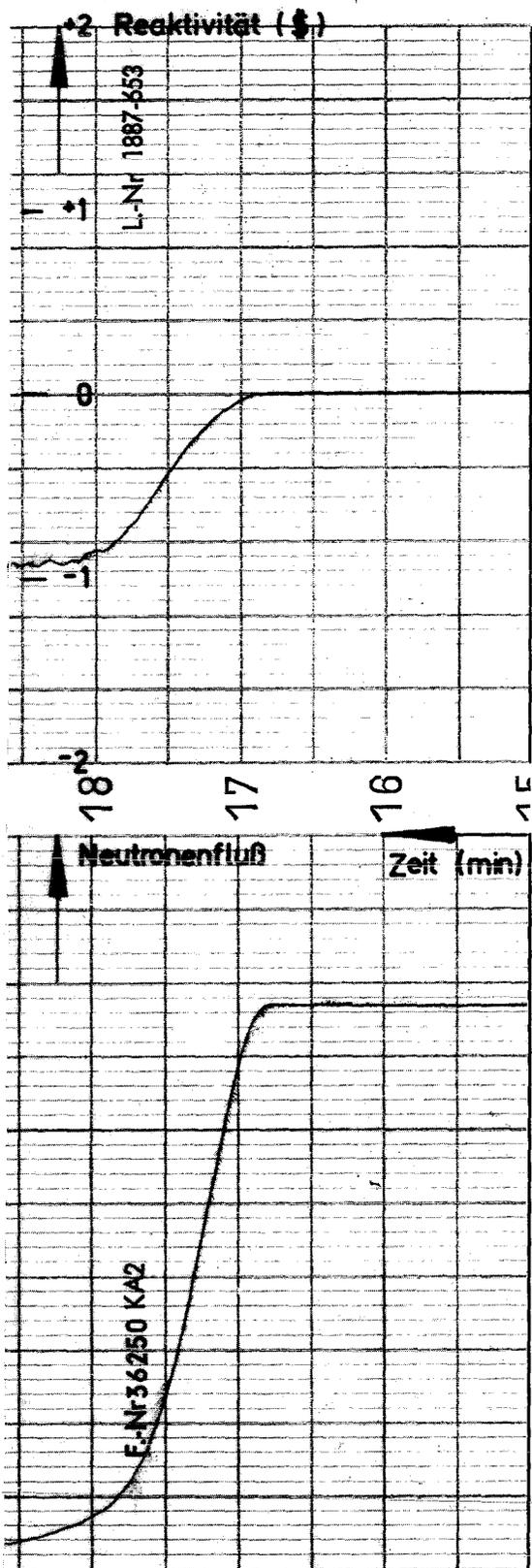


Abb. 11
Motorerregung ein

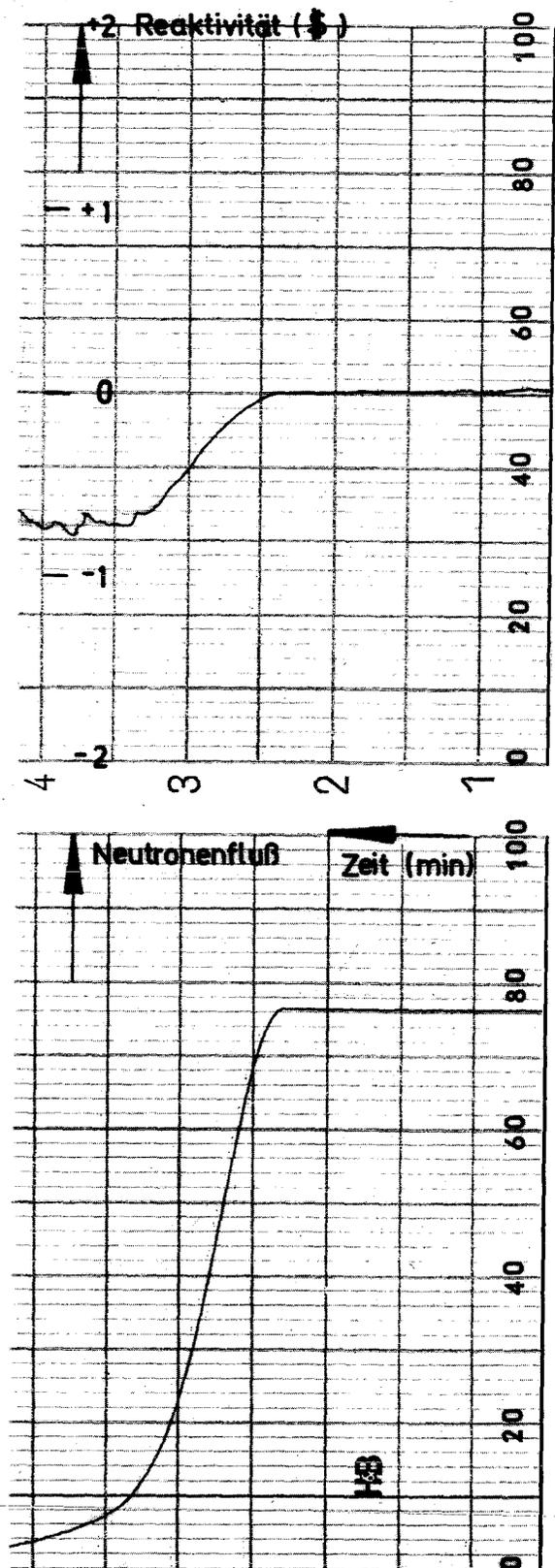


Abb. 10
Motorerregung aus

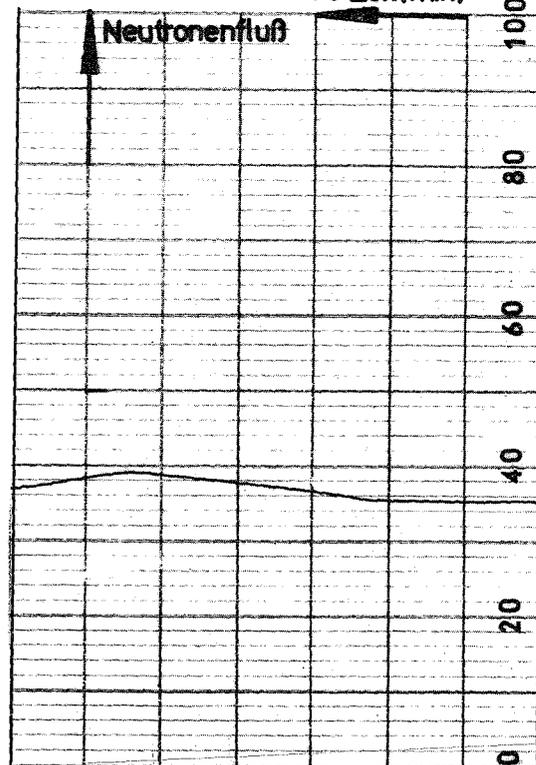
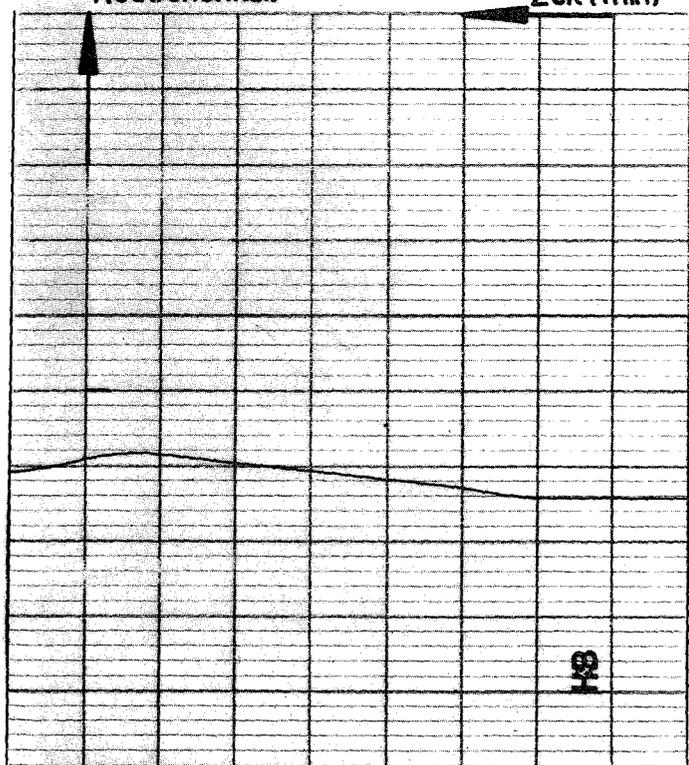
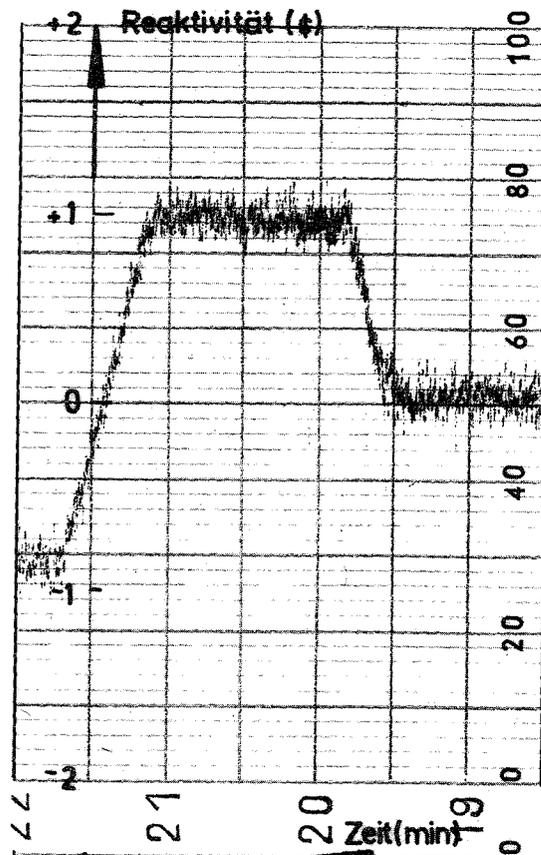
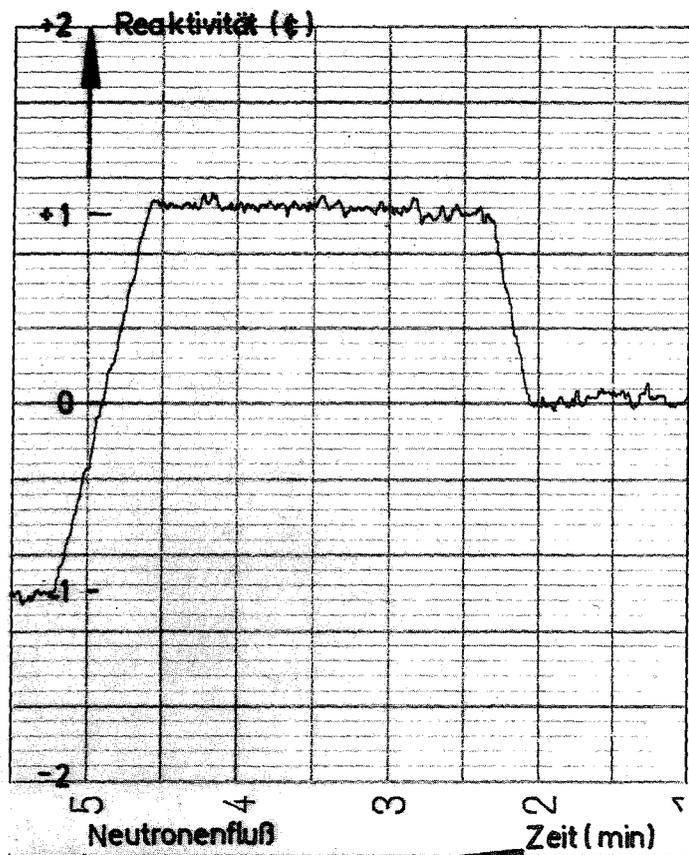


Abb. 13

Messung mit Zeitkonstante

Abb. 12

Messung ohne Zeitkonstante