

Messung von sehr hohen Gleich-
strömen mit aktiven Integratoren
(Methode to measure very high D.C.
currents with active integrators)

J. Gernhardt, D. Groening

IPP III/15

Dezember 1974

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Messung von sehr hohen Gleich-
strömen mit aktiven Integratoren
(Methode to measure very high D.C.
currents with active integrators)

J. Gernhardt, D. Groening

IPP III/15

Dezember 1974

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

IPP III/15

J. Gernhardt
D. Groening

Messung von sehr hohen
Gleichströmen mit ak-
tiven Integratoren

(Methode to measure very
high D.C. currents with
active integrators)

Dezember 1974

Abstract

In order to measure very high D.C. currents (~ 10 kA) a pick-up-coil with an active integrator insulated from ground is used.

The pulse-length of the D.C. current can be several seconds.

Properties of the pick-up coil and the magnetic field produced by the bus-bar current are described.

A description of the integrator and the electrical circuit is given.

$$\frac{1}{2\pi R} \left(\frac{dx}{dt} \right) \cos \alpha$$

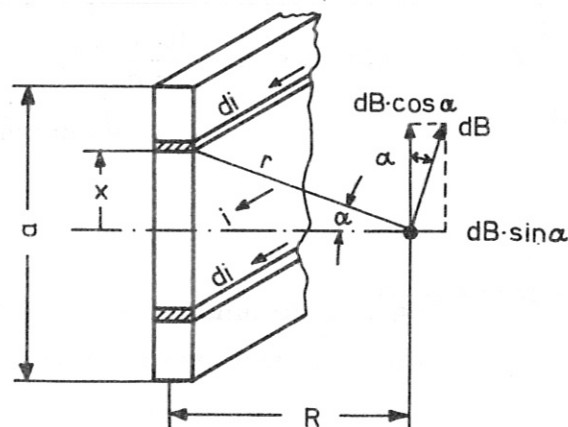
ZUSAMMENFASSUNG:

Erdfreie Messung von hohen Gleichströmen (~ 10 kA) mit einer Magnetfeldspule und einem aktiven Integrator. Die Impulsdauer der Gleichströme kann dabei einige Sekunden betragen.

Die Magnetfeldspule kann sehr einfach, z. B. zwischen den Gleichstrom-Sammelschienen angeordnet werden.

Es wird in SI-Einheiten gerechnet.

1. Berechnung der Induktion B zwischen zwei Sammelschienen



Figur 1

Der Strom in einem schmalen gedachten Leiterstreifen ist

$$di = i \left(\frac{dx}{a} \right)$$

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 i$$

$$dB \cdot 2\pi r = \mu_0 i \left(\frac{dx}{a} \right)$$

$$dB = \frac{\mu_0 di}{2\pi r} = \frac{\mu_0 i \left(\frac{dx}{a} \right)}{2\pi R} \cdot \cos \alpha$$

Nur die Komponente $dB \cdot \cos \alpha$ ist wirksam, da die Komponente $dB \cdot \sin \alpha$ von der Komponente $-dB \cdot \sin \alpha$ für $-X$ aufgehoben wird. Damit ergibt sich

$$B = \int dB \cdot \cos \alpha = \int \frac{\mu_0 i \left(\frac{dx}{a}\right)}{2\pi R} \cdot \cos^2 \alpha = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi a R} \int dx \cdot \cos^2 \alpha$$

$$X = R \cdot \tan \alpha$$

$$dx = R \cdot \cos^2 \alpha \cdot d\alpha$$

Die Grenzen gehen von $\pm \tan^{-1} \left(\frac{a}{2R}\right) \hat{=} \pm \arctan\left(\frac{a}{2R}\right)$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi a R} \int R \cdot \cos^2 \alpha \cdot d\alpha \cdot \cos^2 \alpha = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi a} \int_{-\arctan\left(\frac{a}{2R}\right)}^{+\arctan\left(\frac{a}{2R}\right)} d\alpha = \frac{\mu_0 \cdot i}{\pi a} \arctan\left(\frac{a}{2R}\right)$$

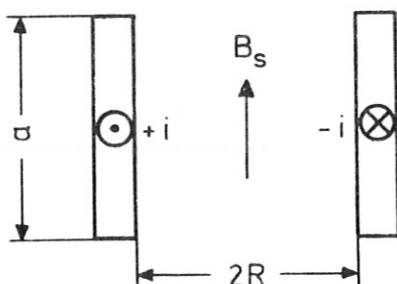
$$1.1) \quad B = \frac{\mu_0 \cdot i}{\pi \cdot a} \arctan\left(\frac{a}{2R}\right)$$

Wenn $\frac{a}{2R}$ sehr klein ist, wird $\arctan \alpha \approx \alpha$.

Damit ergibt sich die Näherungsgleichung zu

$$1.2) \quad B \approx \frac{\mu_0 \cdot i}{\pi \cdot a} \left(\frac{a}{2R}\right) = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi R}$$

1.3) Für ein Sammelschienensystem ergibt sich die Induktion zu:



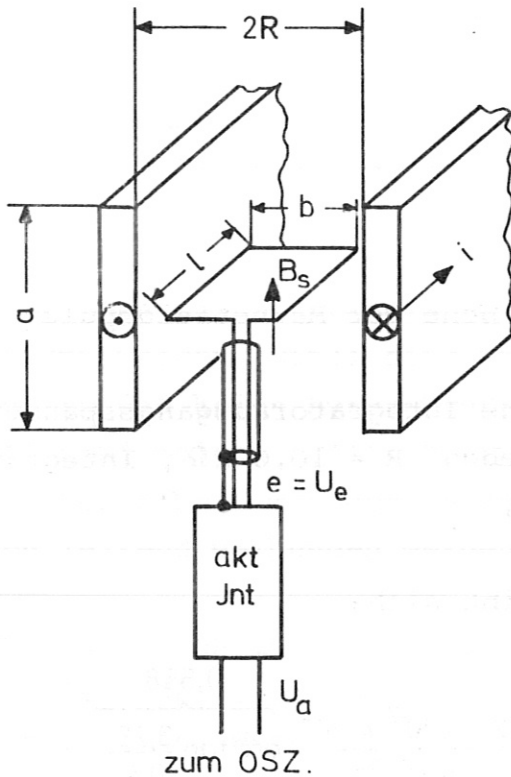
Figur 2

$$B_s = 2 \cdot B$$

$$1.4) \quad B_s = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot i}{\pi \cdot a} \arctan\left(\frac{a}{2R}\right)$$

$$1.5) \quad B_s \approx \frac{\mu_0 \cdot i}{\pi R}$$

2. Berechnung der Magnetfeldspule und der Integrator- konstanten



Figur 3

2.1) Aufgrund der Sammelschienenanordnung und dem Strom i kann die Induktion B_s berechnet werden.

Die Sondenfläche A berechnet sich aus $A = l \cdot b$ und die in der Magnetfeldspule (mit N -Windungen) durch die Stromänderung di induzierte Spannung e zu:

$$2.2) \quad e = u_e = \frac{d\phi}{dt} \cdot N = A \cdot N \cdot \frac{dB_s}{dt}$$

Für den Integrator gilt $(\tau = R \cdot C = \frac{1}{K_i})$

$$2.3) \quad U_a = \frac{1}{C} \int i \cdot dt = \frac{1}{RC} \int R \cdot i \cdot dt = \frac{1}{\tau} \int U_e \cdot dt$$

$$U_a = \frac{1}{\tau} \int A \cdot N \cdot \frac{dB_s}{dt} \cdot dt = \frac{1}{\tau} \cdot A \cdot N \int dB_s = \frac{A \cdot N}{\tau} \cdot B_s$$

$$2.4) \quad U_a = \frac{A \cdot N}{\tau} \cdot B_s$$

3. Praktisches Beispiel

Gegeben ist ein Sammelschienensystem mit

$$J = 40 \text{ kA}$$

$$a = 0,25 \text{ m}$$

$$2R = 0,4 \text{ m}$$

$$l = 0,1 \text{ m}$$

$$b = 0,03 \text{ m}$$

$$h = 0,12 \text{ m}$$

Höhe der Magnetfeldspule

Als günstig hat sich eine Integratorausgangsspannung U_a von ca. $U_a = 1 \text{ V}$ ergeben. $R = 10,0 \text{ k}\Omega$, Integratorzeitkonstante $\tau = 0,1 \text{ s}$.

Nach Gleichung 1.4) ergibt sich:

$$3.1) \quad B_s = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot i}{\pi \cdot a} \arctan\left(\frac{a}{2R}\right) = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^4}{\pi \cdot 0,25} \overbrace{\arctan\left(\frac{0,25}{0,4}\right)}^{0,558}$$

$\tan 0,625 \hat{=} 32^\circ$

$$\widehat{\alpha} = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot 32^\circ = 0,558$$

$$B_s = 0,72 \cdot 10^{-1} \text{ T} \hat{=} 720 \text{ G}$$

3.2) Nach Gleichung 2.4) ergibt sich eine Magnetfeldspulenzahl von $A = l \cdot b$

$$N = \frac{U \cdot \tau}{A \cdot B_s} = \frac{1 \cdot 0,1}{0,1 \cdot 0,03 \cdot 0,072} = 464 \text{ Windungen}$$

gewählt 500 Windungen.

Bei einem Spulendrahtdurchmesser von $d = 0,18$ mm Kupferdraht ergibt sich eine Spulenhöhe von (einlagig)

$$h = d \cdot N = 0,18 \cdot 500 = 90 \text{ mm}$$

Als Spulenkörper hat sich Trovidur bewährt und als Anschluß ein symmetrisches 2adrig geschirmtes 120Ω HF-Kabel.

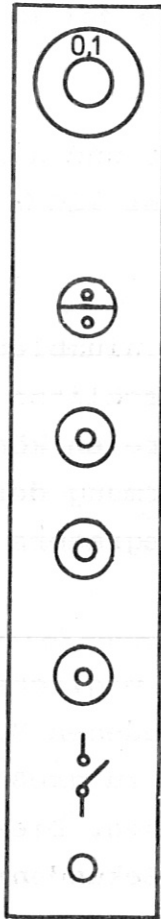
Der Spulenkörper sollte mit ca. 2 mm Aluminiumblech abgeschirmt werden. Dabei sind Überlappungsschlitze vorzusehen, so daß keine Kurzschlußströme auftreten können. Das Aluminiumblech sollte über die Abschirmung des symmetrischen Kabels mit dem Gehäuse des Integrators elektrisch leitend verbunden werden.

Um Thermospannungen zu vermeiden, sollten möglichst wenig Lötstellen oder Steckkontakte von verschiedenen Metallen vorhanden sein. Wenn die Thermospannungen zu groß werden, wird die Nulllinie des Integrators verschoben. Dies gilt besonders bei langen Strompulsen (einige Sekunden).

Nach der Verschaltung von Magnetfeldspule und aktivem Integrator sollte der gesamte Kreis mit einem Shunt oder einer Rogowski-Spule geeicht werden.

Bei kleineren zu messenden Strömen kann die Empfindlichkeit des Oszillographen vergrößert werden. Bei großen Strömen ist es zweckmäßig, wenn man die Integratorzeitkonstante umgeschaltet werden kann (verschiedene Eingangswiderstände, z.B. $10,0 \text{ k}\Omega$; $300 \text{ k}\Omega$; $1,0 \text{ M}\Omega$). Damit wird $\tau = 0,1 \text{ s}$, 3 s bzw. 10 s , d.h. die Empfindlichkeit verkleinert. (Siehe Figur 7, Seite 10)

4. Aufbau des aktiven Integrators



Mehrfachschalter zum Umschalten der Integratorzeitkonstante

Symmetrischer INPUT (von Magnetfeldspule)

50 Ω BNC OUTPUT (zum Osz. max.1V) Buchse

Handtrigger

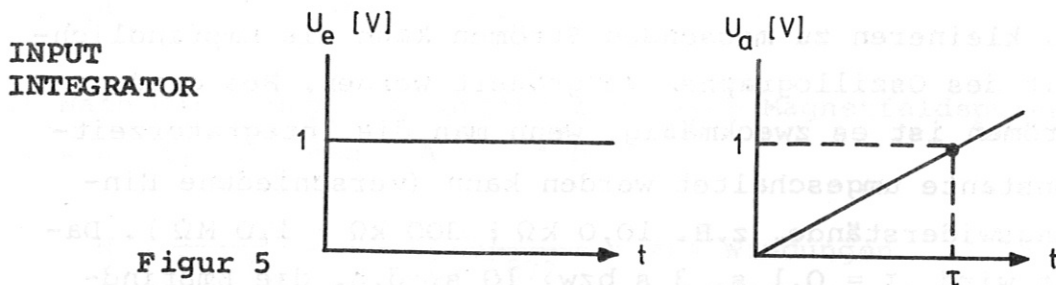
50 Ω BNC-Buchse für Trigger-INPUT (~ 20 V)

Schalter für Netzspannung EIN

Lampe für Netzspannung EIN

Figur 4

5. Eichung des Integrators



Es sind zwei Eichungen vorzunehmen. Erstens mit positiven und zweitens mit negativen Gleichspannungs-INPUT. Diese Messung bestimmt nur die Integratorzeitkonstante. Um die Zeitkonstante des gesamten Kreises zu bestimmen, muß der Innenwiderstand der Magnetfeldspule mitberücksichtigt werden.

6. Beschreibung des aktiven Integrators

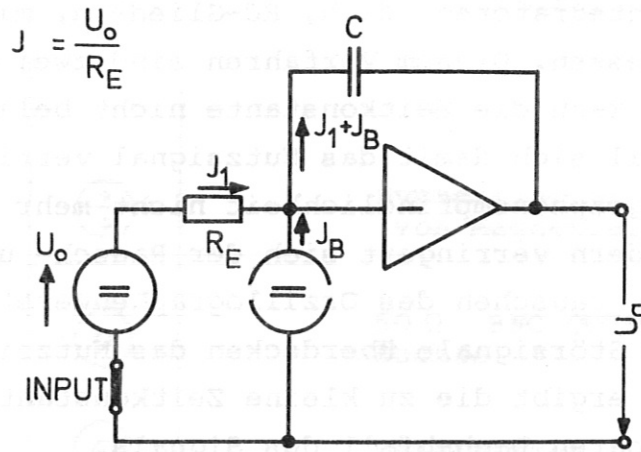
In der Experimentalphysik ist es bislang noch weit verbreitet, bei Signalen, die integriert werden sollen, mit sogenannten passiven Integratoren, d. h. RC-Gliedern, mit großer Zeitkonstante zu messen. Diesem Verfahren sind zwei Grenzen gesetzt. Zum einen kann die Zeitkonstante nicht beliebig groß gemacht werden, weil sich damit das Nutzsignal verringert, so daß die Oszillographenempfindlichkeit nicht mehr ausreicht, und zum andern verringert sich der Rausch- und Störabstand, d. h. Eigenrauschen des Oszillographenverstärkers bzw. eingekoppelte Störsignale überdecken das Nutzsignal. Aus diesen Gründen ergibt die zu kleine Zeitkonstante meist schon einen erkennbaren Dachabfall des Signals.

Diese Nachteile umgeht man mit einem sogenannten aktiven Integrator oder Integrationsverstärker. Bei diesem kann die Zeitkonstante in weiten Grenzen frei gewählt werden, so daß man immer auf Signale im Voltbereich kommen kann. Diese lassen sich dann auch leichter für eine eventuelle Datenerfassung digitalisieren. Wie im vorangegangenen Teil schon einmal dargestellt, wird der aktive Integrator beschrieben durch den Ausdruck

$$U_a = K_i \int_t U_e dt \qquad K_i = \frac{1}{\tau}$$

wobei die Integrationskonstante K_i der Reziprokwert einer fiktiven Zeitkonstante τ ist, die nichts mit der Entladungszeit zu tun hat. Die Grenzen dieses aktiven Integrators sind gegeben durch die Eigenschaften des verwendeten Verstärkers. Beschränkt man sich bei der Betrachtung auf Langzeitintegration, d. h. msec bis min, so sind es im wesentlichen die beiden Kenngrößen Offsetvoltage drift U_o und Basis current I_B . Beide Kenngrößen verursachen einen Fehler, der sich als eine Fehlgleichspannung am Eingang des Integrators auffassen läßt. Dieser Fehler ist bei kurzgeschlossenem Eingang am besten zu sehen.

Die temperaturabhängige Offset-Spannung lässt einen Strom über den Eingangswiderstand fließen, der integriert wird und zu dem sich der Basis-Strom dazuaddiert.



Figur 6

Der Fehler der Ausgangsspannung des Integrators lässt sich abschätzen zu

$$U_a = \frac{1}{C} (J_1 + J_B) \cdot t = \frac{1}{C} \left(\frac{U_o}{R_E} + J_B \right) \cdot t$$

Bei dem verwendeten Verstärker ist die angegebene Offset-Spannungsdrift $0,2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ und der Basisstrom 50 pA . Damit ergibt sich bei einer Temperaturschwankung von 10°C , $R_E = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \mu\text{F}$, $t = 10 \text{ s}$

$$U_a = \frac{1 \text{ V}}{10 \cdot 10^{-6} \text{ As}} \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot 10^\circ\text{C}}{^\circ\text{C} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ V}} + 50 \cdot 10^{-12} \text{ A} \right) \cdot 10 \text{ s}$$

$$U_a = \frac{250 \cdot 10^{-12}}{1 \cdot 10^{-6}} \text{ V}$$

$$U_a = 250 \mu\text{V}$$

Die Ausgangsspannung dieses Integrators hat sich also ohne Eingangssignal bei Kurzschluß am Eingang um $250 \mu\text{V}$ verändert. Läßt man bei einem Nutzsignal von 1 V nach 10 Sekunden einen Fehler von 1% zu und behält den Eingangswiderstand $R_E = 10 \text{ k}\Omega$ bei, um die Signalquelle nicht unnötig zu belasten, so ergibt sich ein minimales C von

$$C = \frac{1}{10^{-2} U_a} \left(\frac{U_o}{R_E} + J_B \right) \cdot t$$

$$C = \frac{1}{10^{-2} \cdot 1 \text{ V}} \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot 10 \text{ }^\circ\text{C A}}{\text{ }^\circ\text{C} \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ V}} + 50 \cdot 10^{-12} \text{ A} \right) \cdot 10 \text{ s}$$

$$C = 250 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 250 \text{ nF}$$

Die Integrationskonstante wäre dann

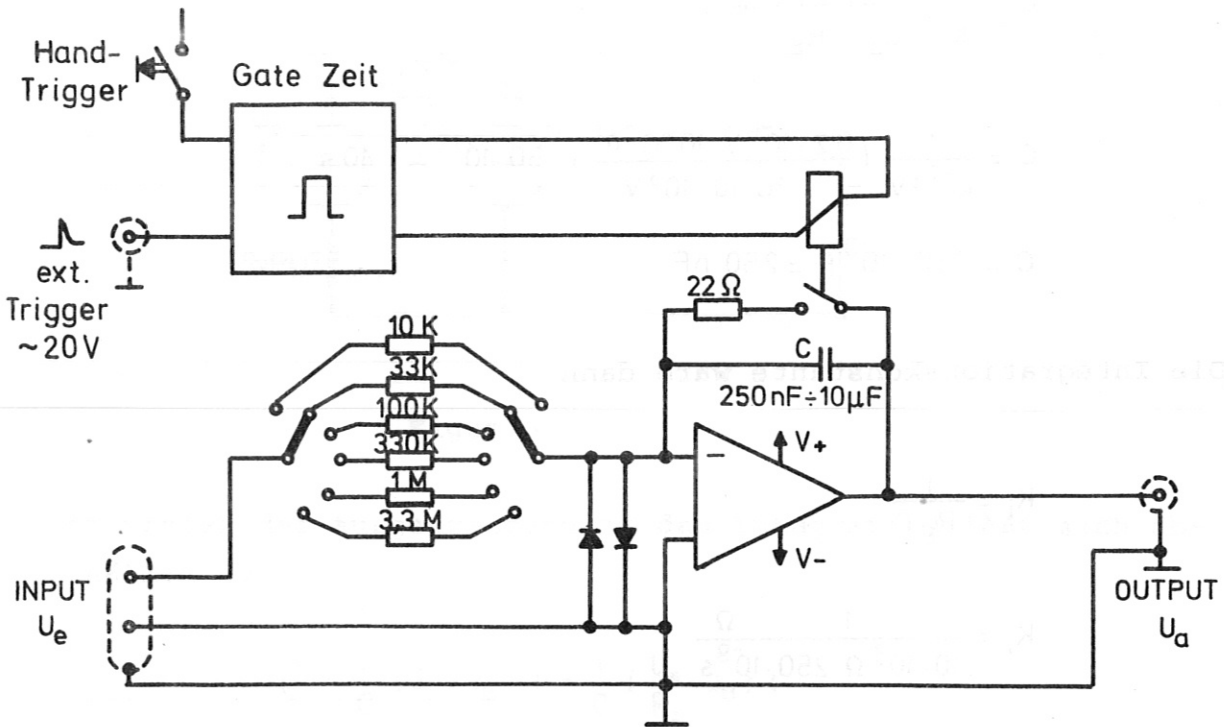
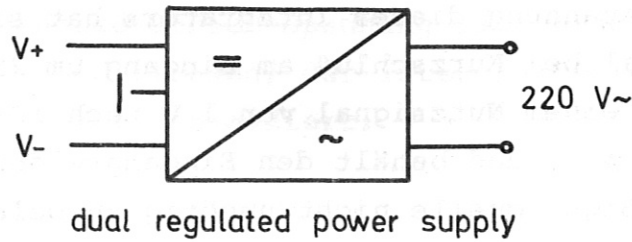
$$K_i = \frac{1}{R_E \cdot C}$$

$$K_i = \frac{1}{10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 250 \cdot 10^{-9} \text{ s}}$$

$$K_i = \frac{10^3}{2,5} \frac{1}{\text{s}} = 0,4 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{s}}$$

Um sich die Empfindlichkeit dieses Integrators veranschaulichen zu können, hier ein Zahlenbeispiel. Liegt am Eingang eine konstante Gleichspannung von $250 \mu\text{V}$, so erreicht der Ausgang des Integrators nach 10 Sekunden den Wert von 1 V . Dieses Beispiel zeigt deutlich, daß so ein aktiver Integrator sorgfältig aufgebaut sein muß, damit man den rechnerischen Wert erreicht. Die verwendeten Bauteile müssen nach niedrigen Thermospannungen ausgesucht werden und die ganze Schaltung muß geschirmt werden, um kapazitive Einstreuungen und statische Aufladungen zu verhindern.

Die Schaltung



Figur 7

Die Eingangswiderstände werden zweipolig umgeschaltet (Thermospannungskompensation).

Der aktive Integrator löst das bestimmte Integral

$$U_a = -K_i \int_{t_1}^{t_2} U_e \cdot dt \quad \text{Bei } t = t_1 \text{ wird } u_a = 0 \text{ gesetzt.}$$

Das Zeitintervall $t_1 < t < t_2$ kann entweder von Hand mittels Drucktaster gegeben werden oder durch den eingebauten Gate-Zeitgeber. In diesem Fall benötigt letzterer zum Zeitpunkt t_1 einen positiven Triggerpuls. Den Zeitpunkt t_2 bestimmt der interne Zeitgeber. Dieser kann den Zeitbereich von 20 ms bis min überstreichen.

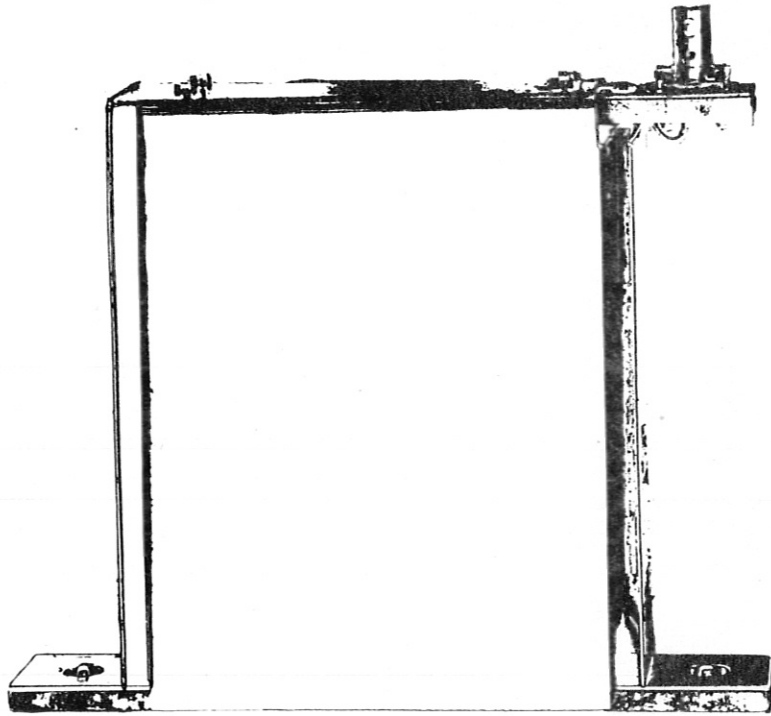


Fig. 8 Magnetfeldspule

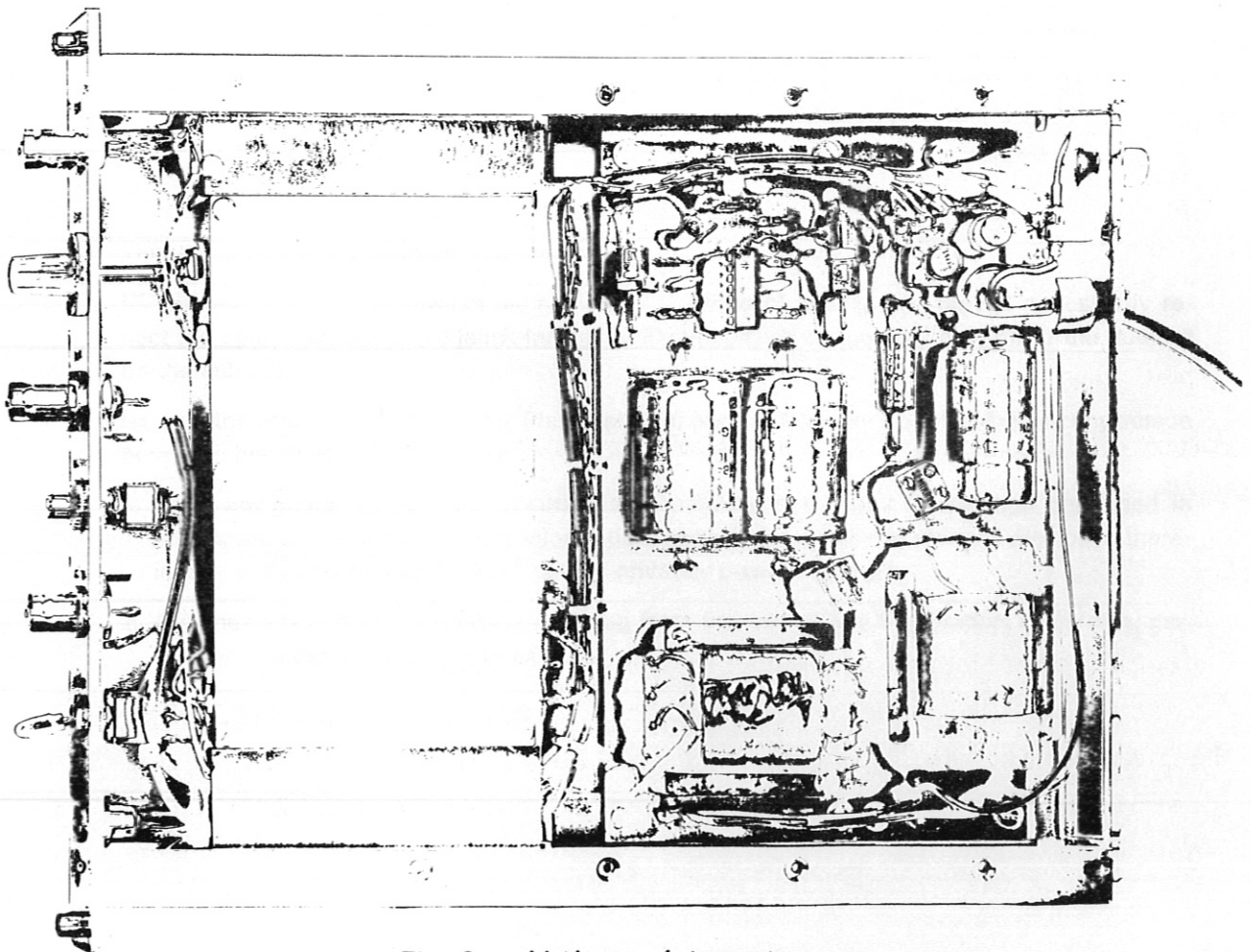


Fig. 9 Aktiver Integrator