

21 | Oktober 1955

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Dr. H. Baumann

Oszillographische Aufzeichnung von Frequenzschwankungen des Drehstromnetzes

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

INSTITUT FUR SCHIFFBAU DER UNIVERSITAT HAMBURG

Prof. Dr. - Ing. G. Weinblum

Oszillographische Aufzeichnung von Frequenzschwankungen
des Drehstromnetzes .

von

Dr. H. Baumann

Hamburg, Oktober 1955

Oszillographische Aufzeichnung von Frequenzschwankungen des
Drehstrom-Netzes.

von

Dr. Hellmut Baumann

Uebersicht:

- I. Aufgabenstellung
- II. Lösungsprinzip
- III. Technische Gestaltung
- IV. Betriebliche Einrichtungen
- V. Gebrauchsanweisung.

Osztilllographische Aufzeichnung von Frequenzschwankungen des Drehstrom-Netzes.

I. Aufgabenstellung.

Häufig wird in der Versuchspraxis, besonders bei Schwingungs- und Wellenuntersuchungen, das Drehstrom-Netz als Zeitbasis benutzt, z.B. in Form eines Synchron-Antriebs oder durch osztilllographischen Vergleich mit einer Wechselstromkurve u.a.m. In solchen Fällen ist die Kenntnis der Netzfrequenz erforderlich.

Die Frequenz der deutschen Drehstrom-Netze beträgt im Tagesmittel 50 Hz. Sie wird so geregelt, dass der Momentanwert höchstens um 0,2 Hz vom Mittel abweicht; er kann sich aber bei starken Lastschwankungen ziemlich rasch ändern. Will man nun die Netzfrequenz mit einer Genauigkeit von z.B. 1 ‰ bestimmen, so erfordert das bei Verwendung der üblichen Labormittel eine Messzeit von etwa 10 sec. In dieser Zeit kann sich die Frequenz bereits merklich geändert haben. Ebenso wird sich in der Regel die Frequenz während irgendeines Versuchsablaufs in den angegebenen Grenzen ändern.

Es ist daher notwendig, neben der mittleren Frequenz auch die momentane Abweichung zu messen bzw. gleichzeitig mit den Versuchswerten osztilllographisch aufzuzeichnen.

II. Lösungsprinzip.

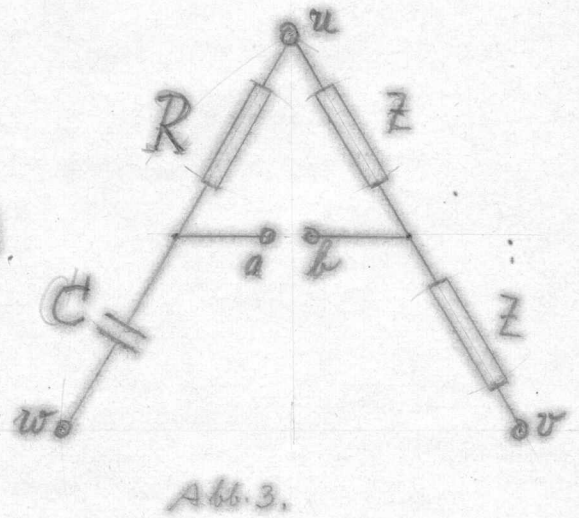
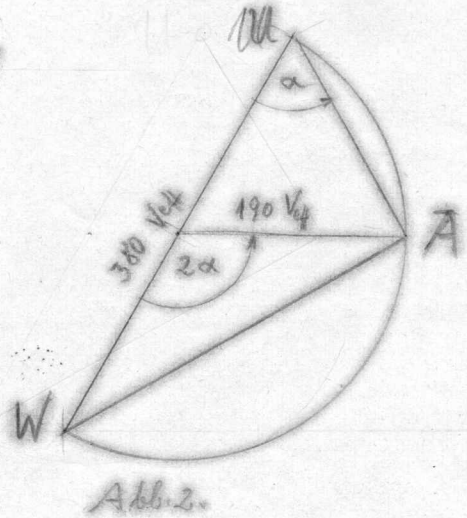
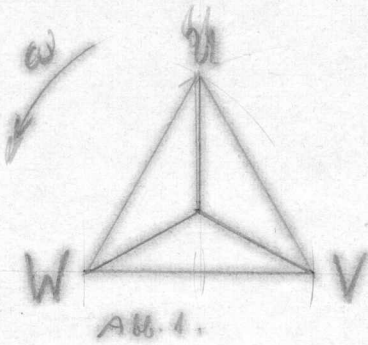
Eine hierfür geeignete Schaltung muss als wesentlichen Bestandteil eine frequenzabhängige Kombination (z.B. Widerstand und Kondensator) enthalten, deren Eigenzeit für die Dauer der Messung als konstant gelten kann. Man kann dann mittels Brückenschaltung eine Spannung gewinnen, die der Frequenzschwankung proportional ist.

Unser Schaltprinzip ist folgendes:

Zwischen den Vektoren der Dreiecksspannungen $\mathbf{V} - \mathbf{U}$ und $\mathbf{W} - \mathbf{U}$ eines Drehstrom-Netzes liegt der Phasenwinkel

$$\angle (\mathbf{V} - \mathbf{U}, \mathbf{W} - \mathbf{U}) = 60^\circ, \quad (1)$$

und zwar ist die Spannung $\mathbf{V} - \mathbf{U}$ in der Phase voraus.



Wir schalten nun zwischen die Klemmen u und w einen Widerstand R und eine Kapazität C in Reihe (R an u, C an w). Dann ist bekanntlich der Halbkreis über den Endpunkten U und W der Ort für den Endpunkt des Teilspannungsvektors A und es läuft der Vektor des Spannungsabfalls am Widerstand, A - U, vor demjenigen der Dreiecksspannung, W - U um den Phasenwinkel voraus, für welchen (vgl. Abb. 2)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{RC\omega} \quad (2)$$

gilt. ($\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} = 314 \text{ s}^{-1}$)

Ausserdem ist $|A-U| = 1/2 |W-U|$, (3)

falls $\frac{1}{RC\omega} = \sqrt{3}$, (4)

so $\alpha = 60^\circ$, (5)

d.h. die Teilspannung A - U ist in Phase mit der Dreiecksspannung V - U. *ist.*

Aus $|V-U| = |W-U|$ (6)

folgt dann wegen (3)

$$A-U = 1/2(V-U). \quad (7)$$

Wenn man nun noch zwischen die Klemmen u und v zwei einander gleiche Impedanzen schaltet, so erhält man einen Teilspannungsvektor B, der dem Teilspannungsvektor A in Grösse und Phase gleich ist. Zwischen den Polen a und b (Abb. 3) liegt also unter der Voraussetzung (4) keine Spannung.

Bei einer kleinen Frequenzabweichung $\Delta\omega$ wandert nun der Endpunkt des Spannungsvektors A auf dem Ortskreis (Abb. 2), wobei

$$|\Delta A| = 1/2 |W-U| \cdot 2 |\Delta\alpha| \quad (8)$$

ist; der Spannungsvektor B dagegen bleibt unverändert.

Infolgedessen tritt zwischen den Polen a und b die Spannungsdifferenz ΔA auf, die wir zur oszillographischen Aufzeichnung der Frequenz-Schwankung benutzen wollen. Ihre Grösse berechnet sich folgendermassen:

Aus (2) folgt durch Differenzieren

$$(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \Delta\alpha = \frac{-1}{RC\omega} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (9)$$

Also wegen (4)

$$4 \cdot \Delta\alpha = \sqrt{3} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (10)$$

In (8) eingesetzt:

$$|\Delta A| = |W-U| \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (11)$$

Mit der Dreiecksspannung

$$|W-U| = 380 V_{\text{eff}} = 535 V_{\text{Sp}}$$

und der rel. Frequenzabweichung

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{0,2 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 4 \text{ ‰}$$

ergibt sich

$$|\Delta A| = 0,93 V_{\text{Sp}} \quad (12)$$

Wir können also mit einer Brückenspannung von etwa $1 V_{\text{Sp}}$ rechnen.

III. Technische Gestaltung.

a) Filter

Da das Brückengleichgewicht nur für die Frequenz von 50 Hz besteht, treten Oberwellen des Drehstrom-Netzes und Fremdspannungen (z.B. von Kollektoren) in der Brückenspannung relativ stark her-

vor. Deshalb müssen wir vor das Galvanometer des Oszillographen einen Filterschalter setzen, der die Frequenzumgebung von 50 Hz bevorzugt durchlässt. Bei Verwendung des Fischer-Galvanometers 08/7 (83 Hz, 70Ω) hat sich ein zweikreisiger Filter nach Abb. 4 b bewährt. *(Abb. 4, 5 und 6 s. Seite 6.)*

Er liefert Uebertragungsmaße $2,5 \cdot 10^{-3}$ für 50 Hz, $4 \cdot 10^{-5}$ für 100 Hz und $6 \cdot 10^{-6}$ für 150 Hz. Der relative Dämpfungsfaktor beträgt also ca.

$$60 \quad \text{für} \quad 100 \text{ Hz}, \quad 400 \quad \text{für} \quad 150 \text{ Hz}. \quad (13)$$

Seine Eingangsimpedanzen sind ca.

$$\left. \begin{array}{l} 700 \Omega \text{ für } 50 \text{ Hz} \\ 2 \ 700 \Omega \text{ für } 100 \text{ Hz} \\ 4 \ 800 \Omega \text{ für } 150 \text{ Hz} \end{array} \right\} \text{ vorwiegend induktiv.} \quad (14)$$

b) Spannungsschwankungen

Das Brückengleichgewicht ist nur dann gewahrt, wenn die Endpunkte der Sternspannungsvektoren $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ ein gleichseitiges Dreieck bilden. Diese Bedingung ist zwar von Seiten der Elektrizitätswerke erfüllt, kann aber durch stark unsymmetrische Belastung zumindest lokal verletzt werden. Wenn sich nun z.B. der Vektor \mathbf{V} um $d\mathbf{V}$ verändert, so verändert sich B um

$$dB = 1/2 dV \quad (15)$$

und das Brückengleichgewicht wird dementsprechend gestört.

Die einfachste Gegenmassnahme dürfte darin bestehen, dass man das Gerät nicht unmittelbar an das Drehstromnetz schaltet, sondern

zunächst einen Synchronmotor laufen lässt, welcher wieder einen Drehstromgenerator zur Versorgung des Geräts antreibt. Wegen des Synchron-Antriebs überträgt dieses Aggregat die Frequenzschwankungen aber nicht die Spannungsschwankungen. Mit Vorteil wird auch ein einphasiger Synchronmotor verwendet werden, der aus jeder Wechselstrom-Steckdose gespeist werden kann.

c) Impedanzen der Schaltung.

Für die Vervollständigung unserer Schaltung sind zwei Gesichtspunkte massgebend:

- 1) Die Eingangsimpedanzen zwischen den Polen u, v, w müssen zwecks symmetrischer Belastung des Generators möglichst einander gleich sein. Wegen der Wärmeerzeugung sollen sie nicht zu klein gemacht werden.
- 2) Bei 50 Hz darf die Ausgangsimpedanz zwischen den Polen a, b nicht grösser als die Eingangsimpedanz des Filters (700Ω) sein, damit die Spannung nicht zusammenbricht.

Wir wählen im Hinblick auf die Brückengleichgewichts-Bedingung (4)

$$C = 4 \mu F \quad R \approx 450 \Omega \text{ (einstellbar)} \quad (16)$$

Bei einer Dreiecksspannung von $380 V_{\text{eff}}$ ergibt sich dann, da aus (3) am Widerstand R ein Spannungsabfall von $190 V_{\text{eff}}$ folgt, eine Wärmeerzeugung von 80 W.

Wenn wir zur Wahrung der Symmetrie zwischen v und w einen ebenso grossen Kondensator und Widerstand ($4 \mu F$, 450Ω) sowie zwischen u und w die in Abb. 4a gezeichnete Kette ($8 \mu F$, 200Ω , 30Ω , 200Ω , $8 \mu F$) schalten, so ist die erste Bedingung erfüllt, Es entsteht dann in jedem Zweig dieselbe Wärme von 80 W; insgesamt also 240 W.

Zwischen den Brückenpolen a, b finden wir nun für die Ausgangsimpedanz

$$\begin{aligned} Z &= \frac{R}{1+j\omega CR} + 1/2 \left(\frac{R}{2} + \frac{1}{2j\omega C} \right) \quad (17) \\ &= R \cdot \left[\frac{1}{4} + \frac{1}{1+(RC\omega)^2} - j \left(\frac{1}{4RC\omega} + \frac{RC\omega}{1+(RC\omega)^2} \right) \right], \end{aligned}$$

Woraus sich mit $RC\omega = 1/\sqrt{3}$ das Resultat

$$\begin{aligned} Z &= R \cdot \left[1 - \frac{j}{2} \sqrt{3} \right] \\ |Z| &= 450 \Omega \sqrt{\frac{7}{4}} = 600 \Omega \end{aligned} \quad (18)$$

ergibt.

IV. Betriebliche Einrichtungen.

a) Kontrolle des Phasenumlaufs; Schutzmassnahmen.

Bei falscher Phasenfolge der Spannungsvektoren U, V, W läuft die Dreiecksspannung V - U um 60° hinter W - U her. Infolgedessen bilden dann die Teilspannungsvektoren A - U und B - U = $1/2 (V - U)$ einen Winkel von 120° , sodass die Brückenspannung A - B den Betrag $190 V_{\text{eff}} \cdot \sqrt{3} = 330 V_{\text{eff}}$ annimmt. Da wir uns nicht auf richtige Polung der Drehstrom-Steckdosen verlassen können, müssen wir deshalb den Ausgangs-Filter und das Galvanometer gegen Zerstörung schützen. Dazu dient eine Kontroll-Lampe für den Phasenumlauf und ein Schalter, der nur bei leuchtender Lampe geschlossen werden darf, sowie eine Feinsicherung.

Zur Kontrolle der Phasenfolge schalten wir den ohnehin vorhandenen Widerstand und Kondensator des v,w-Zweiges in der aus Abb.4a ersichtlichen Reihenfolge (also umgekehrt wie die Messkombination des u,w-Zweiges). Der Vektor des Spannungsabfalls am Widerstand, D - V, eilt dann wegen der **auch** hier erfüllten Bedingung $RC\omega = \frac{1}{\sqrt{3}}$ dem Vektor der Dreiecksspannung W - V um einen Phasenwinkel von 60° voraus, während der Teilspannungsvektor B - V = $1/2(U - V)$ bei richtiger Phasenfolge um 60° hinter W - V liegt. (Abb.5) Zwischen den Polen a und b besteht also die Spannung

$$|D-B| = 190 V_{\text{eff}} \cdot \sqrt{3} = 330 V_{\text{eff}}, \quad (19)$$

welche zum Betrieb einer Glimmlampe (Gl 2) dient.

Bei falscher Phasenfolge eilt dagegen der Teilspannungsvektor B - V, ebenso wie D - V, dem Vektor der Dreiecksspannung W - V um 60° voraus, sodass $D - B \approx 0$ wird und die Glimmlampe nicht zündet.

b) Brückenabgleich.

Zur Einstellung des Brückengleichgewichts dienen zwei Regelwiderstände R_1 , R_2 . Mit Hilfe von R_1 lässt sich der Ebdpunkt des Teilspannungsvektors B längs des Spannungsabfalls an den Widerständen des u, v -Zweigs ein wenig verschieben. Da auch hier $RC\omega = 1/\sqrt{3}$ ist, erfolgt diese Verschiebung im Phasendiagramm Abb. 5 unter einem Winkel von 60° zu $V - U$, parallel zu $V - W$. Mittels R_2 kann der Endpunkt von A auf dem Ortskreis (Abb. 2 bzw. 5) verschoben werden. Da der Radiusvektor im Gleichgewichtsfall mit $U - W$ einen Winkel von 60° bildet, also parallel zu $V - W$ ist, steht die Verschiebung von A im Phasendiagramm senkrecht auf derjenigen von B . Die Widerstände R_1 und R_2 erlauben also, alle Werte der Brückenspannung $A - B$ innerhalb eines quadratischen Vektorbereichs einzustellen und dadurch gelegentliche Gleichgewichtsstörungen der Brücke (etwa durch Temperatur-Einflüsse verursacht) auszugleichen. Die Rechteckseite entspricht, wenn $R_1 = R_2 = 10$ ist, einer Netzfrequenzänderung von ca. 3,6 Hz.

c) Eichung.

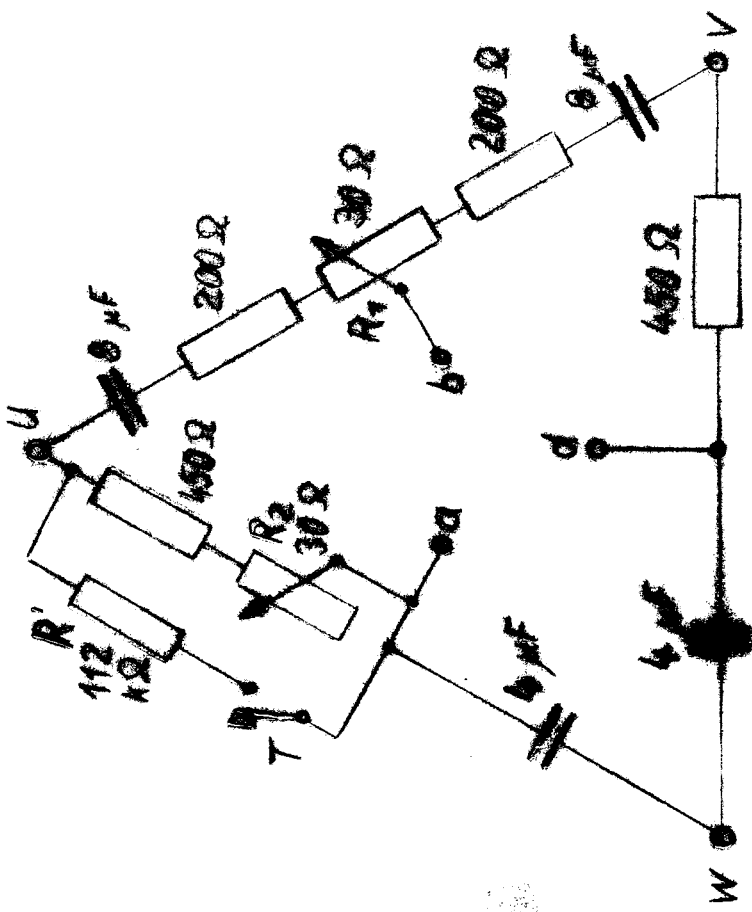
Um den Ausgangsshunt des Filters und damit den Aufzeichnungsmaßstab des Geräts einstellen zu können, schalten wir mittels Druckkontakt einen Widerstand $R' = 250 R = 112,5 \text{ k}\Omega$ parallel zu dem Messwiderstand R . Dadurch verkleinern wir das Produkt $RC\omega$ um 4 ‰, erhalten also am Oszillographen denselben Lichtpunktausschlag wie bei einer Frequenzabnahme von 0,2 Hz.

V. Gebrauchsanweisung.

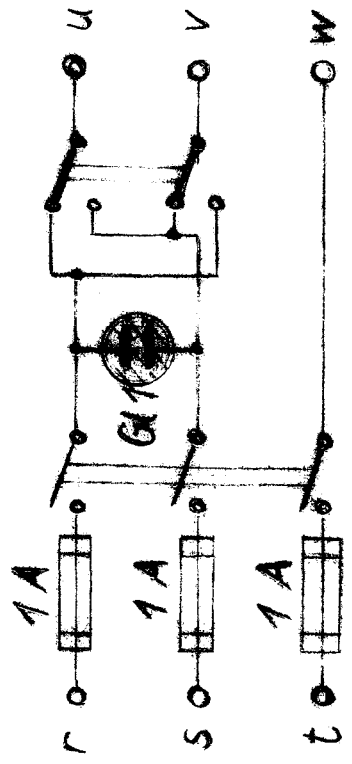
(Hierzu Abb. 6)

- 1) Gehäuse erden.
- 2) Filter-Schalter S_3 "aus". Ausgangsshunt R_3 schliessen.
- 3) Fischer-Galvanometer o8/7 anschliessen.
- 4) Drehstrom-Netz $380 \text{ V}_{\text{eff}}$ Δ anschliessen.
- 5) Netzschalter S_1 "ein"; Gl 1 muss zünden.
- 6) Falls Gl 2 nicht gezündet hat: Potwender S_2 , Gl 2 muss zünden.
- 7) Lange warten.

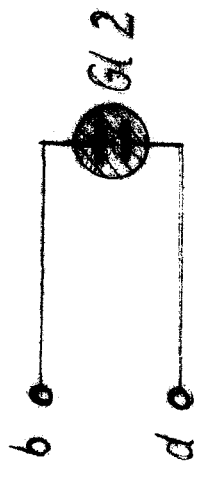
- 8) Filter-Schalter S_3 "ein", Ausgangsshunt R_3 öffnen. Lichtpunkt des Oszillographen muss schwingen.
- 9) Mittels R_1 und R_2 Brücke abgleichen, kleinster Lichtpunktausschlag.
- 10) Mittels Eichtaste und Ausgangsshunt R_3 den gewünschten Massstab (z.B. 20 mm Lichtpunktausschlag) einstellen.
- 11) Mittels R_2 bei gedrückter Eichtaste den Lichtpunktausschlag etwas über das Minimum hinaus bringen und Eichung kontrollieren.(10)
- 12) Bei längerer Betriebszeit Brückenabgleich wiederholen.



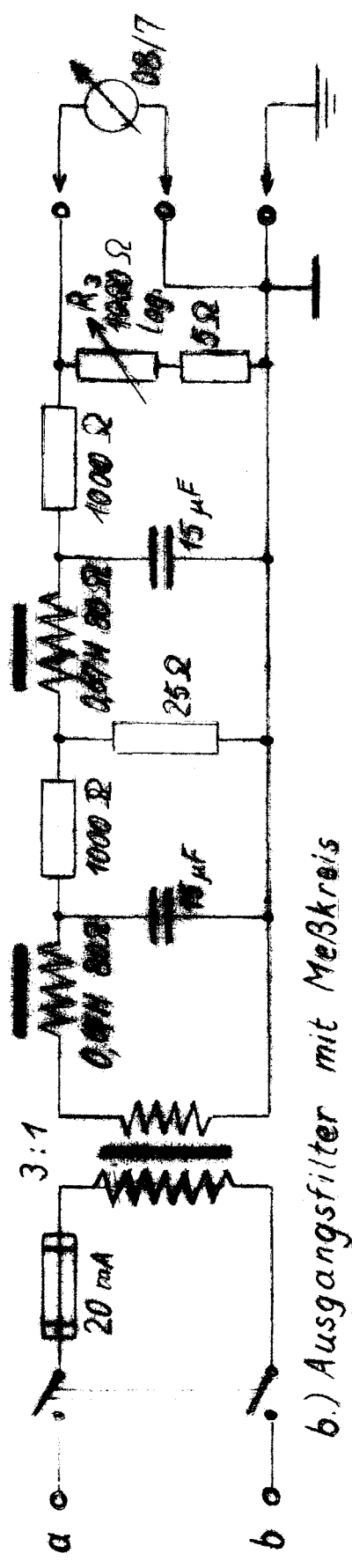
a.) Hauptteil



d.) Stromzuführung mit Anwendung



c.) Phasenumlauf - Kontrolle



b.) Ausgangsfilter mit Meßkreis

Abb. 4 : Gesamtschaltbild

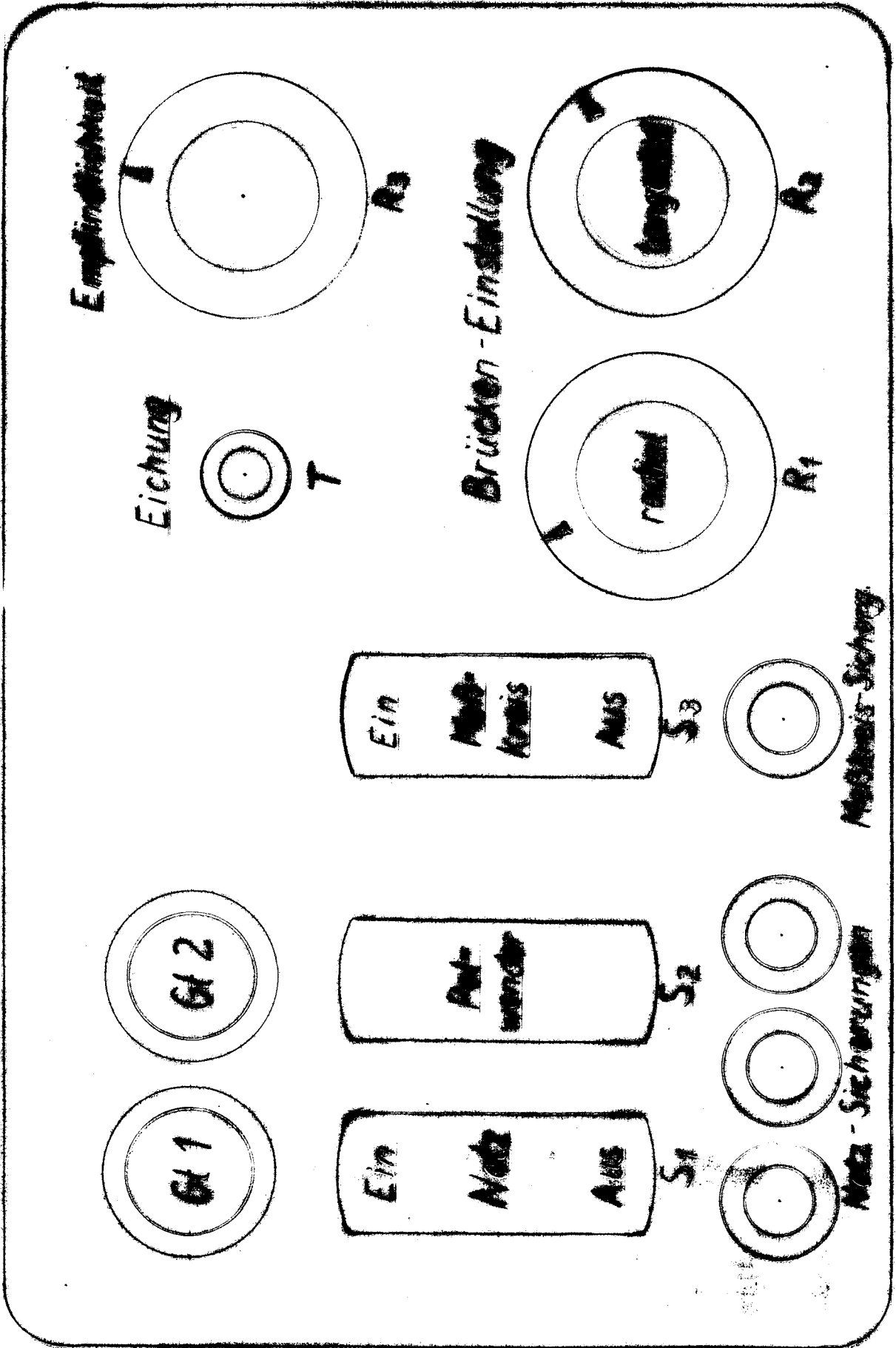


Abb. 6: Frontplatte des Geräts