

Interner Bericht
DESY H5/72-1
April 1972

DESY-Bibliothek

28. APR. 1972

DER STROMMONITOR AM SPEICHERRING

D O R I S

von

J. Burkhardt und R. Rossmanith

1. Einleitung

Bei dem im Bau befindlichen Doppelspeicherring DORIS werden die Bunche des Strahls den gesamten Umfang des Speicherrings ausfüllen. Der Strahlstrom kann daher nur über die HF-Struktur (500 MHz und Oberwellen) oder aber über seine Gleichstromkomponente gemessen werden. Bei der Messung des Strahlstroms über die Oberwellen von 500 MHz ergeben sich Ungenauigkeiten, da bis jetzt kein Meßverfahren bekannt ist, mit dem man unabhängig von der Lage des Strahls in der Vakuumkammer die Stromstärke messen kann. Je nach Lage ergibt sich bei der Verwendung von Loop-Monitoren ein Meßfehler bis zu etwa 20%. Bei Elektronen- oder Positronen-Speicherringen besteht außerdem noch die Möglichkeit, die Strahlintensität über das Synchrotronlicht zu messen¹⁾. Die Schwierigkeit dieser Meßmethode besteht aber darin, daß die Zahl der vom Strahl emittierten Photonen von der Energie des Strahls abhängig ist. Man müßte daher den gemessenen Stromwert entsprechend der Energie korrigieren.

Der Gleichstromwert des gespeicherten Strahls kann mit einer modifizierten Förstersonde gemessen werden. Bei diesem Verfahren werden zwei Ringbandkerne mit einer bestimmten Frequenz im Bereich von 1 kHz angeregt und an einer weiteren Wicklung die Verzerrung des Signals gemessen²⁾. Fließt ein Gleichstrom durch die beiden Ringe, treten ungeradzahlige Vielfache der Anregungsfrequenz auf. Eine externe Stromquelle regelt diese Oberwellen wieder zu Null. Auf diese Weise wird der Strahlstrom durch einen externen Strom kompensiert, der gemessen wird. Der Vorteil dieser Meßmethode besteht darin, daß die Messung des Strahlstroms von der Strahllage unabhängig ist. Die Nullpunktmethode ermöglicht es, einen großen Dynamikbereich ohne Umschalten zu überstreichen (1 mA bis 6 A). Aus diesen Überlegungen wurde das Förstersondenprinzip für die Messung des Strahlstroms vorgeschlagen und ein für DORIS geeignetes Gerät entwickelt.

2. Messprinzip

In Abb. 1 ist das Blockschaltbild des Strommonitors dargestellt. Der Oszillator liefert 1 kHz und zwei 2 kHz Rechtecksignale. Alle drei Signale sind zueinander phasenstarr. Das 1 kHz-Signal gelangt über einen Längstransistor zu einem schmalbandigen Filter, der die 1 kHz-Komponente ausfiltert. Danach gelangt das Signal über einen Impedanzwandler und einen Verstärker auf eine der Wicklungen der Ringbandkerne. Die Stromstärke in der Wicklung beträgt $2 A_{SS}$. Der Strom fließt außerdem noch über einen Widerstand, an dem die Spannung abgegriffen und gleichgerichtet wird. Die gleichgerichtete Spannung wird mit einem Normal verglichen und die Differenz über den Längstransistor ausgeglichen: Der Anregungsstrom in der Wicklung wird auf einem konstanten Pegel gehalten. Der Strom ist so bemessen, daß die Ringbandkerne knapp bis zur Sättigung magnetisiert werden. Versuche haben ergeben, daß dann die Empfindlichkeit des Gerätes optimal ist. Die Nichtlinearitäten des Ringes führen dazu, daß das Signal, das an einer anderen Wicklung abgenommen wird, verzerrt wird. Fließt kein Gleichstrom durch den Ring, treten hauptsächlich nur ungeradzahlige Vielfache der Anregungsfrequenz in der anderen Wicklung auf. Fließt jedoch ein Gleichstrom durch den Ring, treten auch geradzahlige Harmonische auf. Die Phasenlage des zweitharmonischen Signals hängt von der Stromrichtung ab. Zwei Ringe werden deshalb benutzt, um die unerwünschten Oberwellen weitestgehend zu unterdrücken. An einer zweiten Wicklung wird das verzerrte Signal abgenommen und über einen Impedanzwandler einem Filter zugeführt. Der Impedanzwandler hat die Aufgabe, Filter und Ring elektrisch zu entkoppeln. Wären die Kennlinien der beiden Ringe ideal, müßte bei Strahlstrom null die Zweitharmonische von 1 kHz ebenfalls null sein. Da das jedoch nicht der Fall ist, muß der geringe Anteil von 2 kHz kompensiert werden. Eines der beiden 2 kHz-Rechtecksignale wird daher nach dem Impedanzwandler zum Meßsignal addiert. Phase und Amplitude dieses Korrektursignals können zwischen 0 und 360° bzw. zwischen 0 und 3 Volt stetig verändert werden. Nach dem Filter folgt ein Impedanzwandler, der Filter und nachfolgende Elektronik entkoppelt. Das gefilterte Signal wird in der nachfolgenden sample and hold-Einheit phasenrichtig gleichgerichtet; phasenrichtig deshalb, weil ein negativer Strom und ein positiver Strom durch den Ring phasenverkehrte Signale liefern. Durch die phasenrichtige Gleichrichtung wird der Strom durch den Ring mit einem Strom gleichen

Vorzeichens kompensiert. Das Taktsignal für die SaH-Einheit ist das 2 kHz-Signal des Trigger-Oszillators.

Eine SaH-Einheit wurde deshalb zur Gleichrichtung verwendet, damit Spitzenwertgleichrichtung mit geringem Ripple möglich ist und trotzdem keine zu großen Zeitkonstanten die Regeleigenschaften des Gerätes beeinflussen. Lange Regelzeiten führen zur Aufmagnetisierung des Ringbandkerns und somit zu einer Verfälschung des Meßergebnisses. Eine Aufmagnetsierung hat aber noch eine weitere unangenehme Folge: Die Phasenlage des 2 kHz-Signals wird gedreht. Dadurch kann zuerst die Empfindlichkeit beeinträchtigt werden und bei weiterer Drehung aus der Gegenkopplung eine Mitkopplung werden. Die Schnelligkeit des Gleichrichters geht daher in die Meßgenauigkeit wesentlich ein. Das gleichgerichtete Signal wird verstärkt und einem Stromverstärker zugeführt, dessen Ausgangsstrom den Strahlstrom kompensiert. An einem Meßwiderstand kann der Strahlstrom über ein hochohmiges Digitalvoltmeter gemessen werden. Der gemessene Strom wird jedoch auch am Gerät direkt an einem Zeigergerät mit geringerer Genauigkeit angezeigt.

Über eine weitere Wicklung können die Ringe entmagnetisiert werden. Dieselbe Wicklung kann aber auch dazu verwendet werden, definierte Strahlströme mit Hilfe eines eingebauten Netzgerätes zu simulieren und damit die Funktionsfähigkeit des Gerätes rasch zu überprüfen.

3. Mechanischer Aufbau des Meßkopfes

Der mechanische Aufbau des Meßkopfes ist in Abb. 2 dargestellt. Die beiden Ringe sitzen auf einem Keramikzylinder, der die Vakuumkammer bildet. Sie sind an drei Seiten mit μ -Metall gegen äußere Magnetfelder abgeschirmt. Während des Ausheizens wird zwischen Ringen und Abschirmung Luft mit einem Ventilator durchgeblasen, um eine Erwärmung der empfindlichen Ringe zu verhindern. Die Wicklungen werden nach oben geführt und münden in die Stecker, die aus Platzgründen stachelförmig angebracht sind. Die Keramik ist innen streifenförmig metallisiert. Die Streifen sind nur an einer Seite mit der Vakuumkammer verbunden, damit eventuell an der Kammerwand entlang fließende Ströme nicht die Messung beeinträchtigen können. Die Kammern links und rechts des Meßkopfes sind durch Bügel, die außerhalb der Ringe

liegen, elektrisch verbunden.

4. Die Ringbandkerne und ihre Bewicklung

Die Ringe sind aus Ultraperm 10 von der Firma Vakuumschmelze hergestellt. Der Kernquerschnitt beträgt 1 cm^2 . Der mittlere Umfang ist 0.565 m . Die Permeabilität wurde bei DESY gemessen und beträgt 35700 .

Da Ultraperm 10 extrem weich ist, wurden von DESY Hohlringe aus Aluminium angefertigt, in die das Ringmaterial bei Vakuumschmelze eingelegt wurde.

Die Ringbewicklung ist in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Entsprechend dem Blockschaltbild aus Abb. 1 befinden sich insgesamt vier verschiedene Wicklungen an jedem Ring:

a.) Rückkoppelwicklung: Über diese Wicklung wird das Gleichstromsignal zur Neutralisation des Strahlstroms geführt. Die Richtung des Magnetfeldes muß daher in beiden Ringen gleich sein, da auch der Strahl in beiden Ringen die gleiche Feldrichtung erzeugt.

b.) Signalwicklung: Mit diesen Wicklungen wird das verzerrte Signal abgenommen. Die Wicklungen der beiden Ringe sind so hintereinander geschaltet, daß sich die Signale aus den beiden Ringen addieren. Das geschieht aus folgendem Grund: Die Übertragungsfunktion für die Übertragung der 1 kHz Anregung zur Signalwicklung lautet folgendermaßen, wenn nur Glieder bis zur zweiten Ordnung betrachtet werden:

$$U_1 = a_1 I + b_1 I^2$$

$$U_2 = b_2 I + b_2 I^2$$

Die erste Gleichung steht für den ersten Ring, die zweite für den zweiten. I ist der Anregungsstrom, U die Spannung, die an den Wicklungen abgenommen wird. Beide Ringe werden gegenphasig angeregt. Die Spannungen, die in den Signalwicklungen der beiden Ringe induziert werden, lauten daher:

$$U_1 = -a_1 \sin \omega t + b_1 \sin^2 \omega t$$

$$U_2 = a_2 \sin \omega t + b_2 \sin^2 \omega t$$

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

Bei Addition der beiden Gleichungen subtrahieren sich die unerwünschten Grundwellen, während sich die erste Oberwelle addiert.

- c.) Anregungswicklung: Die beiden Anregungswicklungen sind aus den unter b.) genannten Gründen gegenphasig.
- d.) Entmagnetisierungswicklung: Die Richtung des durch die Entmagnetisierungswicklung hervorgerufenen Magnetfeldes muß für beide Richtungen gleich sein, da diese Wicklung auch zu Testzwecken verwendet wird und daher dasselbe wie für a.) gilt.

5. Beschreibung der Teileinschübe

5.a. Der Oszillatoreinschub

Die Schaltung des Oszillatoreinschubs ist in Abb. 5 dargestellt. Kernstück des Einschubs ist ein quarzstabilisierter 1 MHz Generator, der am unteren Bildrand zu erkennen ist. Ein 1 MHz Quarz wurde deshalb gewählt, da Quarze für diese Frequenz eine gute Langzeitstabilität aufweisen. Die Frequenz wird über drei Zähler vom Typ SN 7490 auf 2 kHz und dann noch einmal auf 1 kHz heruntergeteilt. Das 1 kHz-Signal gelangt über den einen der vier Nand-Bufferverstärker des Bausteins SN 4930 über den Längstransistor 2N3820 an den Ausgang. Über den Längstransistor kann die Amplitude des Ausgangssignals verändert werden, wie schon im Blockschaltbild angegeben wurde.

Neben dem 1 kHz Ausgang werden auch zwei Ausgänge für 2 kHz benötigt: Einer für das Schalten der sample-and-hold-Schaltung und der zweite für die Nullpunktsunterdrückung für 2 kHz. Beim ersten Ausgang werden Pulsbreiten von 10 µsec benötigt, beim zweiten ein symmetrischer Rechteckpuls (Pulsbreite 250 µsec). Die Phase der Rechtecksspannung muß von 0-360 Grad verändert werden können. Da RC-Glieder über lange Zeit nicht genügend stabil sind, wurde eine digitale Verschiebung der Phase entwickelt. Die Phase kann zwischen 0 und 360° in tausend Schritten verändert werden:

Das 1 MHz Rechtecksignal wird im Generator differenziert und gleichgerichtet, so daß am Ausgang eines Nand-Gliedes eine Pulsfolge mit einer Pulsfrequenz von 2 MHz entsteht (linker Teil des Quarzoszillators).

Der 2 kHz Puls vom Untersetzter wird differenziert und öffnet Flip-Flop A bzw. B. Dadurch gelangt die 2 MHz Pulsfolge auf den jeweils oberen Zähler (3 x SN74190). Nachdem die an den Contraves-Schaltern eingestellte Zahl durchgezählt wurde, wird Flip-Flop C betätigt und die 2 MHz-Pulsfolge gelangt zu den unteren Zählern, die nach jeweils 10 bzw. 250 μ sec wieder die Flip-Flops C betätigen. Die Ausgangsspannung an den beiden FF's wird über den Buffer verstärkt.

Die Amplitude des Ausgangssignals für die Nullpunktunterdrückung wird an dem Potentiometer 5 k grob und an dem Potentiometer 100 Ω fein eingestellt.

5.b. Der Impedanzwandlerereinschub

Die Schaltung des Einschubes ist in Abb. 6 dargestellt. Alle drei im Blockschaltbild erkennbaren Impedanzwandler sind in dieser Einheit zusammengefaßt. Der oberste dient zur Entkopplung zwischen Signalwicklung und 2 kHz Filter. Versuche haben ergeben, daß die günstigste Entkopplung durch einen als Verstärker geschalteten μ A 741 erreicht wird. Der mittlere Impedanzwandler dient zur Entkopplung zwischen 1 kHz-Filter und Stromverstärker und der unterste zur Entkopplung nach dem 2 kHz Filter. Mit Hilfe des an die Frontplatte geführten 20 k Ω -Potentiometers kann die Amplitude des 1 kHz Anregungsstromes eingestellt werden.

5.c. Der Filterereinschub

Der Aufbau des Filterereinschubs war sehr schwierig, da die notwendige starke Unterdrückung der unerwünschten Harmonischen einen schmalbandigen Filter voraussetzt. Da in diesen Frequenzbereichen nur aktive Filter eingesetzt werden können, bedeutet das eine große Abhängigkeit der Durchlassfrequenz von der Temperatur. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, wurden alle Filter in einen Thermostat eingebaut, der auf $45 \pm 0.1^\circ$ Celsius erwärmt wird. In diesem Thermostaten befindet sich sowohl der 1 kHz als auch der 2 kHz Filter (Abb.7). Für den 2 kHz Filter reichte ein einziger Filter nicht aus, es wurden insgesamt zwei Filter hintereinandergeschaltet. 3 db Bandbreite des 2 kHz-Filters : 30 Hz, 3 db Bandbreite des 1 kHz-Filters: 50 Hz.

5.d. Der Gleichrichtereinschub

Die Schaltung ist in Abb. 8 dargestellt. Das von einem Meßwiderstand abgenommene Signal wird gleichgerichtet (erster Operationsverstärker) und integriert (zweiter Operationsverstärker).

5.e. 1 kHz-Stromverstärker-Einschub

Kernstück des 1 kHz-Stromverstärkers ist der Operationsverstärker MI. 741 (Abb.9). Er treibt die beiden emittergekoppelten Transistoren und die nachfolgende Darlingtonstufe. Da die Schaltung als Gegentaktstufe ausgelegt wurde, müssen über die beiden 10 k Ω Potentiometer Grundströme eingestellt werden, um die beiden Transistoren im linearen Bereich betreiben zu können. Die Rückkopplung erfolgt kapazitiv über einen 2500 μ F-Kondensator. Kapazitiv gekoppelte Stromverstärker neigen dazu, gleichstrommäßig zu schwimmen. Der 4.7 M Ω Widerstand als zusätzliche Rückkopplung verhindert das Schwimmen.

5.f. sample and hold Einschub

Das gefilterte 2 kHz Signal wird in diesem Einschub gleichgerichtet (Abb.10). Der eigentliche SaH-Teil besteht aus dem Schalttransistor 3N765726, einem 10 k Ω Widerstand und einem 47 nF Kondensator. Öffnet ein Puls vom Oszillatoreinschub den Transistorschalter, wird der Kondensator aufgeladen und kann sich nach Ende des Pulses nicht mehr über den 10 k Ω Widerstand entladen, da dann der Schalttransistor sperrt. Der gespeicherte Spannungswert wird über Integrationsverstärker verstärkt. Beide Verstärker sind chopperstabilisiert, um die Nullpunktsdrift möglichst gering zu halten. Mit Hilfe des 10 k Ω -Potentiometers kann die Schleifenverstärkung der gesamten Schaltung eingestellt werden.

5.g. Gleichstromverstärkereinschub

Der Gleichstromverstärker (Abb.11) ist ähnlich aufgebaut wie der 1 kHz-Verstärker.

5.h. Der Einschub für die analoge Strahlstromanzeige

Dieser Einschub (Abb.12) erfüllt zwei Funktionen: Eine analoge Anzeige des Strahlstroms und die Möglichkeit, die gesamte Anlage mit einem 30 mA Teststrom zu prüfen. Bei der Strahlstromanzeige wird die Spannung am Meßwiderstand über einen Impedanzwandler abgegriffen (Abb. 12) und über einen Meßverstärker (QFT 5) an einem Zeigerinstrument angezeigt.

Die Meßbereiche sind: 50, 100, 500 mA, 1 A und 10 A.

Der Teststromgenerator ist im unteren Teil der Schaltung in Abb. 12 dargestellt. Ein Spannungsgenerator ($\mu\text{A 723}$) erzeugt eine konstante Spannung, die mit Hilfe eines Stromverstärkers (QFT_2) in einen konstanten Strom von 30 mA verwandelt wird. Mit Hilfe eines Tasters kann dieser Strom dem gemessenen Strom über die Entmagnetisierungswicklung überlagert werden.

5.h. Der Entmagnetisierungseinschub

Die Schaltung des Entmagnetisierungseinschubs ist in Abb. 13 dargestellt. Bevor entmagnetisiert wird, muß die Schleifenverstärkung auf 0 gedreht werden. Danach wird der Taster gedrückt und mehrmals der Handtrafo von voller Spannung auf Null gedreht. Während der Entmagnetisierung leuchtet eine Kontroll-Leuchte.

5.i. Der Netzeinschub

Der Netzeinschub liefert +5 V bei einem maximalen Strom von 3 A und ± 15 V bei einem maximalen Strom von 2 A.

6. Meßergebnisse

Die Messungen wurden im Labor mit einem Prototyp durchgeführt. Später wurde dieser Prototyp ins Synchrotron eingebaut und 12 Tage lang der Strahlstrom aufgezeichnet. Die Nullpunktsdrift war ähnlich wie im Labor.

Folgende Eigenschaften des Prototyps wurden im Labor untersucht:

- a.) Nullpunktsdrift
- b.) Linearität und Meßfehler
- c.) Ausregelverhalten bei schneller Strahlstromänderung.

6.a. Nullpunktsdrift

Die Nullpunktsdrift wird vorwiegend durch die magnetischen Ringe verursacht: die magnetischen Eigenschaften der Ringe ändern sich mit der Temperatur, schon relativ kleine Stöße rufen irreversible Änderungen hervor und es treten Alterungsprozesse auf. Typische Werte für die Nullpunktsdrift, die im Labor gemessen wurden, sind etwa $\pm 600 \mu\text{A} / 24$ Stunden. In den Nachtstunden wurde im Labor eine Drift von etwa $\pm 50 \mu\text{A}$ pro Stunde gemessen. Am Tage ist sie höher: etwa $\pm 100 \mu\text{A}/\text{Stunde}$.

6.b. Linearität und Meßfehler

Die Kennlinie des Meßgerätes ist in Abb. 14 dargestellt. Auf der x-Koordinate ist der zu messende Strom, auf der y-Koordinate der gemessene Strom dargestellt. Der Monitor ist so eingestellt, daß die Linearität bei etwa 6 A merklich schlechter wird. Durch entsprechende Einstellung kann man jedoch den Bereich auf maximal 10 A erweitern. In der nachfolgenden Tabelle sind mehrere Meßreihen zusammengestellt. Die Ablesung des zu messenden und des gemessenen Stromes erfolgt an Digitalvoltmetern. Aus den Messungen geht hervor, daß die Meßgenauigkeit bis etwa 10 mA im Mittel bei 1% liegt, zwischen 10 und 100 mA im Mittel etwa bei 0.3% . Oberhalb 100 mA ist die Meßgenauigkeit besser als 0.1%, typisch etwa 0.05% .

Die Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Strahlstromstärke hängt damit zusammen, daß das Rauschen sowohl der Elektronik als auch des Magnetmaterials den Meßfehler bestimmen. Da die Meßmethode eine Nullpunktmethode ist, ist der absolute Fehler weitgehend unabhängig vom gemessenen Strom, der relative Fehler wird jedoch bei höheren Strömen geringer.

Eingangsstrom in mA	Gemessener Stromwert in mA	Relativer Fehler in %	Eingangsstrom in mA	Gemessener Stromwert in mA	Relativer Fehler in %
0.5	0.51	2	49.5	49.4	0.2
1	1.03	3	99.5	99.45	0.05
2	2.03	1.5	205.8	205.7	0.05
3	3.03	1	304.6	304.4	0.07
4	4.02	0.5	403.7	403.5	0.05
5	5.03	0.6	504.0	503.8	0.04
6	6.05	0.83	605.5	605.1	0.07
7	7.05	0.71	699.3	699.0	0.04
8	8.05	0.63	818.5	818.4	0.01
9	9.04	0.44	909.2	909.7	0.06
10	10.01	0.1	1000.1	1000.5	0.04
20	20.11	0.55	1774.8	1777	0.12
30	30.00	0	2404.8	2407	0.09
40	40.07	0.18	3000	3000	0
50	50.25	0.5	3597	3599	0.06
60	60.13	0.22	4214.4	4214	0.01
70	70.24	0.34	4822.2	4821	0.03
80	80.13	0.16	5425.2	5426	0.02
90	90.06	0.07	6114	6114	0
100	100.08	0.08			

Tab. : Vergleich zwischen Eingangsstrom und gemessenem Strom zwischen 0.5 mA und 6 A.

6.c. Ausregelverhalten bei schneller Strahlstromveränderung

Der 2 kHz-Filter und die Integration des sample Signals bestimmen die Ausregelzeit. In Abb. 15 ist die Ausregelzeit in Abhängigkeit von der Stromstärke dargestellt. Der zu messende Strom wurde sprungartig geändert und gleichzeitig wurde am Oszillographen die Zeit gemessen, in der der gemessene Strom 99% des Endwertes erreichte.

Bei schneller Änderung des zu messenden Stromes werden die Ringe aufmagnetisiert. Eine Aufmagnetisierung erkennt man daran, daß der Endwert der Anzeige nur sehr langsam (einige 10 Sekunden) erreicht wird. Ist die Änderung des Stromes jedoch kleiner als die Ausregelzeit, kann es zu keiner Aufmagnetisierung kommen. Die beiden Kurven von Abb. 15 begrenzen somit den Bereich einer genauen Messung. Oberhalb der Kurven ist eine genaue Messung möglich, unterhalb treten Fehler durch Aufmagnetisierung auf. Je nach der Stärke der Aufmagnetisierung verschwindet der Fehler nach einigen Sekunden oder es bleibt ein Nullpunktfehler von einigen mA zurück, der durch die Nachstellung des Nullpunktes beseitigt werden kann.

7. Literatur

- 1) A.Sabersky: Precise Synchrotron Light Intensity Measurement
SPEAR - 113, April 1971
- 2) K.Unser: Beam Current Transformer with DC to 200 MHz Range,
ISR - Co /69-6, März 1969.

8. Verzeichnis der Abbildungen

- Abb.1 : Blockschaltbild des Strommonitors
- Abb.2 : Aufbau des Meßkopfes
- Abb.3 u.4: Bewicklung der Ringe
- Abb.5 : Schaltung des Oszillatoreinschubs
- Abb.6 : Schaltung des Impedanzwandler-einschubs
- Abb.7 : Schaltung des Filtereinschubs
- Abb.8 : Schaltung des Gleichrichtereinschubs
- Abb.9 : Schaltung des 1 kHz-Stromverstärkers
- Abb.10: Schaltung der sample and hold Einheit
- Abb.11: Schaltung des Gleichstromverstärkers
- Abb.12: Schaltung des Einschubs für die analoge Stromanzeige
- Abb.13: Schaltung des Entmagnetisierungseinschubs
- Abb.14: Kennlinie des Strommonitors
- Abb.15: Ein- und Ausregelzeit bei Sprungänderung des zu messenden Stroms auf 99% des Endwertes
- Abb.16: Gesamtansicht der Strommonitor-Elektronik

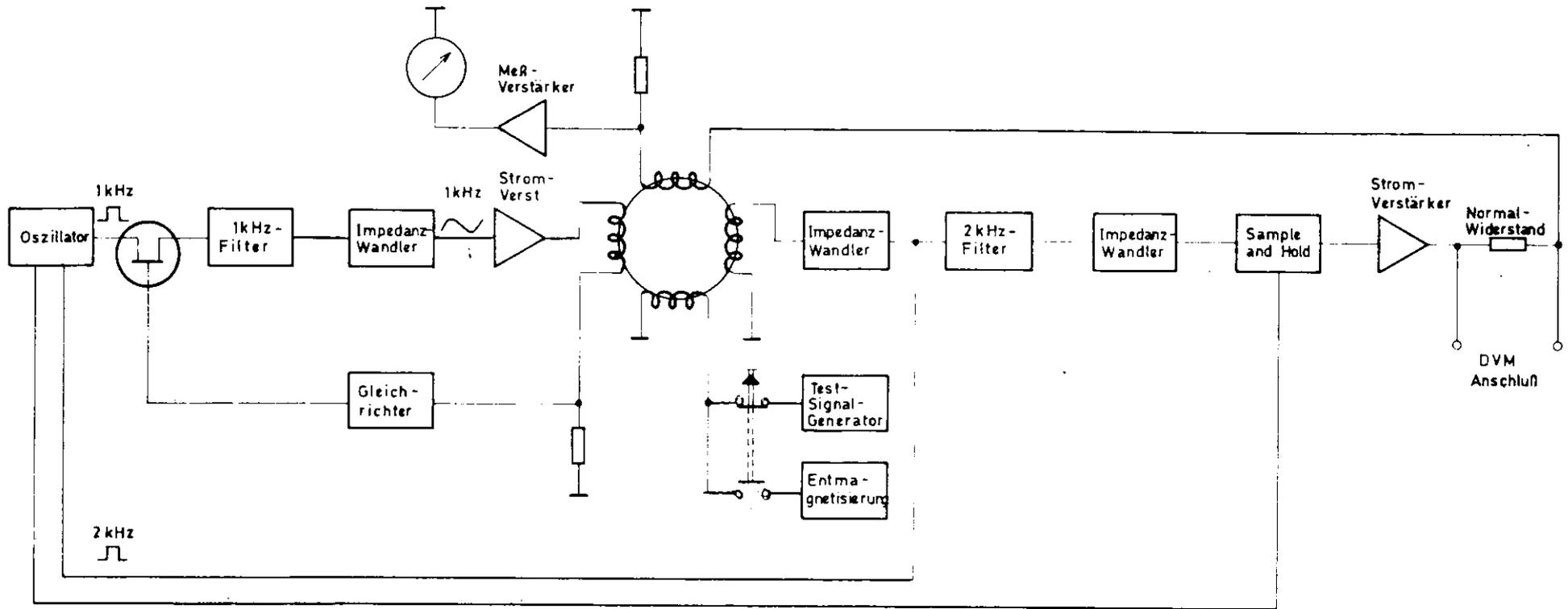


Abb. 1

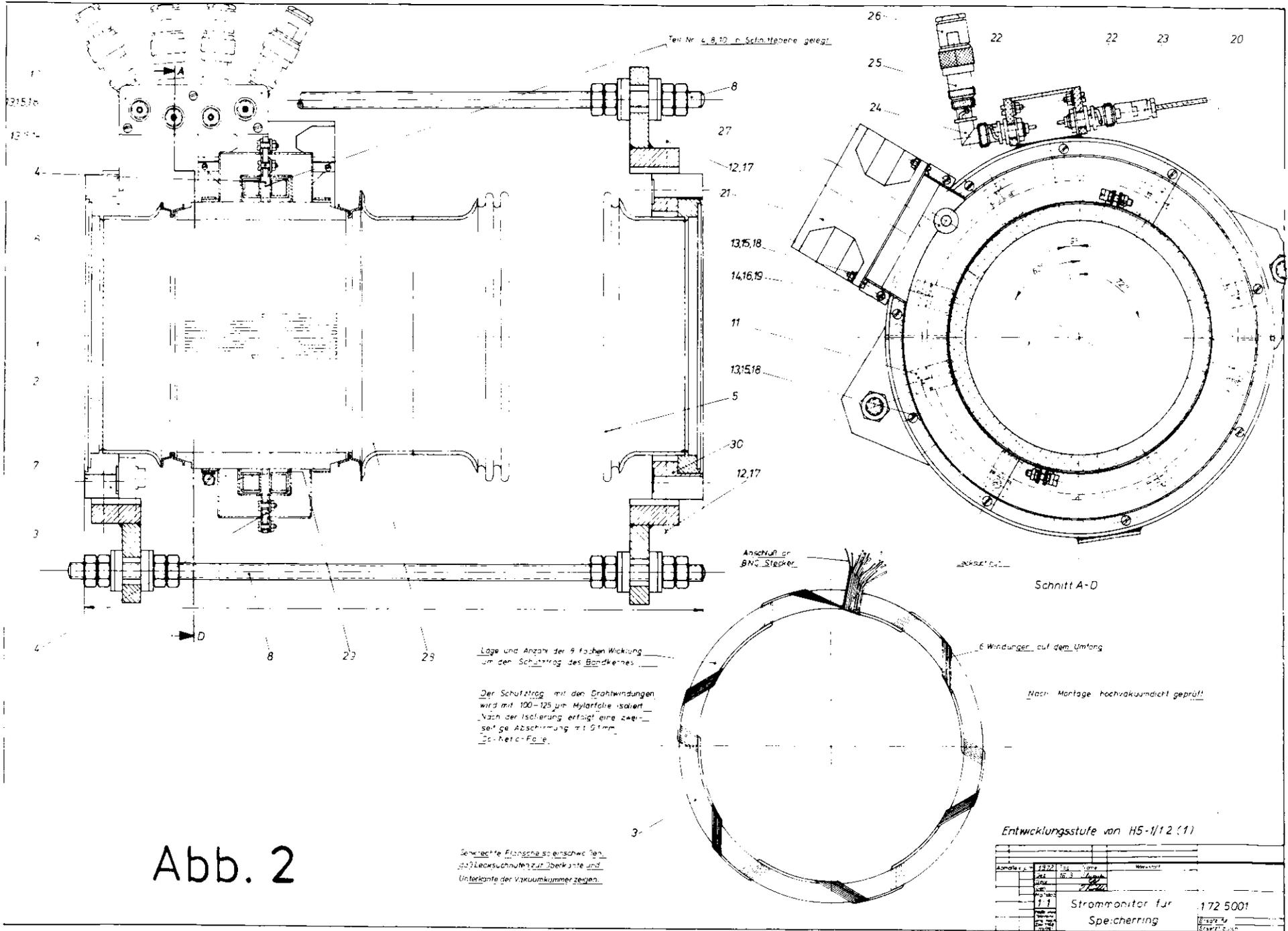


Abb. 2

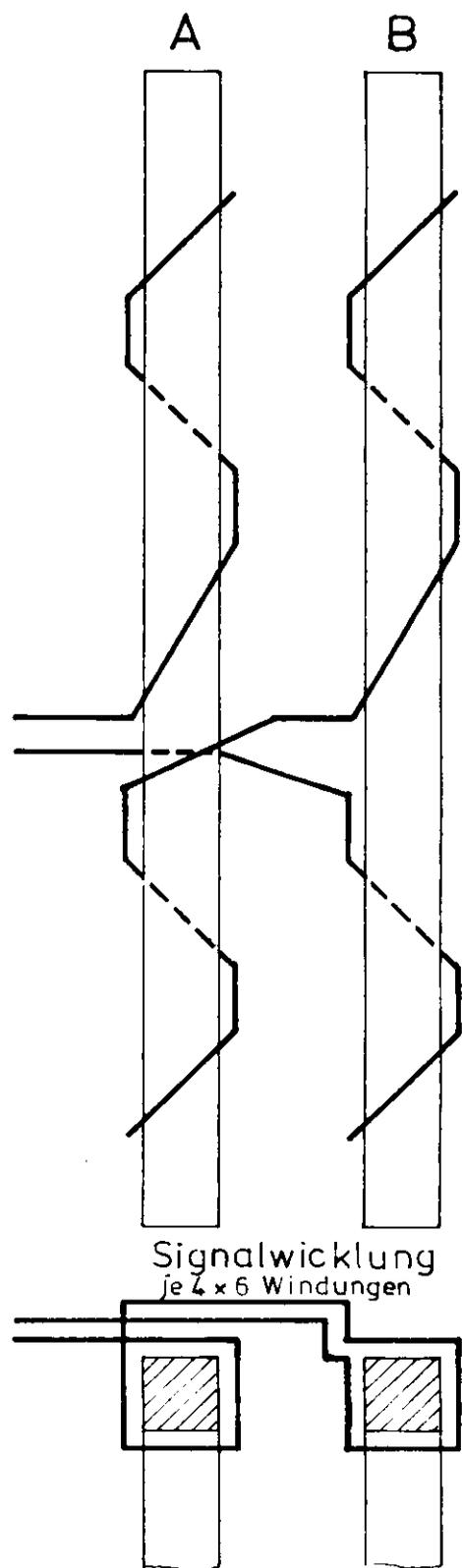
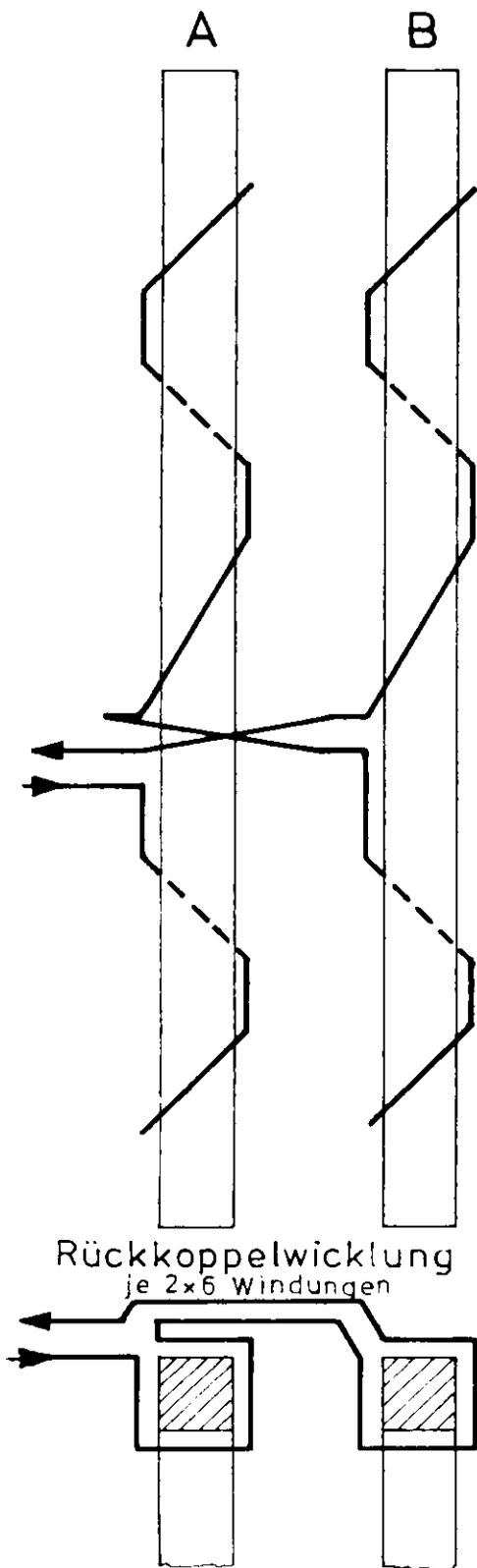


Abb. 3

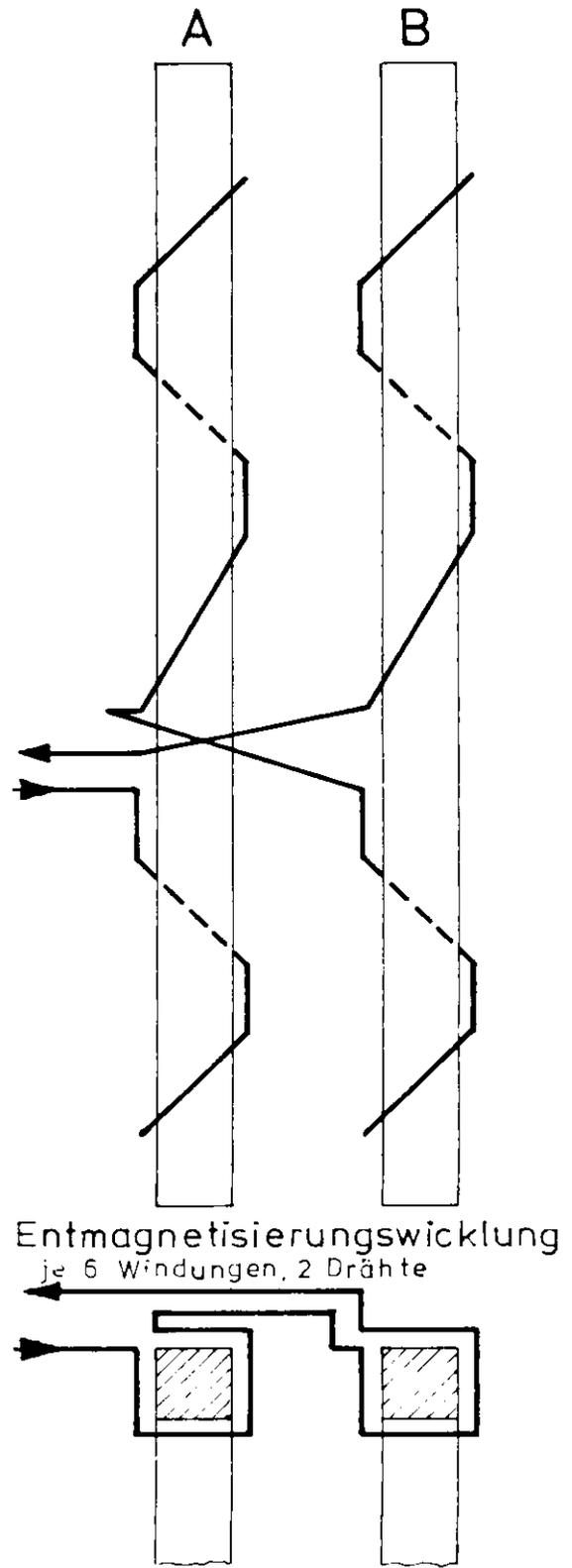
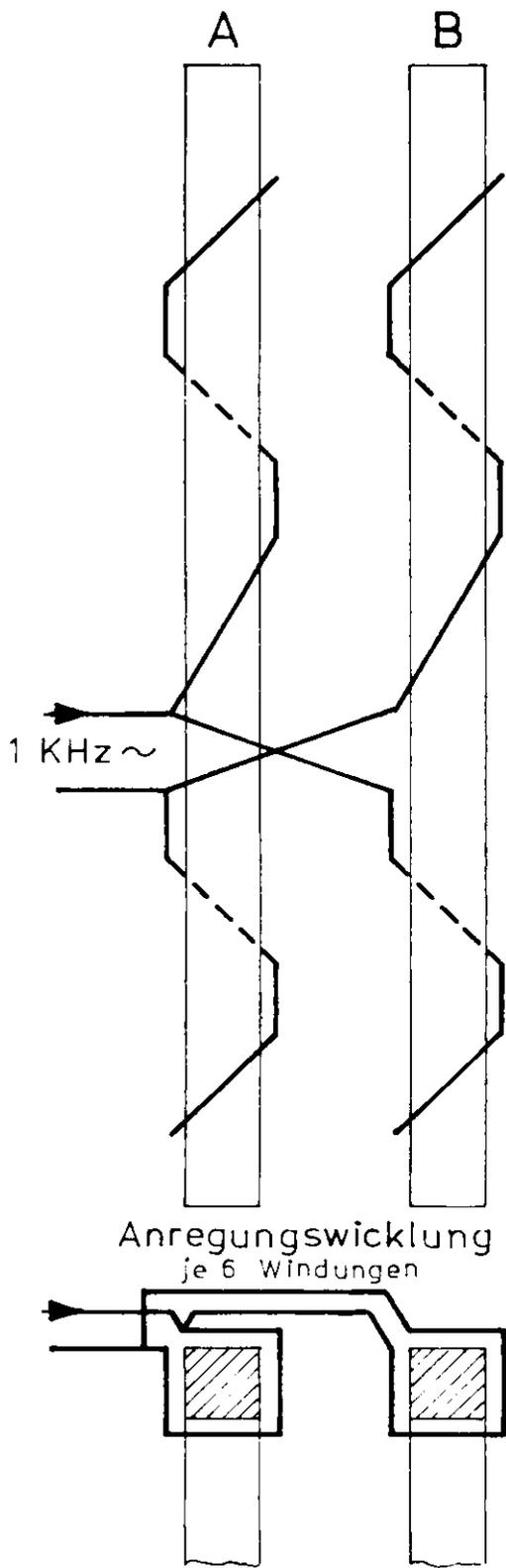


Abb. 4

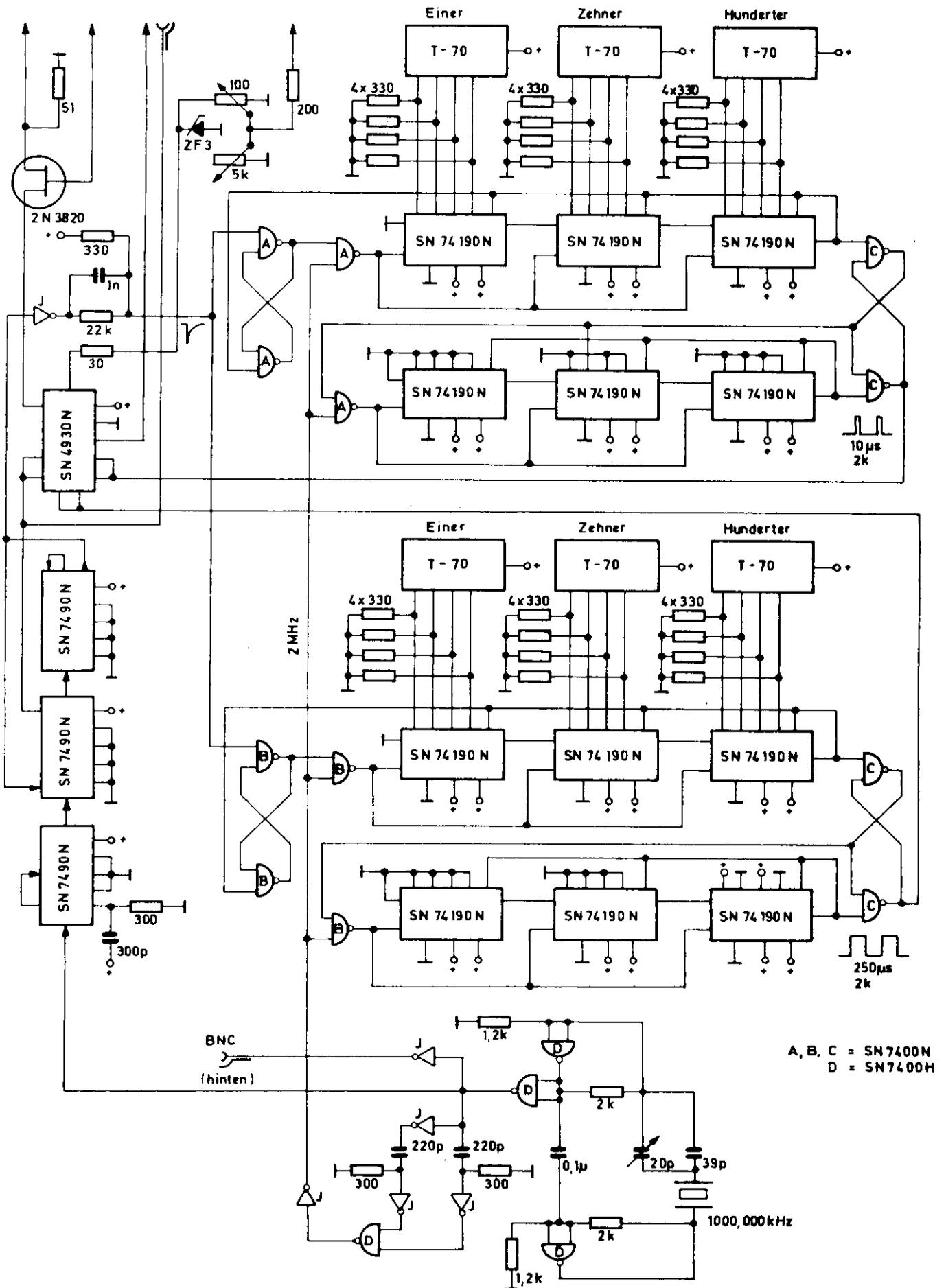


Abb. 5

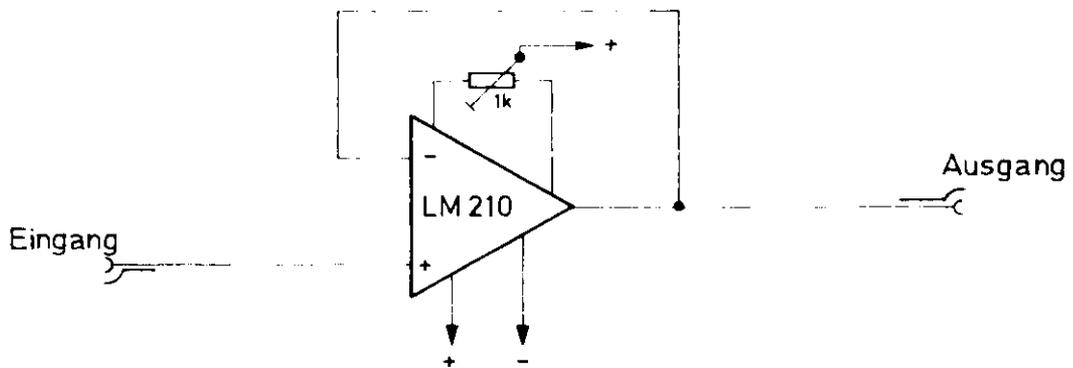
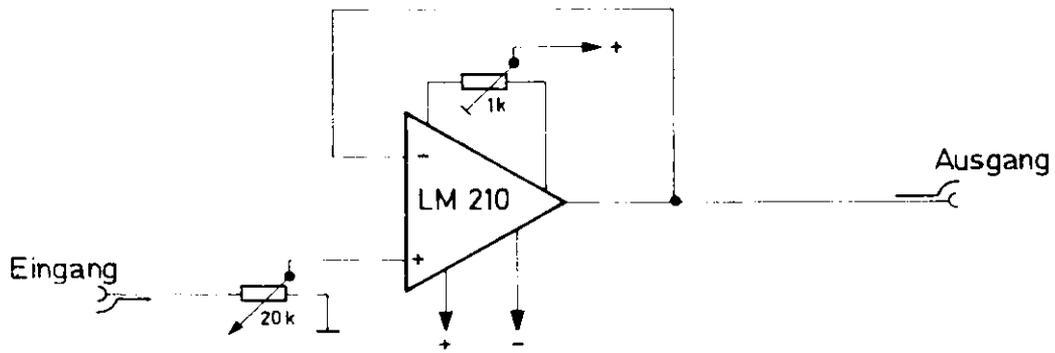
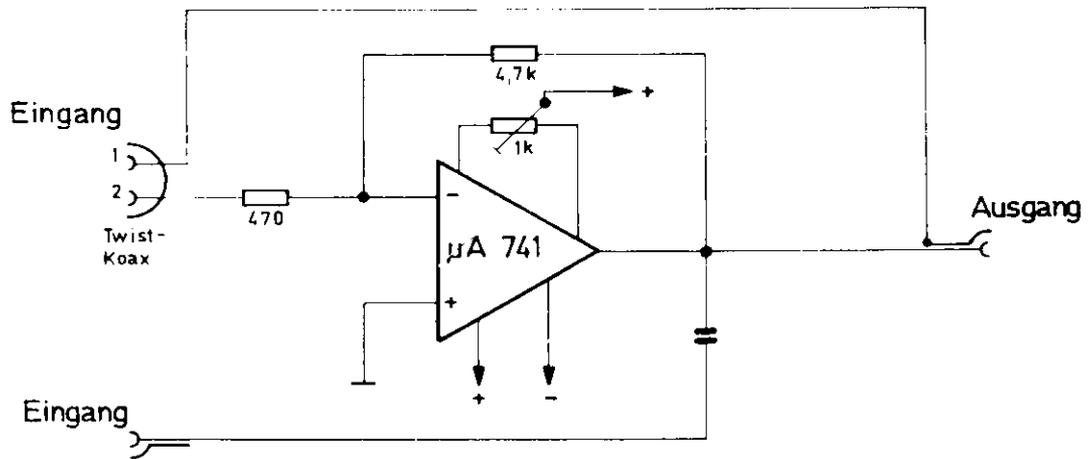


Abb. 6

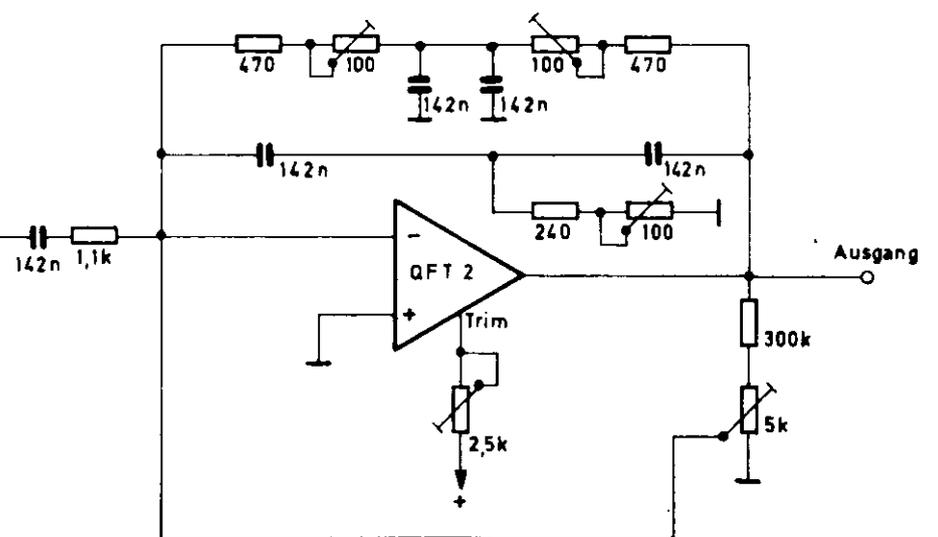
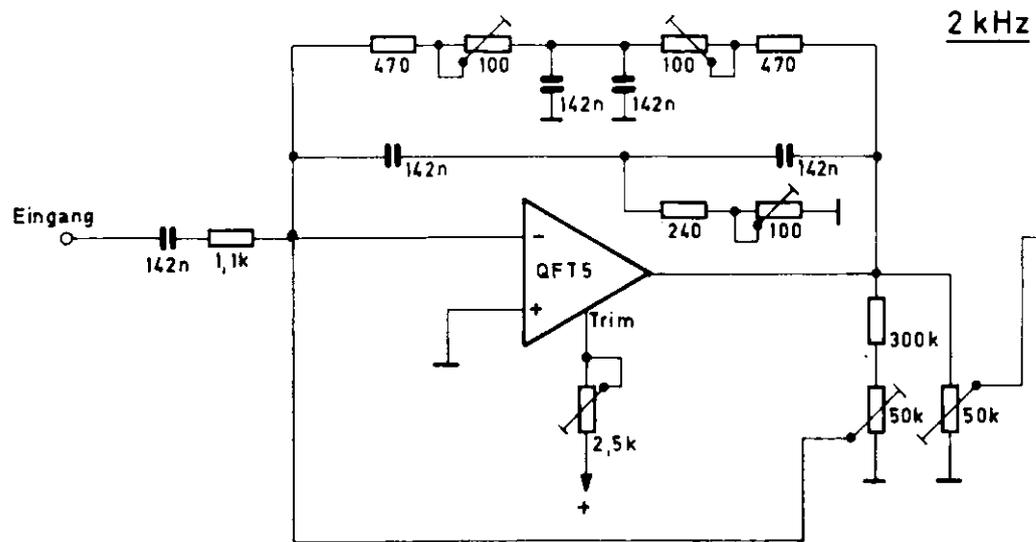
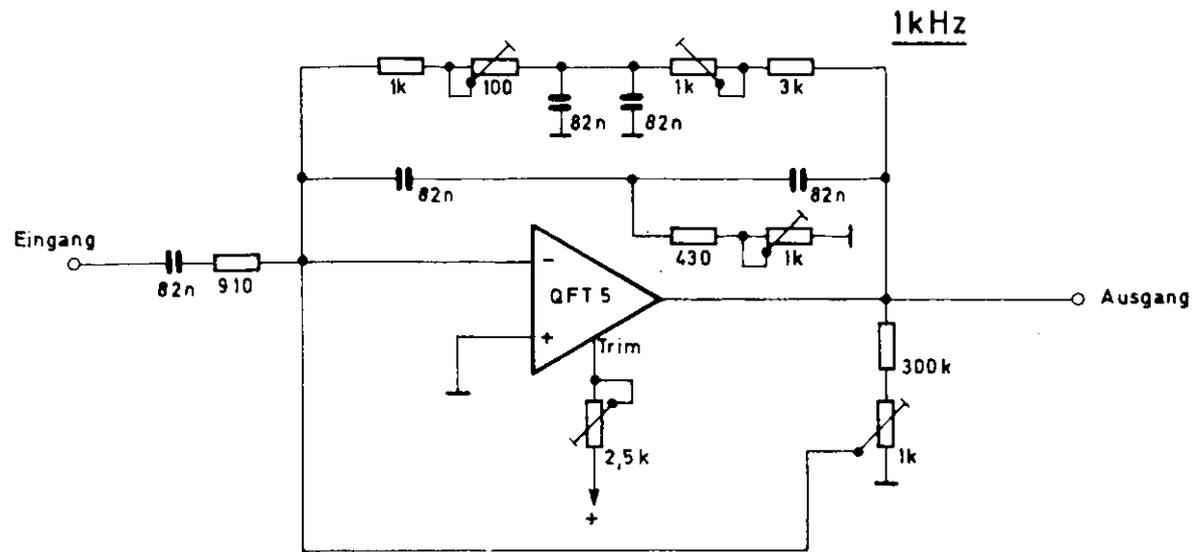


Abb. 7

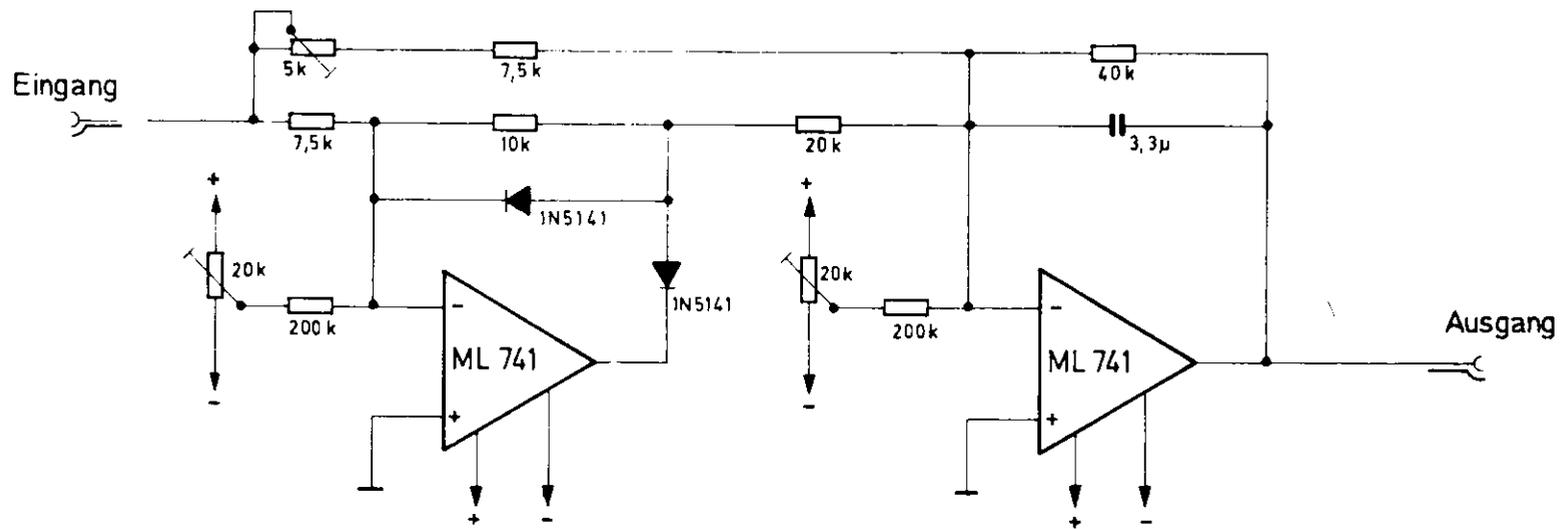


Abb. 8

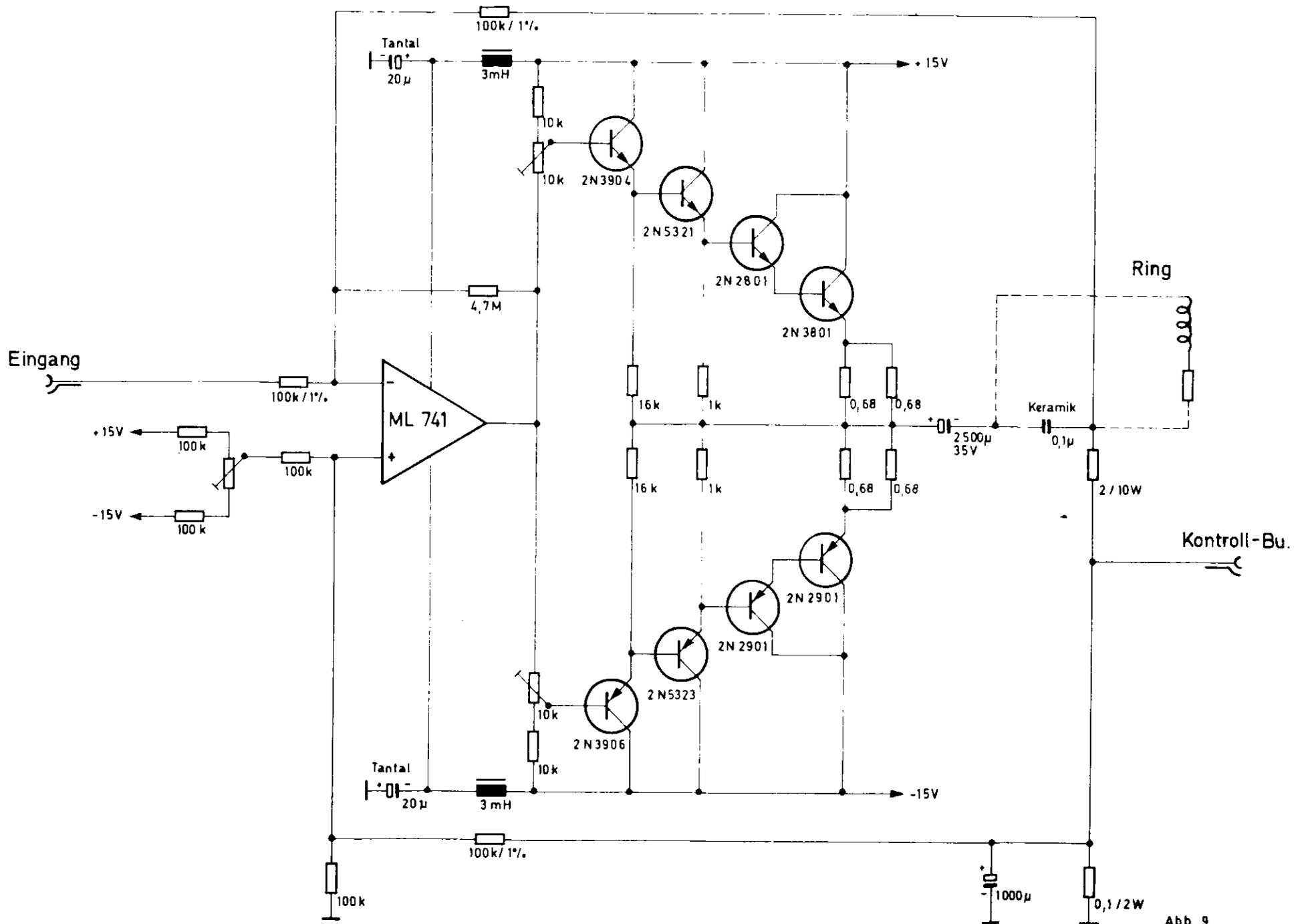


Abb. 9

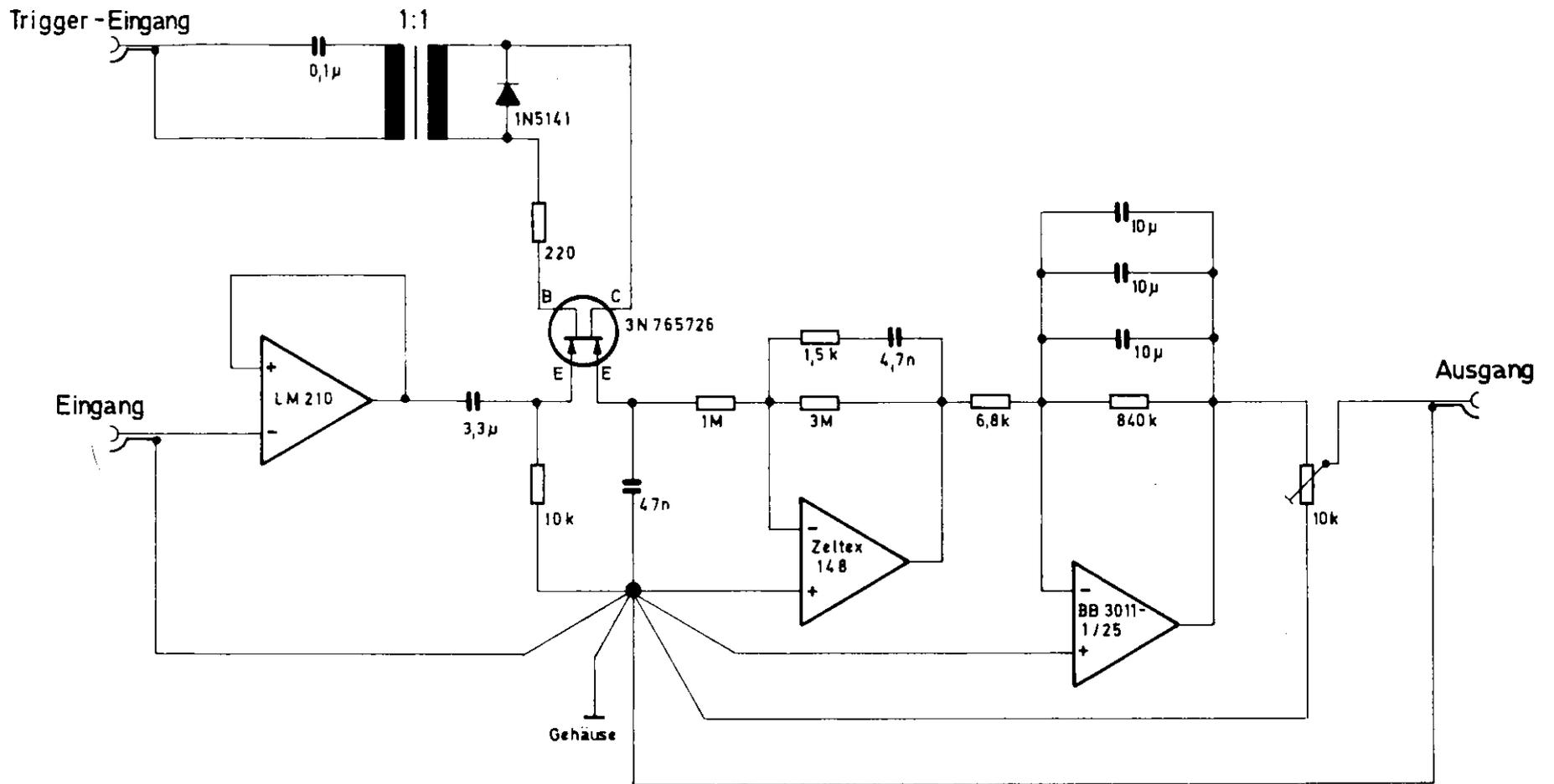


Abb. 10

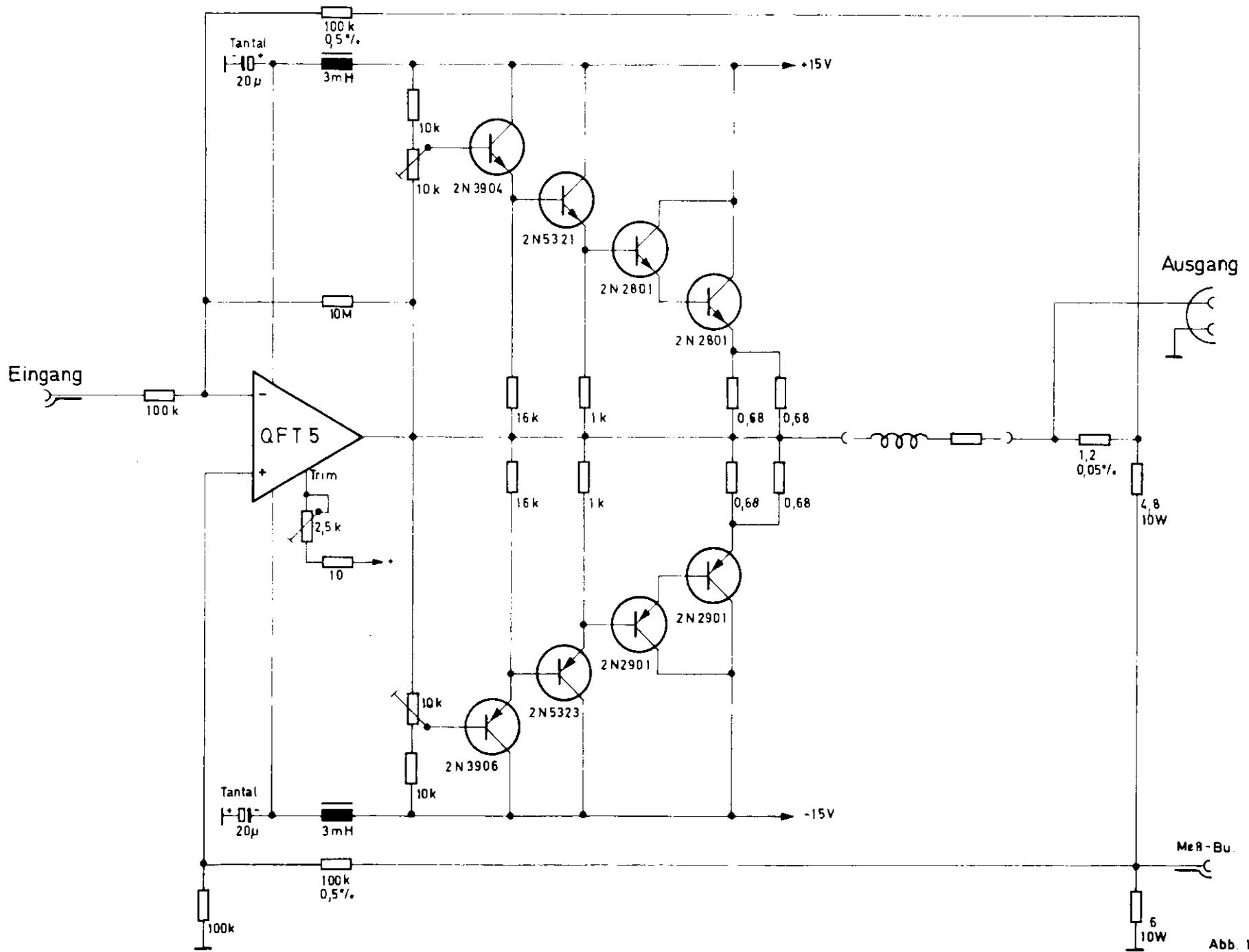


Abb. 11

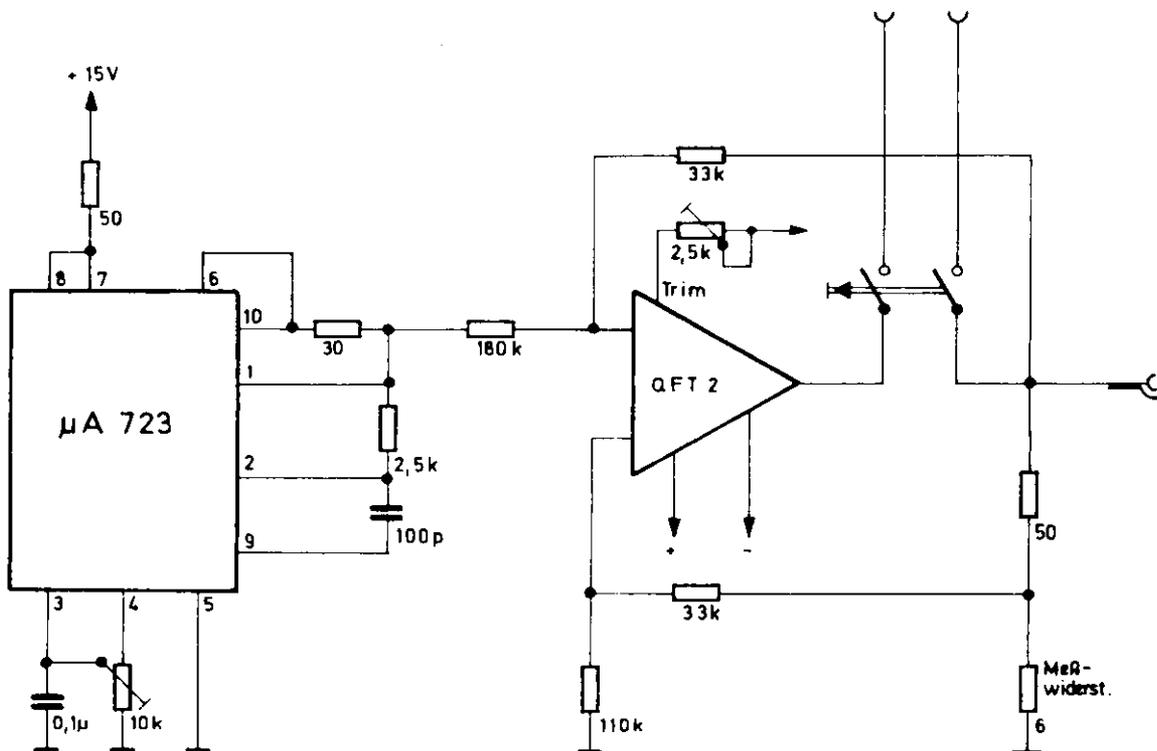
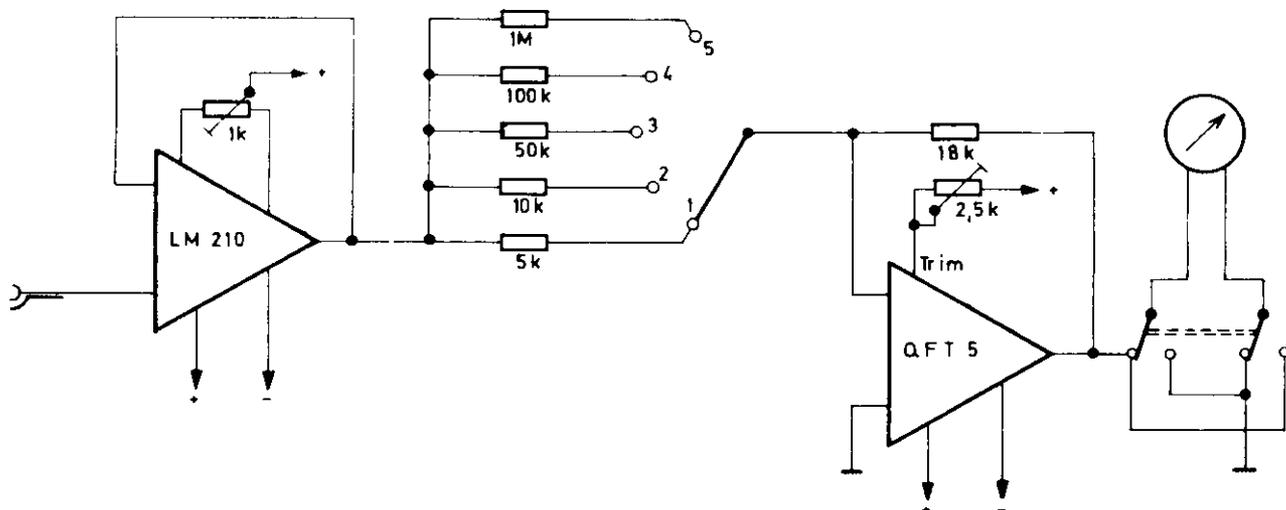


Abb. 12

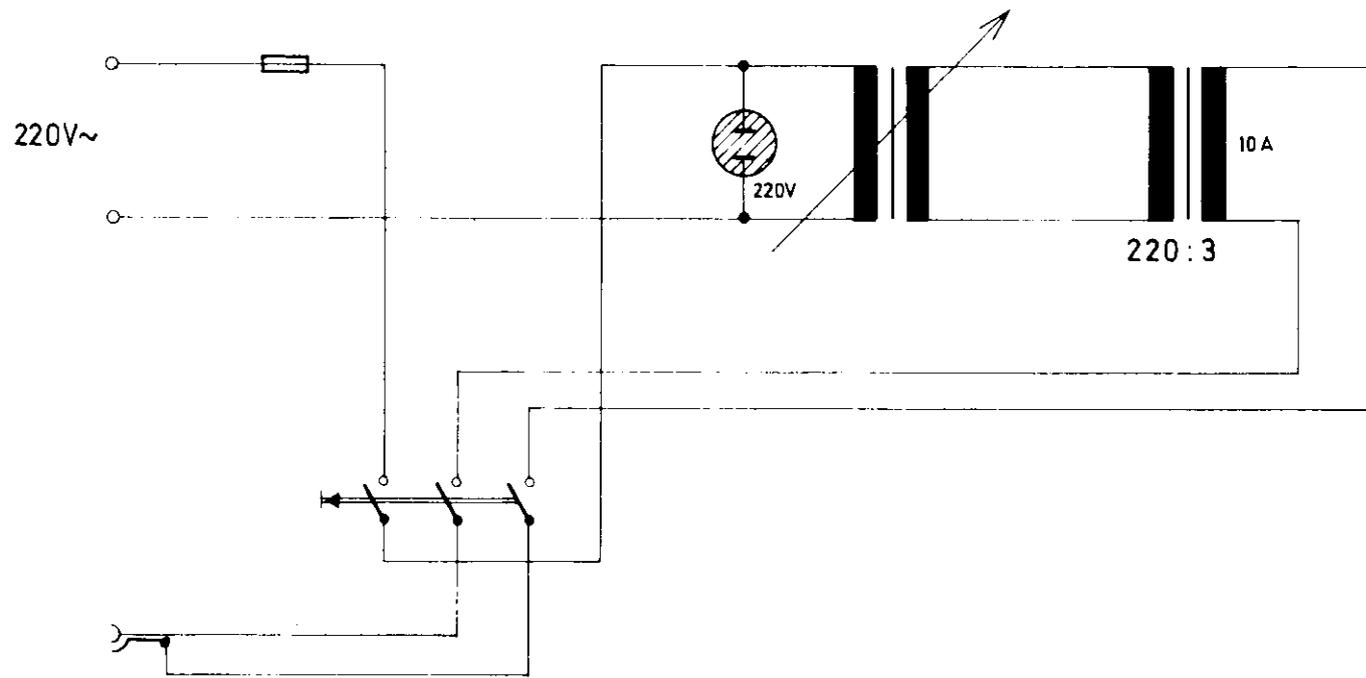


Abb. 13

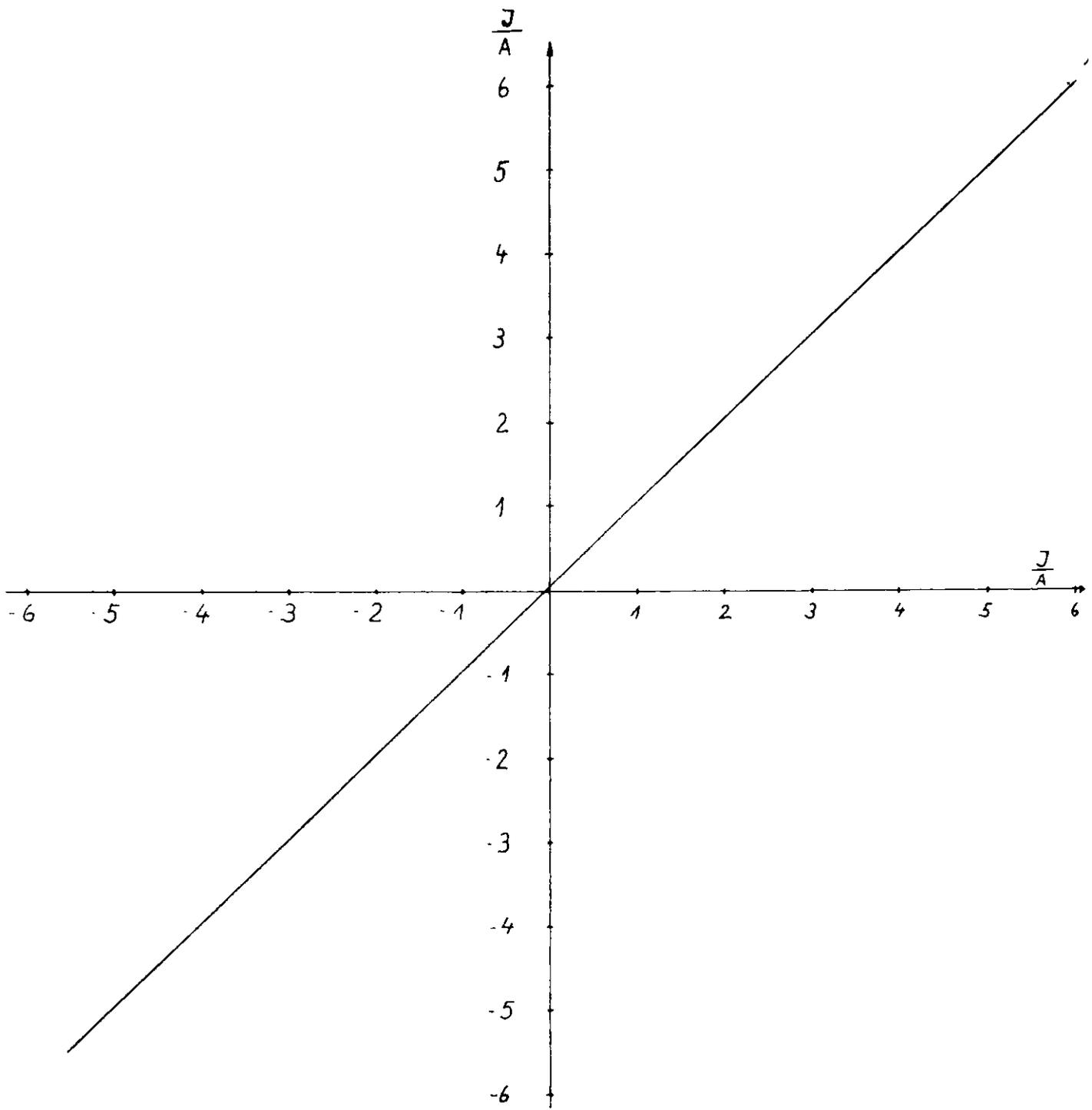


Abb. 14

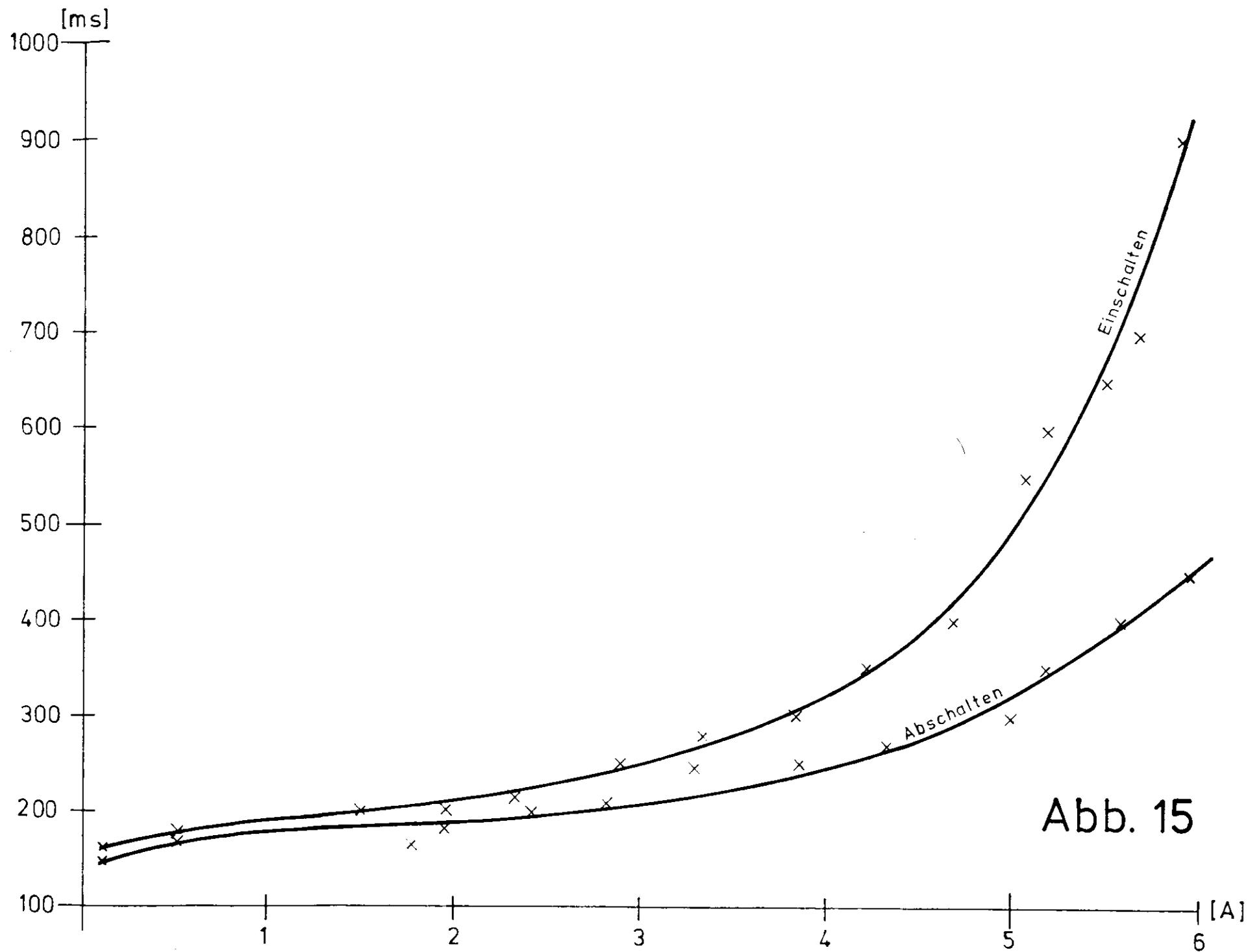


Abb. 15

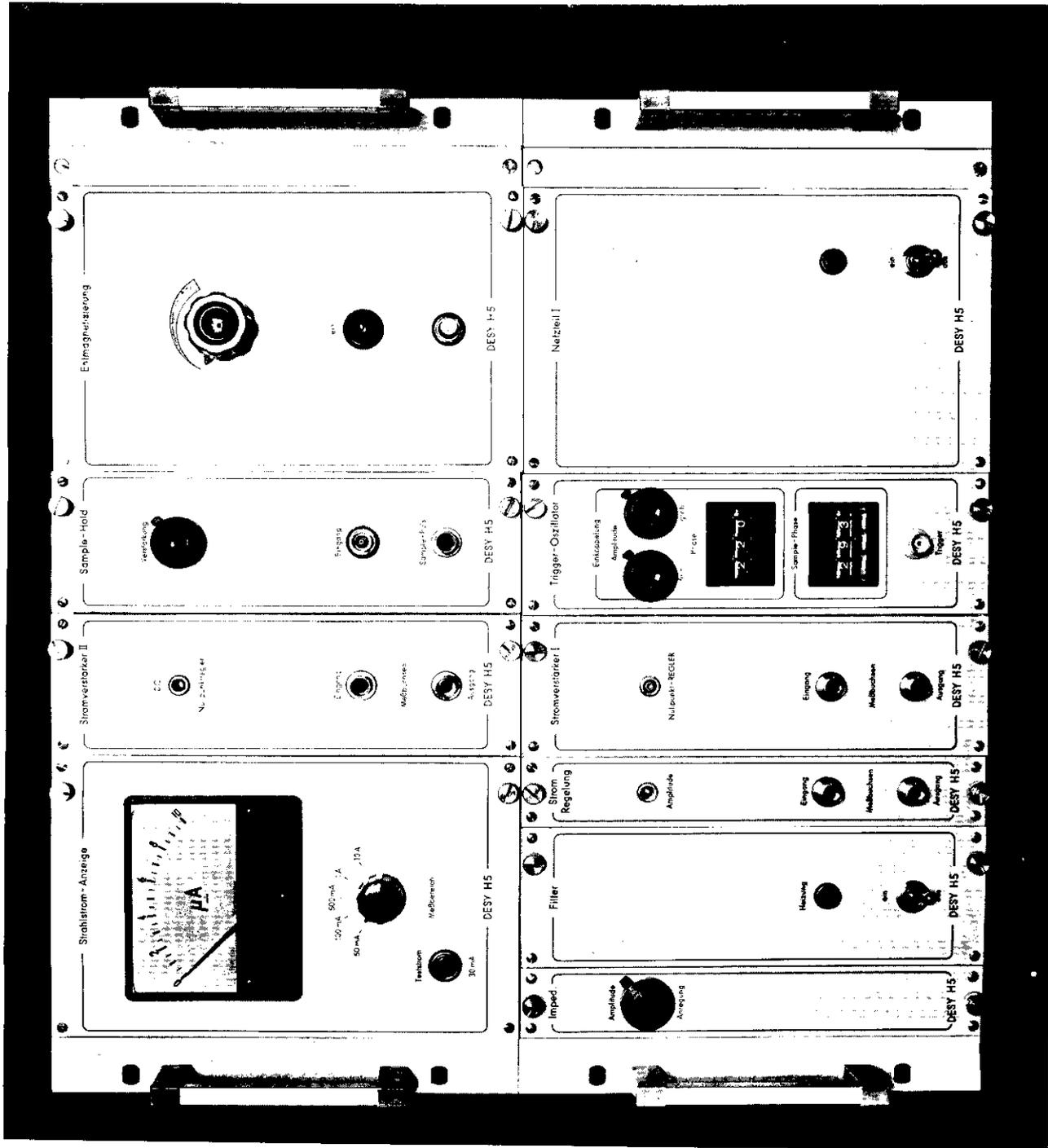


Abb. 16