

*Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Cremer, mit herzlichem Dank
für die Förderung überreicht. M. Paul*

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 98

Ein Modell zur doppelten Tonhöhenanzeige

von

Dipl.-Ing. Manfred Paul

B e r l i n

1 9 6 8

Ein Modell zur doppelten Tonhöhenanzeige

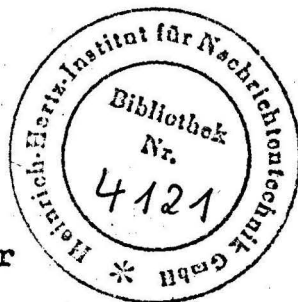
Zusammenfassung

Es werden der Aufbau und die Wirkungsweise eines Gerätes beschrieben, das - unter Vernachlässigung von Lautstärkeunterschieden - die Phänomene des Hüllkurvenhörens und der Darstellung der Oktavverwandtschaft von Tönen, Klängen und Residualklängen simulieren soll. Durch Vergleich mit subjektiven Untersuchungen am menschlichen Gehör werden die Fähigkeiten und Grenzen des Gerätes aufgezeigt.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung
-Berlin-Charlottenburg-

Der Bearbeiter

Manfred Paul
(Dipl.-Ing. Manfred Paul)



Der Abteilungsleiter

L. Gremer

(Prof.Dr.-Ing. L. Gremer)

Der Institutsdirektor

F.W. Gundlach

(Prof.Dr.-Ing. F.W. Gundlach)

Berlin-Charlottenburg, den 1. April 1968

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Nachbildungen des Hüllkurvenhörens
3. Realisierung des SCHREIBER-Modells
4. Beschreibung des gebauten Gerätes
 - 4.1 Gesamtkonzeption
 - 4.2 Einzelne Baugruppen
 - 4.2.1 Die Triggerschaltung
 - 4.2.2 Die Frequenzuntersetzungs- und Impulstiefpaßschaltung
 - 4.2.3 Der Impulsformer
 - 4.2.4 Die Nachselektion
 - 4.2.5 Der Ansteuerverstärker
 - 4.2.6 Das Koinzidenzgatter und die Impulsintegrierstufe in der Matrix
 - 4.2.7 Die Schaltung der Glühlampen und deren Spannungsversorgung
5. Beobachtungen mit dem Tonhöhenmodell
6. Vergleich mit Eigenschaften des Gehörs
7. Literaturhinweise

1. Einleitung

Die Messungen, die G. v. BEKESY /1/ an Schnecken und Schneckenmodellen vornahm, widerlegten die HELMHOLTZsche Resonatorentheorie /2/ und erbrachten den Beweis, daß die Basilarmembran nur eine Grobselektion bewirkt. Die Feinselektion des Gehörs scheint erst im Neuralapparat zu erfolgen.

Die Untersuchungen von SEEBECK /3/, HERRMANN /4/ und SCHOUTEN /5/ zeigten, daß das Ohr auch bei Residualklängen das Chroma eines Klanges, d.h. seine Lage innerhalb der Oktave der harmonischen Tonskala, erkennt, obwohl die Fourieranalyse des Residualklanges den Grundton nicht liefert. Das Erkennen tritt nur auf, wenn die Hüllkurve des Signals ausgeprägte Spitzen enthält, deren Periode gleich dem des fehlenden Grundtones ist.

Eine weitere Eigenschaft des menschlichen Gehörs ist das Erkennen des Chromas und der Oktavverwandtschaft von Klängen und Tönen.

2. Nachbildungen des Hüllkurvenhörens

Eine vieldiskutierte Theorie zum Hüllkurvenhören wurde von LICKLIDER /8/ entwickelt. Es wird dabei angenommen, daß nach der Grobselektion der Basilarmembran in den Nervenbahnen eine Autokorrelation der Signale stattfindet und aus der Erregung dieses neuralen Korrelatorfeldes auf die Periode des Schallereignisses geschlossen werden kann (s. Abb. 1).

Diese Theorie ist keine Einortstheorie, da sie einem festen Ton oder Klang nicht einem festen Ort in dem Korrelatorfeld zuordnet. Sie bildet zudem die Oktavverwandtschaft von Klängen nicht ab. Eine apparative Realisierung des Modells erscheint sehr unökonomisch, da eine Vielzahl von Verzögerungsketten benötigt wird.

SCHREIBER /7/ hat nun ausgehend von der LICKLIDERSchen Theorie eine Modellvorstellung entwickelt, die - ohne Anspruch auf physiologische Ähnlichkeit und unter Verzicht auf die Erfassung weiterer Eindrücke, etwa der Lautstärkeunterschiede - eine Einortdarstellung ermöglicht und zugleich die Oktavverwandtschaft darzustellen gestattet. Dieses Modell hat dazu den Vorzug, sich technisch verhältnismäßig einfach realisieren zu lassen, da es mit nur einer Verzögerungskette auskommt (Abb. 2).

3. Realisierung des SCHREIBER-Modells

Ein einfaches Modell - ohne Puls-Tiefpässe und ohne Nachselektion - , das nur auf reine Töne ansprach, wurde nach Angaben von L. SCHREIBER im Institut für Technische Akustik der Technischen Universität Berlin provisorisch aufgebaut /7/. Es zeigte die erwarteten Eigenschaften.

Dieses einfache Gerät wurde nun so umgestaltet und erweitert, daß es auch für die Anzeige von Klängen und Residualklängen geeignet ist. Dabei konnte von dem alten Gerät lediglich das Anzeigefeld und die Lampenlöscheinrichtung übernommen werden.

Die Funktionsweise des neuen Gerätes soll im folgenden an Hand des technischen Blockschaltbildes (Abb. 3) erläutert werden.

Durch eine Oktavanalyse, die die Grobselektion der Basilar-membran nachbilden soll, wird ein Klang in seinem Grundton in der unteren Oktave und in Residualklänge in den höheren Oktaven zerlegt. Dabei entstehen in den höheren Oktaven Hüllkurven, die unter günstigen Phasenlagen der Teiltöne Spitzen mit der Periode des Grundtones enthalten. Diese Signale werden einem Trigger zugeführt, der eine Sinneszelle im Innenohr repräsentiert und nur auf die Spitzen im Signal

anspricht. Dann entsteht an seinem Ausgang ein Puls, dessen Frequenz für reine Töne in der entsprechenden Oktave, für Hüllkurven aber ein oder mehrere Oktaven tiefer liegt. Diese Triggersignale werden nun durch Frequenzteiler heruntergeteilt; nach jeder Frequenzhalbierung geht das Signal über einen Impulstiefpaß an den eigentlichen Ausgang. Die Tiefpässe haben ihre Grenzfrequenz bei der oberen Grenze der untersten Oktave. Dadurch erreicht man, daß das Ausgangssignal immer in der Grundoktave liegt - es sei denn, die Hüllkurvenfrequenz liege sowieso schon unterhalb der unteren Grenze der Grundoktave. Das Prinzip der Frequenzteilung bildet in sehr einfacher Weise die Oktavverwandtschaft ab, denn diese Herabteilung der Signale in die unterste Oktave verändert das Chroma des Tones - seine Lage innerhalb einer Oktave - nicht. Außerdem erlaubt dieses Verfahren, nur eine einzige Laufzeitkette für die Kurzzeitkorrelation zu verwenden.

Der herabgeteilte Puls des Triggers läuft nun einmal in die zu der Oktave gehörigen Spalte der Anzeigentafel und außerdem gemeinsam mit den eventuell vorhandenen Pulsen der anderen Oktaven in den Eingang einer Laufzeitkette, deren Ausgänge das Signal um jeweils eine Periodendauer eines Halbtönen verzögert herausgehen lassen. Das Signal verläßt also um eine gewisse Zeit verzögert die Laufzeitkette und wird in einem Schaltungsteil, der Nachselektion, ein zweites Mal auf die Periodendauer untersucht, um zufällige Koinzidenzen in der Anzeigentafel zu verhindern, bevor das Signal nun in die dem Halbton entsprechende Zeile der Tafel gelangt. Abbildung 4 zeigt, wie bei verschachtelten Pulsen die Nachselektion verhindert, daß in einer falschen Zeile der Tafel eine Anzeige erfolgt. Oben sieht man die Schaltung, die zum Ausgang τ_1 der Laufzeitkette gehören möge. Dann tritt am Ausgang des 1. Gatters noch ein Signal auf, obwohl die Pulse der beiden Oktaven die Periodendauer τ_0 haben. Erst nach der zweiten Prüfung durch das Gatter 2 wird der falsche Impuls unterdrückt. Das ist ein zusätzlicher Aufwand, der dadurch notwendig wird, daß die vielkanalige Signalverarbeitung im

Gehör die Fehler im statistischen Mittel unterdrückt, während das Gerät einkanalog arbeitet und man daher gezwungen ist, Fehlanzeigen auf andere Art und Weise zu verhindern.

An den Kreuzungspunkten von Zeilen und Spalten der Anzeigematrix liegen Und-Gatter, die über Integrierstufen zur Unterdrückung von zufälligen Koinzidenzen im Gatter die Anzeigeglimmlampen ansteuern, wenn mehrere Male eine Koinzidenz der Impulse aus Oktave und Nachselektion stattgefunden hat.

4. Beschreibung des gebauten Gerätes

4.1 Gesamtkonzeption

Das Gerät arbeitet mit fünf Oktavfiltern im Frequenzbereich von 175 bis 5600 Hz. Dadurch erhält die Anzeigetafel fünf Spalten. Die Oktave ist entsprechend der chromatischen Tonleiter in zwölf Halbtonschritte unterteilt, die die zwölf Zeilen der Tafel darstellen. Die Bandbreite des Anzeigegebietes eines Halbtones läßt sich umschalten von nicht ganz einem Halbton zu etwa $1/10$ Halbton. Die schmale Bandbreite liefert eine exaktere Anzeige bezüglich der Frequenz, die breitere fängt ein Signal leichter ein, da die Lücken zwischen den Halbton-Anzeigen dann sehr schmal werden. Die Zündvorspannung für die Anzeigeglimmlampen ist regelbar und damit die Anzeigeempfindlichkeit. Die Glimmlampen werden im Rhythmus der Netzfrequenz gelöscht, so daß das Gerät auch sich ändernde Klänge anzeigen kann. Es benötigt jedoch wegen der Nachselektion und der Integrierstufen vor den Glimmlampen ein Signal, das nach Herabteilung in die Grundoktave mindestens fünf bis zehn Periodendauern anhält.

Das Gerät ist weitgehend mit digitalen Bausteinen aufgebaut. Die Laufzeitkette, die Oktavfilter und die den Filtern folgenden Verstärker sind externe Geräte, die auch für andere Zwecke eingesetzt werden können. Das Gerät enthält keine eigene Stromversorgung.

4.2 Einzelne Baugruppen

4.2.1 Die Triggerschaltung

Der Trigger soll in der Lage sein, sowohl auf Töne als auch auf Klänge mit einer ausgeprägten Hüllkurve anzusprechen. Er besteht daher aus 2 Teilen (s. Abb. '6).

Ein Signal mit einer ausgeprägten Hüllkurve wird im Impedanzwandler UV 1 verstärkt, durch die Diode D 1 gleichgerichtet und auf ein RC-Glied gegeben. Dieses Integrierglied ist so ausgelegt, daß die Hüllkurve ungefähr erhalten bleibt, so daß der nachfolgende Schmitt-Trigger IF 1 ein Rechteckpuls mit der Hüllkurvenfrequenz liefern kann. Es folgt dann ein monostabiler Multivibrator, der eine konstante Impulslänge erzeugt und ein Umkehrverstärker UV 2. Das Signal gelangt nun über einen Vorwiderstand und eine Trenndiode auf den Schmitt-Trigger IF 2, der als Schaltverstärker arbeitet und der den Ausgangsverstärker der Schaltung darstellt. Außerdem gelangt das Signal über die Trenndiode D_3 auf ein Integrierglied, an dem sich eine so hohe Spannung ausbildet, daß der Schmitt-Trigger IF 3 über die Diode D_5 nur geöffnet wird, aber nicht zurückschalten kann. Dadurch wird der Schmitt-Trigger IF 3 durch das über die Diode D_4 an seinen Eingang gelangende Signal mit der spitzenhaltigen Hüllkurve nicht beeinflusst.

Gelangt dagegen auf den Eingang der Schaltung ein reiner Ton, dessen Frequenz genügend hoch ist, so wird die Spannung an dem Integrierglied vor dem Schmitt-Trigger IF 1 so groß, daß dieser nicht mehr zurückschalten kann und damit kein Ausgangssignal abgibt. Das hat zur Folge, daß keine Sperrspannung für den Schmitt-Trigger IF 3 erzeugt wird, und dieser nun das über die Diode D_4 und den Vorwiderstand auf ihn gelangende Signal in eine Rechteckschwingung umformt, die nun über eine Trenndiode auf den Ausgangsverstärker IF 2 gelangt.

4.2.2 Die Frequenzuntersetzungs- und Impulstiefpaßschaltung

Das Ausgangssignal des Triggers muß nun unter Beibehaltung des Chromas in die erste Oktave heruntergeteilt werden (siehe dazu Abb. 3). Das geschieht durch hintereinandergeschaltete bistabile Multivibratoren BM 10, die am Ausgang einen positiven und einen negativen Sprung liefern, wenn am Eingang zwei positive Sprünge aufeinanderfolgen. Dadurch wird die Pulsfrequenz jeweils um den Faktor 2 heruntergeteilt. Am Eingang der Schaltung, sowie an den einzelnen Ausgängen der BM 10 liegen die Impulstiefpässe (s. Abb. 7). Diese lassen nur Pulse durch, deren Folgefrequenzen ≤ 360 Hz (obere Grenze des obersten Halbtones der Grundoktave) sind.

Der einlaufende Puls wird im MM 10 auf eine konstante Breite von ca. $320 \mu\text{sec}$ gebracht, im UV 10₁ verstärkt und über die Diode auf das Integrierglied gegeben, dessen Zeitkonstante so bemessen ist, daß bei der Grenzfrequenz von 360 Hz die aufintegrierte Spannung nicht mehr unter die untere Schwelle des Schmitt-Triggers IF 10 fällt und diesen dadurch zustopft. Im Falle $f_{\text{puls}} < 360$ Hz liefert der Trigger wieder Impulse, die differenziert werden und über eine Diode, die nur die positiven Nadeln durchläßt, auf den Impulsformer gelangen.

4.2.3 Der Impulsformer

Der Impulsformer besteht aus einem monostabilen Multivibrator, der aus den einlaufenden positiven Nadeln negative Impulse von ungefähr $320 \mu\text{sec}$ Breite macht, und einem nachfolgenden Impedanzwandler als Anpassungsstufe an den niederohmigen Eingang der Laufzeitkette.

4.2.4 Die Nachselektion

An jedem der Ausgänge der Laufzeitkette, der durch die Periodendauer des entsprechenden Halbtones festgelegt ist, befindet sich eine Baugruppe, die verhindern soll, daß zufällige

Koinzidenzen mit einzelnen Impulsen eines zweiten Pulses mit anderer Frequenz zu einer Fehlanzeige im Lampenfeld führt.

Der etwas verschliffene Impuls am Ausgang der Laufzeitkette gelangt über einen Vorwiderstand von $5,6 \text{ k}\Omega$, der mit 220 pF überbrückt ist, damit die Impulsflanke nicht noch flacher wird, auf den Schmitt-Trigger IF 10-1, der die Flanken regeneriert und einen monostabilen Multivibrator MM 10-1 aussteuert (s. Abb. 8). Dieser liefert einen Rechteckimpuls, der so breit ist, daß im nachfolgenden Und-Gatter L2K 10-1 Koinzidenzen in einem Toleranzbereich von $\pm \frac{1}{2}$ Halbtonbreite auftreten können. Durch Verkürzung des Rechteckimpulses wird die Selektionsschärfe erhöht. Der zweite Eingang des Und-Gatters L2K 10-1 erhält das differenzierte Eingangssignal der Laufzeitkette und ist über 910Ω Masse verbunden, damit die Ausgangsspannung des Gatters genügend klein ist, wenn nicht an beiden Eingängen gleichzeitig ein Signal steht. Die Ausgangsspannung des Und-Gatters steuert den Schmitt-Trigger IF 10-2 an, der als Impulsverstärker arbeitet. Dieser erste Teil der Nachselektion liefert auch für Koinzidenzen mit "falschen" Impulsen (siehe τ_1 und τ_2 in Abb. 4) Ausgangssignale, die zu falschen Anzeigen führen würden, zumindest jedoch ein unangenehmes Flackern auf dem Anzeigefeld hervorrufen.

Daher ist eine zweite Selektionsstufe eingebaut, die verlangt, daß wenigstens zwei Impulsabstände gleich groß sein müssen, damit am Ausgang ein Signal erscheint. Das erreicht man am einfachsten durch folgende Anordnung: Man gibt einen Puls direkt und um τ verzögert auf die beiden Eingänge eines Und-Gatters. Dann erscheint an dessen Ausgang nur dann ein Signal, wenn die Pulsfrequenz gleich $1/\tau$ ist. Die Verzögerung erzeugt man durch einen monostabilen Multivibrator. Jedoch muß man zu einer Kunstschaltung Zuflucht nehmen, damit alle Anforderungen erfüllt werden. Der monostabile Multivibrator hat nach dem Zurückkippen in den Ruhezustand eine

Totzeit, in der er auf Eingangssignale nicht reagiert. Sie beträgt bei den verwendeten Bausteinen etwa die halbe Pulsbreite. Wenn jetzt aus den Oktaven infolge eines Klanges ineinander verschachtelte Impulsfolgen in die Laufzeitkette kommen, so würden diejenigen, die um weniger als die Totzeit gegen den ersten Puls verschoben sind, nie den Multivibrator ansteuern können und daher nicht angezeigt werden. Um das zu umgehen, werden zwei monostabile Multivibratoren MM 10-2 und MM 10-3 in Reihe geschaltet, die zusammen die erforderliche Verzögerung bewirken. Da jetzt jedoch der vordere Multivibrator bereits von neuen Impulsen angesteuert werden kann, bevor der zweite zurückgekippt ist, muß der Eingang des ersten durch ein Gatter geschlossen werden, bis der zweite in die Ruhelage zurückgekehrt ist. Dazu wird das Ausgangssignal des MM 10-3 ($-12 V_{ss}$) in UV 10_u-3 umgekehrt und im UV 10_i-4 verstärkt. Solange der MM 10-3 noch nicht zurückgekippt ist, liefert sein Ausgang eine Spannung von $-12 V$, die nach dem Umkehrverstärker zu 0V wird. Dadurch wird der Kondensator $0,22 \mu F$ entladen, und der über $5,6 k\Omega$ an ihn geschaltete Eingang des Und-Gatters L2K 10-2 erhält ebenfalls Erdpotential. Dadurch bleibt das Gatter gesperrt, bis der MM 10-3 zurückkippt und sich dann der Kondensator mit einer gewissen Zeitkonstanten negativ auflädt und das Gatter für Impulse an seinen zweiten Ausgang durchlässig macht. Die Zeitkonstante hat den Zweck, den zweiten Impuls des Pulses, der zuletzt den Multivibrator angesteuert hatte, zu unterdrücken, damit jetzt der verschachtelte Puls zur Wirkung gelangt. Dadurch wird erreicht, daß die eventuell ineinander verschachtelten Impulsfolgen aus allen Oktaven durch die Nachselektion hindurch das Lampenfeld ansteuern können.

Der durch die monostabilen Multivibratoren verzögerte Impuls gelangt auf den einen Eingang des Und-Gatters L2K 10-3 während der andere mit dem Ausgang des IF 10-2, d.h. mit dem Ausgang des ersten Teils der Nachselektion, verbunden ist. An dieser Stelle wird noch kein Impuls unterdrückt und das Gatter 3 liefert einen Ausgangsimpuls, wenn dem Impuls, der

die Multivibratoren angesteuert hatte, ein zweiter in dem Abstand folgt, der der Periodendauer des Halbtones entspricht. Die Toleranzbreite von einigen 100 μsec für das Gatter erhält man durch das Differenzierglied von 22 nF und 27 k Ω , das eine große Zeitkonstante hat und dadurch den unteren Eingang des Und-Gatters entsprechend lange offen hält. Der Ausgangsimpuls wird in dem Schmitt-Trigger IF 10-3 verstärkt und - nachdem er in dem MM 10-4 auf die Breite von 320 μsec gebracht wurde - in dem Ansteuerverstärker verstärkt und auf die entsprechende Abszisse des Koinzidenzfeldes gegeben.

4.2.5 Der Ansteuerverstärker

Der Ansteuerverstärker muß Impulse von möglichst hoher Spannung liefern, damit die Impulsintegrierstufe an der Zündelektrode noch einen genügend großen Spannungsunterschied zwischen Impulsserie und vereinzelttem Impuls aufweist. Außerdem müssen die Impulse auch eine gewisse Leistung haben, da sowohl im Gatter als auch in der Integrierstufe Verluste auftreten und die Anzeigeglimmlampe Z 70 U laut Datenblatt einen Zündstrom von ca. 30 μA benötigt. Im ungünstigsten Fall muß ein Impuls 5 Lampen ansteuern können.

Da die Ansteuerimpulse für den Verstärker negativ sind, kommt als Transistor nur ein pnp-Typ in Frage. Siliziumtransistoren haben eine gegen Spannungen sehr empfindliche Basis-Emitter-Strecke, wenn diese in Sperr-Richtung betrieben wird. Als preisgünstigster und schnell zu beschaffender Typ wurde der Ge-pnp-Transistor ASY 14/3 ausgewählt, der im gesperrten Zustand eine Kollektor-Emitter-Spannung von 80 V verträgt und im durchgeschalteten Zustand einen Kollektorstrom von 250 mA aushält. Seine Gleichstromverstärkung in Emitterschaltung ist $B > 60$. Nach Abb. 9 fließt im durchgeschalteten Zustand ein Kollektorstrom von $-I_c = 37 \text{ mA}$. Dann wird ein Basisstrom von $-I_B = 0,62 \text{ mA}$ benötigt. Da bei Anlegen einer negativen Spannung an die Basis die Basis-Emitterdiode durchlässig wird, ist beim Ansteuern des Transistors der Eingangsstrom durch

den Vorwiderstand von $6,2 \Omega$ bestimmt und beträgt bei einem Ausgangssignal des steuernden Bausteins MM 10-4 von -10 V etwa $1,7 \text{ mA}$. Dieser Strom liegt über dem errechneten Basisstrom von $0,62 \text{ mA}$ und unterhalb des maximalen Ausgangsstromes des MM 10 von 2 mA . Im gesperrten Zustand liegen ungefähr $+0,6 \text{ V}$ zwischen Basis und Emitter; damit ergibt sich nach dem Datenblatt ein Kollektor-Emitter-Reststrom $I_{\text{CEV}} = 10 \mu\text{A}$ bei $U_{\text{CE}} = 80 \text{ V}$. Im durchgeschalteten Zustand liegt die Kollektor-Sättigungsspannung etwa bei $-U_{\text{CE}_{\text{sat}}} = 0,2 \text{ V}$, der Kollektorstrom war 37 mA .

Damit liegen die beiden Arbeitspunkte weit unterhalb der Leistungsgrenzhyperbel von 75 mW bei 45°C Umgebungstemperatur. Da die Schaltzeiten des Transistors $t_{\text{rise}} + t_{\text{fall}} < 5 \mu\text{s}$ sind, die Impulsfolge aber maximal $2,8 \text{ ms}$ beträgt, ist nicht zu befürchten, daß der Transistor sich beim Durchfahren der Leistungshyperbel aufheizt. Der Kondensator von $2,2 \text{ nF}$ überbrückt den Eingangsvorwiderstand und dient zur Verbesserung der Flankensteilheit (nach (10)). In die Emitterzuleitung sind als Schutzwiderstand 100Ω eingeschaltet.

4.2.6 Das Koinzidenzgatter und die Impulsintegrierstufe in der Tafel

Jede der 60 Anzeigelampen wird über ein eigenes Und-Gatter mit einer anschließenden Integrierstufe angesteuert. Der Aufwand läßt sich nicht umgehen, da in den Gattern auch Koinzidenzen mit "falschen Impulsen" auftreten können, wie es schon am ersten Und-Gatter der Nachselektion auftrat. Daher muß dem Gatter eine Integrierstufe folgen, die erst bei einer gewissen Häufigkeit von Ausgangsimpulsen genügend Spannung zur Zündung der Anzeigelampe liefert (Abb. 10). Das Und-Gatter besteht aus zwei Dioden BAY 32, deren Kathoden die beiden Eingänge darstellen und deren Anoden miteinander verbunden sind und den Ausgang bilden. Der Ausgang ist über $20 \text{ k}\Omega$ mit Masse verbunden. Die beiden Kathoden liegen an den Ausgängen der Ansteuerverstärker, die zu der entsprechenden Oktave und dem entsprechenden Halbtonschritt gehören und haben im gesperrten Zustand der Verstärker ein Potential

von -70 V . Gelangt nur an einen Eingang ein Spannungssprung auf 0 V , so ändert sich das Ausgangspotential nicht; erst wenn beide Eingänge durch die durchgeschalteten Verstärker auf das Potential 0 V kommen, springt das Ausgangspotential auf denselben Wert.

Der Sprung von $U = 70\text{ V}$ gelangt über den Trennkondensator von $1\text{ }\mu\text{F}$ und die Trenndiode D_4 auf den Integriertkondensator. Außerdem erhält das Integrierglied über D_3 , die die Impulse von der Spannungsquelle fernhält, eine ständige Zündvorspannung von $+100\text{ V}$, die aber allein zur Zündung der Lampen nicht ausreicht. Sie kann von außen über ein Potentiometer verstellt werden. Die Zeitkonstante des Integriergliedes ist groß, solange die Lampe nicht brennt. Nach der Zündung liegt jedoch der Widerstand von $470\text{ k}\Omega$ über die niederohmige Gasentladung an Masse und entlädt den Kondensator schnell. Eine Zuführung der Vorspannung an einer anderen Stelle erwies sich als unbrauchbar, da durch den Sperrwiderstand der Diode parallel zum Kondensator dann eine Zeitkonstante des Integriergliedes zu klein wurde.

4.2.7 Die Schaltung der Glimmlampen und deren Spannungsversorgung

Die Abbildung 11 zeigt die Schaltung der Anzeigelampen $Z\ 70\text{ U}$. Die Glimmlampe hat zur Strombegrenzung wegen ihrer fallenden Kennlinie zwischen Anode und der positiven Batteriespannung von 250 V einen Widerstand von $120\text{ k}\Omega$. Über die Hilfselektrode brennt zur Anode hin ständig eine kleine Hilfsentladung, die den Entladungsraum vorionisiert und damit die Zündspannung unabhängig von einfallendem Licht oder kurzwelliger Strahlung macht (6). Die Zündelektrode erhält ihre Spannung von der Integrierstufe.

Sämtliche Anzeigelampen liegen mit ihren Kathoden an der Anode der Austaströhre $EL\ 84$ (s. Abb. 12). Diese ist im Normalfall soweit durchgesteuert, daß die Spannung zwischen ihrer Anode und dem Pluspol der Batterie zum Betrieb der Glimmlampen

ausreicht. An das Steuergitter der Röhre ist über ein Differenzierglied der Ausgang eines Schmitt-Triggers angeschlossen, der von der Heizwechselspannung angesteuert wird und einen Puls mit einer Frequenz von 50 Hz liefert. Die beim Differenzieren entstehenden negativen Nadeln sperren die TE 84 kurz, wodurch die Glimmlampen gelöscht werden. Das Lampenfeld ist dadurch in der Lage, mit seiner Anzeige zeitlichen Änderungen der Klangstruktur zu folgen. Insofern kann man von einem Analogrechner sprechen, da im Takt von 50 Hz das Ausgangsbild wiederholt wird und sich Änderungen der Eingangssignale durch die Veränderung des Bildes auf der Matrix darstellen.

5. Beobachtungen mit dem Tonhöhenmodell

Das fertige Gerät kann Töne, Klänge und Residualklänge anzeigen. In der Abb. 13 sind einige prinzipielle Analysen dargestellt. Für zeitlich aufeinanderfolgende Signale ist die Selektionsschärfe durch die Unterteilung der Tafel in Zeilen gegeben, d.h. durch die Halbtonbreite.

Ein reiner Ton wird in der Oktave und im Chroma richtig erkannt. Mehrere gleichzeitig erklingende Töne werden nur dann richtig angezeigt, wenn sie in verschiedene Oktaven fallen. In den höheren Oktaven können mehrere Töne eine Hüllkurvenfrequenz erzeugen, die dann wie Residualklänge wirken.

Ein Klang mit vollständiger Obertonreihe wird theoretisch als leuchtende Zeile angezeigt. In der Praxis sind jedoch die Hüllkurven besonders in den unteren Oktaven nicht sehr ausgeprägt, so daß einzelne Lampen in der Zeile ausfallen können. Hinzu kommt ein weiterer Effekt in der Nachselektion. Wenn die verschachtelten Pulse in der Laufzeitkette dichter beieinander liegen - siehe τ_2 in Abb. 4 - als es der Totzeit des impulsformenden monostabilen Multivibrators im Eingang der Nachselektion entspricht, dann wird der zeitlich nachfolgende Puls unterdrückt, was bedeutet, daß die zugehörige Oktave nicht angezeigt wird. Das heißt für die Praxis, daß

in der aufleuchtenden Zeile auch einige Lampen dunkel bleiben können.

Ein Residualklang unterscheidet sich vom vollständigen Klang dadurch, daß der Grundton und möglicherweise auch tiefere Harmonische fehlen. Dadurch ergibt es sich, daß nicht eine ganze Zeile, sondern nur deren rechter Teil gezündet wird, sofern der (fehlende) Grundton in die tiefste Oktave fällt. Das beim vollständigen Klang erwähnte mögliche Ausfallen einzelner Oktaven gilt für die Anzeige von Residualklängen ebenfalls.

6. Vergleich mit Eigenschaften des Gehörs

Die Anzeige eines reinen Tones nach Oktave und Chroma entspricht dem Empfinden eines Menschen mit absolutem Tonhöhenbewußtsein (absolutes Gehör). Hier leistet das Gerät mehr, als das durchschnittliche menschliche Gehör.

Die Darstellung von Klängen liefert eine eindeutige Aussage über das Chroma, während sie für die Oktave mehrdeutig wird. Diese Vieldeutigkeit ist in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen von SCHREIBER /7/, der Versuchspersonen die Aufgabe stellte, zu einem Klang oder Residualklang einen Ton gleicher Höhe einzustellen. Die Irrtümer in der Oktave waren wesentlich häufiger als die im Chroma. ROSENBLITH /6/ berichtete über ähnliche Ergebnisse bei Versuchen mit Personen mit absolutem Gehör.

Einen vollständigen Klang, dessen Grundton in einer höheren Oktave liegt, kann das Gerät prinzipiell nicht von einem Residualklang gleichen Chromas unterscheiden, während das Gehör einen Unterschied wahrnimmt.

Bei der Untersuchung von Rauschvorgängen zeigt das Gerät nichts an, weil die Nachselektion und die Integrierstufe vor der Zündelektrode der Anzeigeglimmlampe die erwähnten 5 bis 10 Perioden zum Zünden benötigen, die das Rauschen nicht

liefern kann. Da breitbandiges Rauschen im Gehör keinen Eindruck einer Tonhöhe hervorruft, zeigt das Gerät insofern ein ohrgemäßes Verhalten.

Auch getastetes Rauschen führt zu keiner Anzeige, da die Anfangsamplituden eine statistische Verteilung haben. Die Hüllkurve wird daher nicht ausgewertet. Über den tonalen Eindruck von getastetem Rauschen gehen die Meinungen auseinander /9/. Auf keinen Fall wird man von einer ausgeprägten Tonhöhe sprechen können, so daß man das Verhalten des Gerätes auf dieses Signal als ohrgemäß betrachten kann.

Dagegen kann das Gerät einen Effekt nicht auswerten, der Verzögerungsrauschen genannt wird /9/. Bei der Darbietung der Überlagerung eines um t verzögerten breitbandigen Rauschens und des unverzögerten Signals ist sehr ausgeprägt eine Tonhöhe, die der Frequenz $1/t$ zuzuordnen ist, wahrnehmbar. Da keine zeitliche Periodizität vorhanden ist, kann keine Anzeige erfolgen.

Das Tonhöhenmodell von SCHREIBER zeigt also die von ihm erwarteten Eigenschaften, und darüber hinaus ist sein Verhalten bei Rauschvorgängen ohrgemäß. wenn man vom Effekt des Verzögerungsrauschens absieht.

Denkt man sich viele solcher Geräte mit unterschiedlichen Amplitudenempfindlichkeiten parallel geschaltet, so erhielte man ein Modell, das auch noch Lautstärkeunterschiede darstellen könnte.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die diese Untersuchungen durch eine Beihilfe ermöglichte, sei dafür auch an dieser Stelle gedankt.

7. Literaturhinweise

- /1/ G. v. BEKESY Ak. Zeitschrift 7 (1942) S. 173
ebd. 8 (1943) S. 66
JASA 19 (1947) S. 452
Experiments in Hearing, New York,
Toronto, London 1960
- /2/ H. v. HELMHOLTZ Die Lehre von den Tonempfindungen,
Braunschweig 1913
- /3/ A. SEEBECK Pogg. Ann. 53 (1841) S. 417
ebd. 60 (1843) S. 451
- /4/ L. HERRMANN Pflügers Arch. Physiol. 49 (1891)
S. 499
ebd. 56 (1894) S. 467
Ann. Physik 25 (1908) S. 697
- /5/ J.F. SCHOUTEN Proc.Kon.Nederl.Ak.v.Wetensch. 41
(1938) Nr. 10
ebd. 43 (1940) S. 356
ebd. 43 (1940) S. 991
- /6/ W.A. ROSENBLITH Vorlesungsreihe über Sensory
Communication
als Gastprofessor an der TU Berlin 1965
- /7/ L. SCHREIBER Über Versuche und eine einfache
Modellvorstellung zur Abbildung der
zweifachen Tonhöhenempfindung und
der Oktavverwandtschaft - Dissertation
an der TU Berlin 1962

- /8/ J.C. LICKLIDER The Duplex Theorie of Pitch Perception
Experimentia 7 (1951) S. 128
- /9/ J. GRUBER Hörversuche mit moduliertem Rauschen
unterschiedlicher interauraler Korre-
lation.
Dissertation an der TU Berlin 1967,
S. 6
- /10/ A. SPEISER Digitale Rechenanlagen, Berlin,
Heidelberg, New York, 1965
S. 69, 74, 83
- /11/ J. GRUBER Klangmatrix,
Diplomarbeit am Institut für
Technische Akustik der TU Berlin,
1961, S. 6

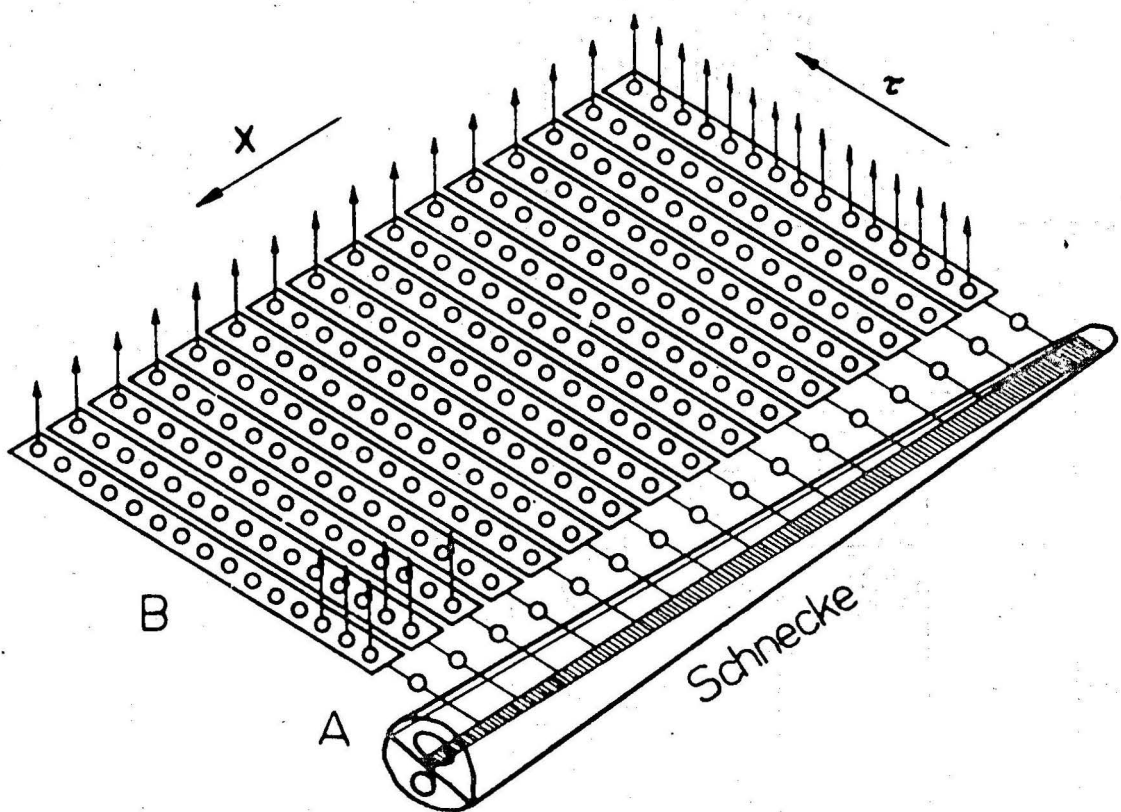
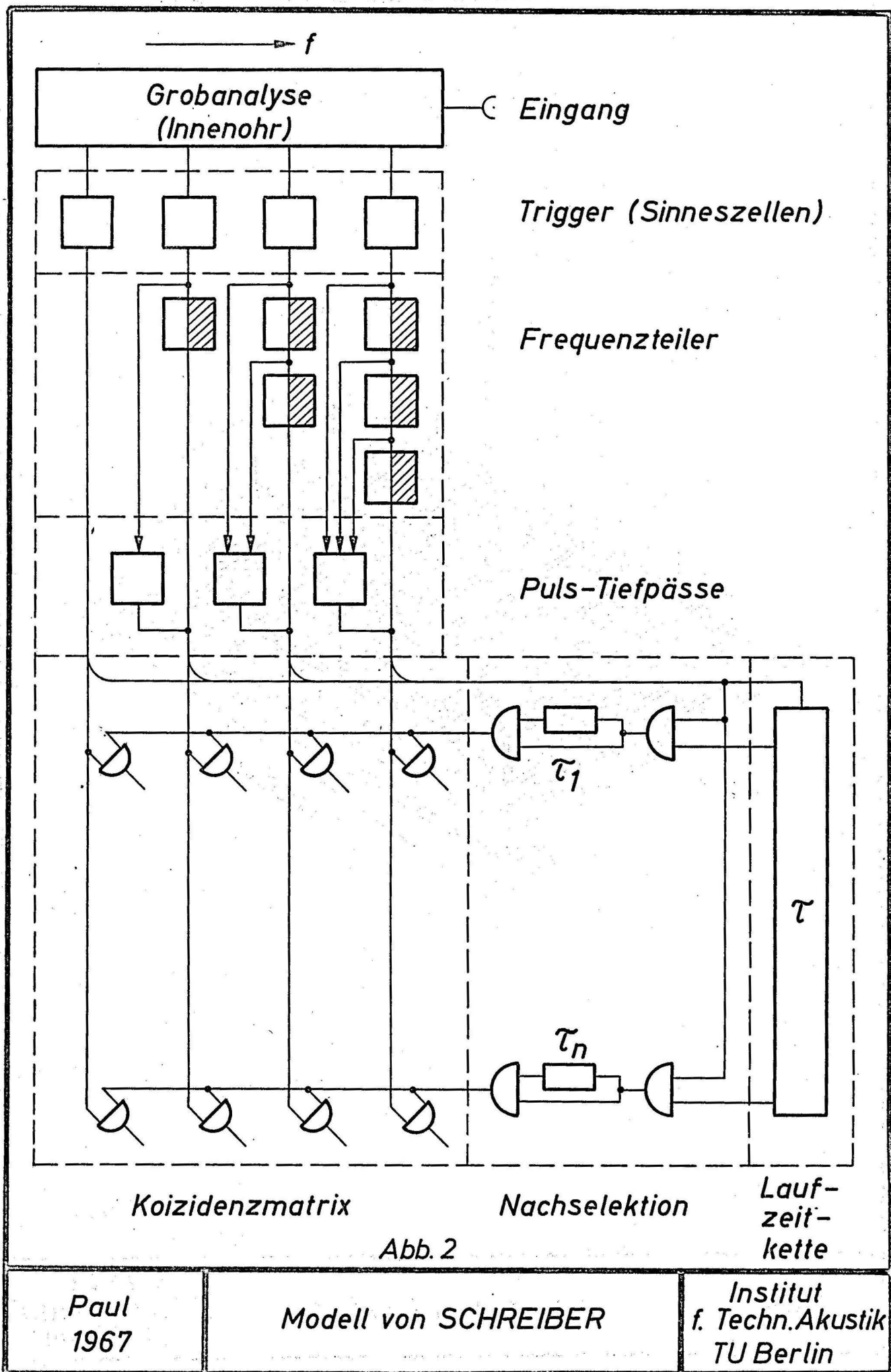


Abb. 1

Paul

Modell von Licklider

Institut
f. Techn. Akustik
TU Berlin



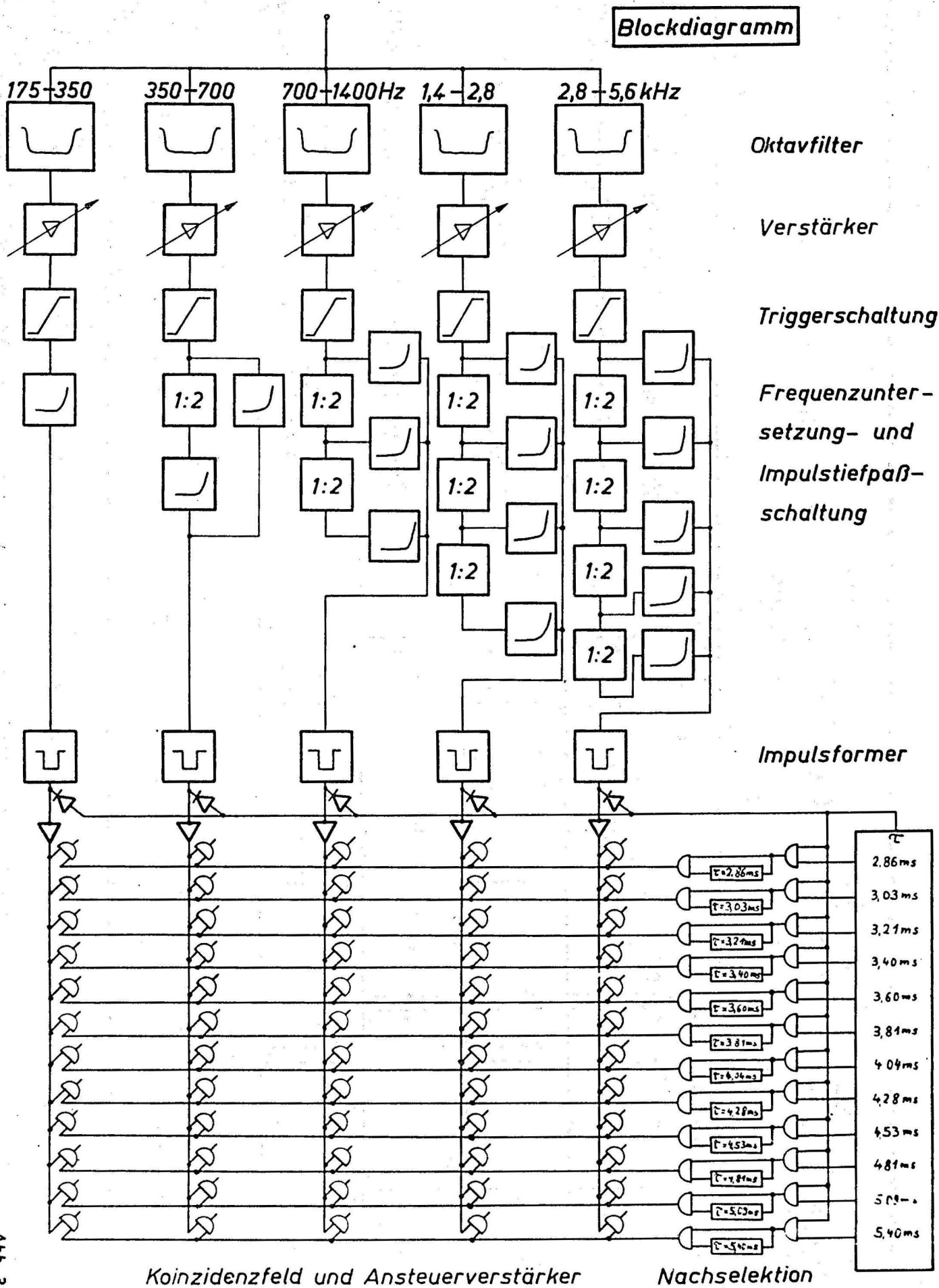
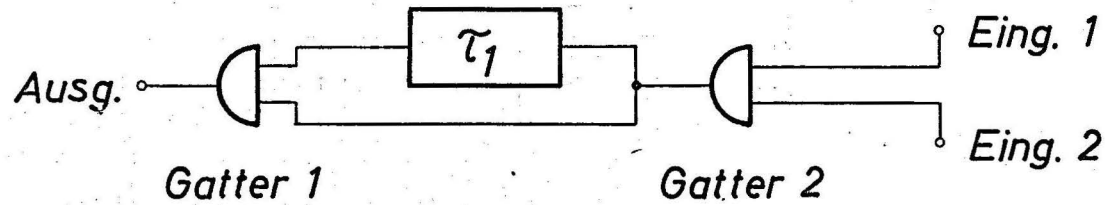
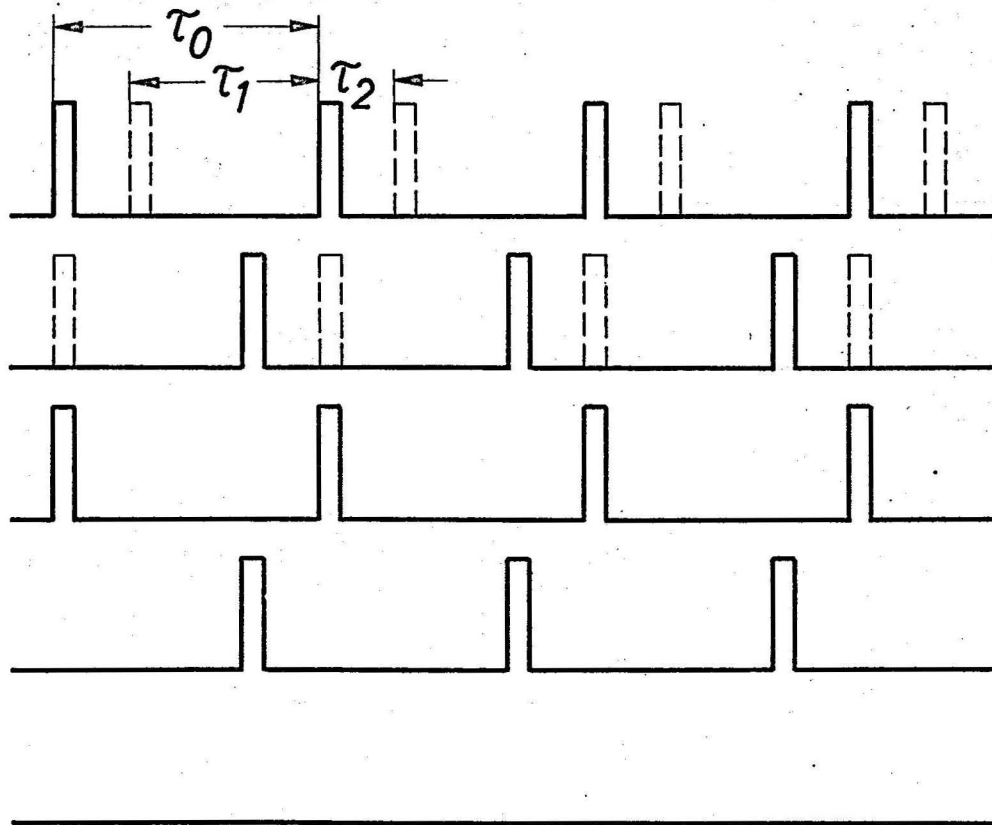


Abb. 3



Nachselektion



Verschachtelte Pulse gleicher Periode τ_0
aus 2 Oktaven am Eingang der LZK

Pulse am Ausgang (τ_1) der LZK

Signal am Ausgang des 1. Und-Gatters

Signal um τ_1 verzögert

Ausgang des 2. Und-Gatters

Abb. 4

Paul
1967

Verhalten der Nachselektion bei Schachtelpulsen

Institut
f. Techn. Akustik
TU Berlin

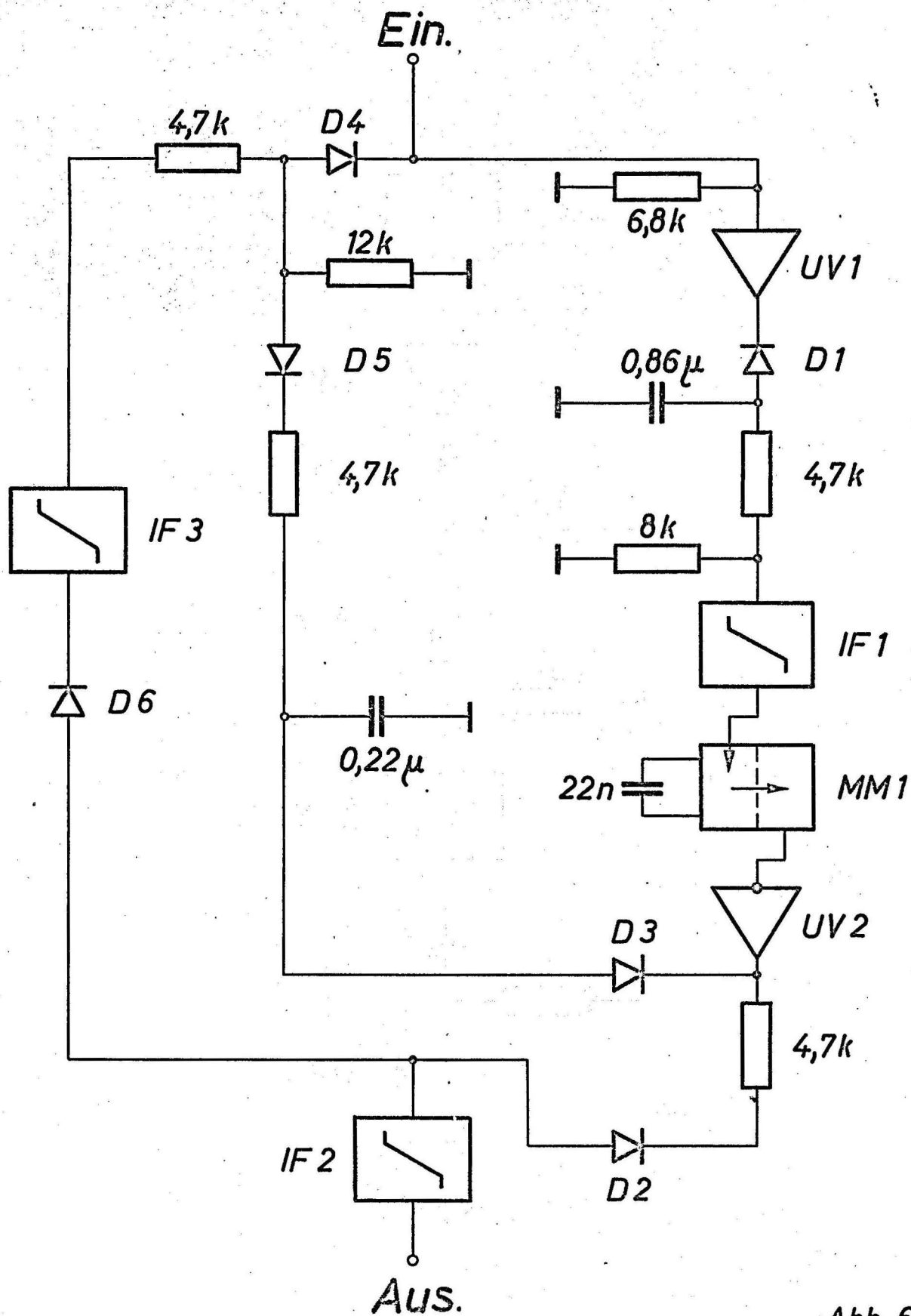


Abb. 6

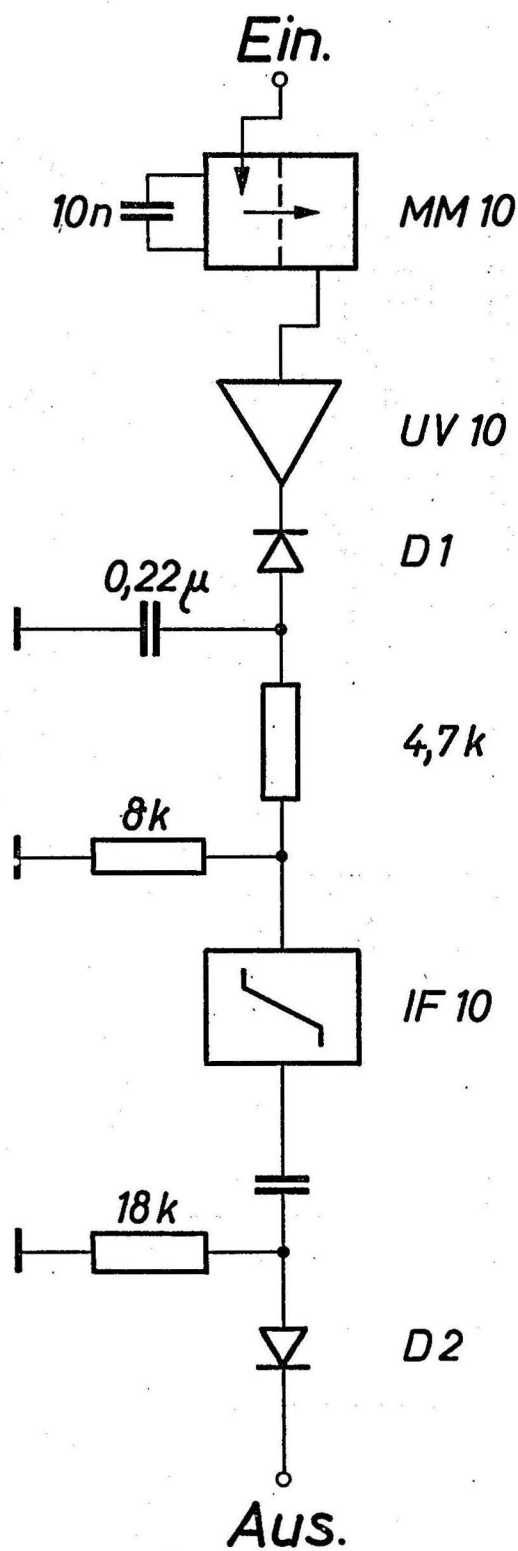
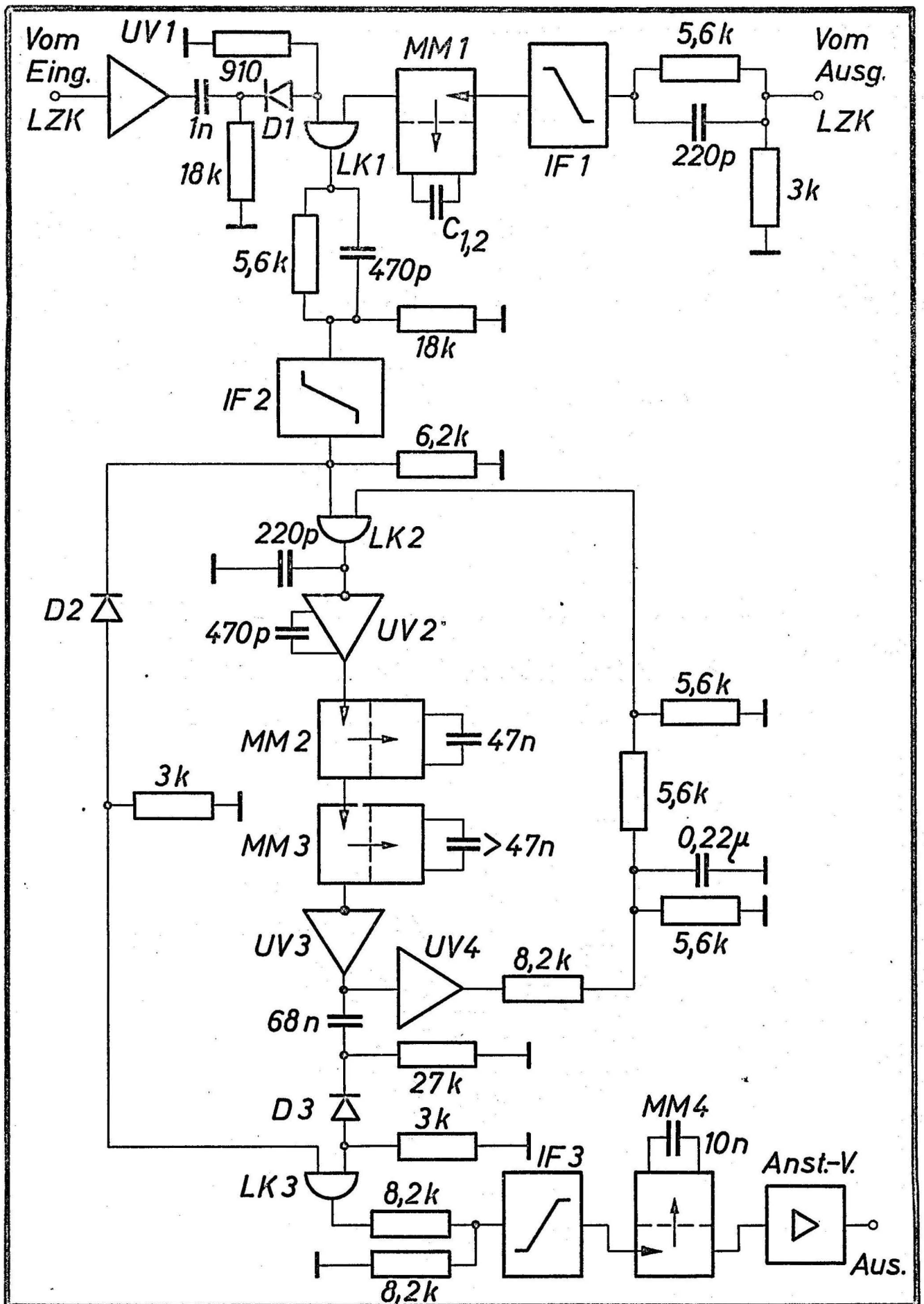


Abb. 7



Paul

Nachselektion

Institut
f. Techn. Akustik
TU Berlin

Abb. 8

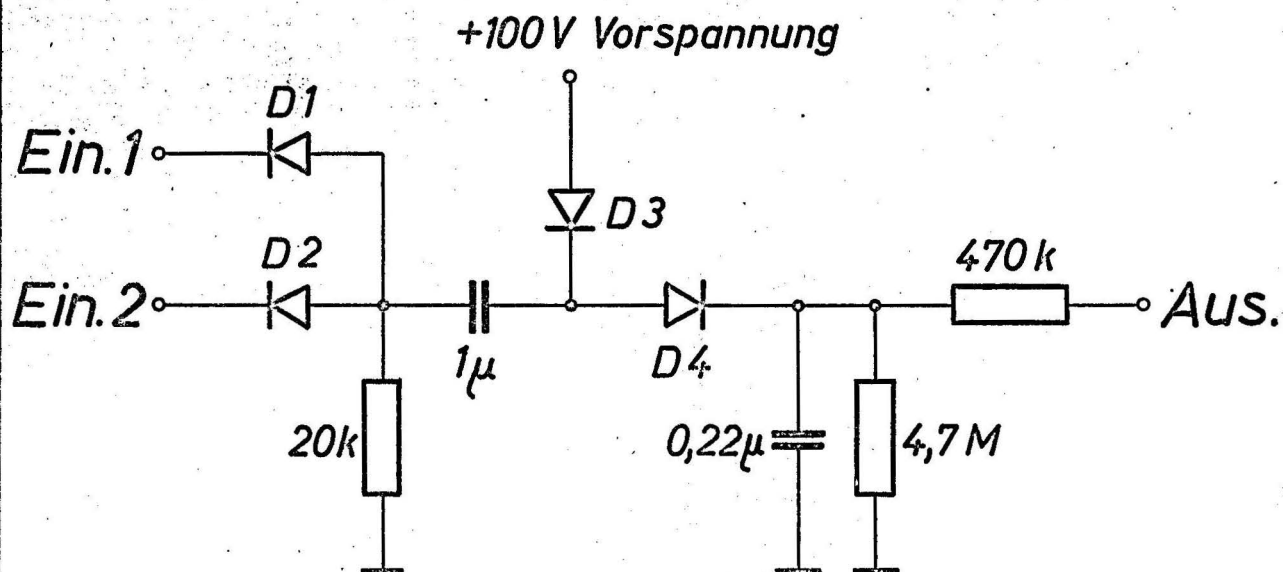


Abb. 10

KOINZIDENZGATTER u. Impulsintegrierstufe

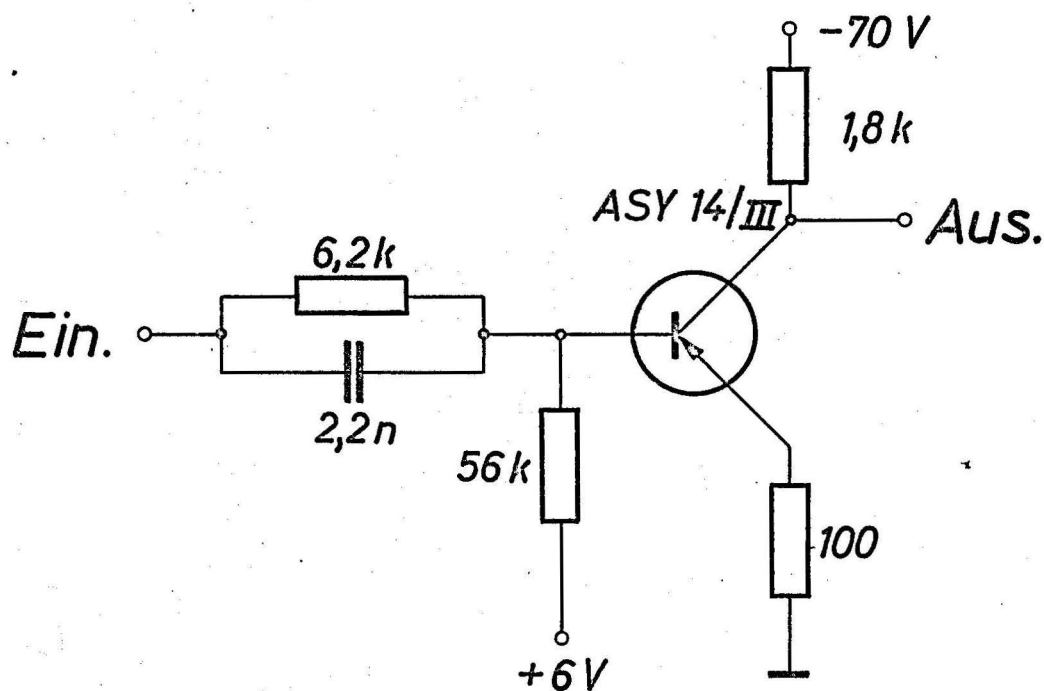
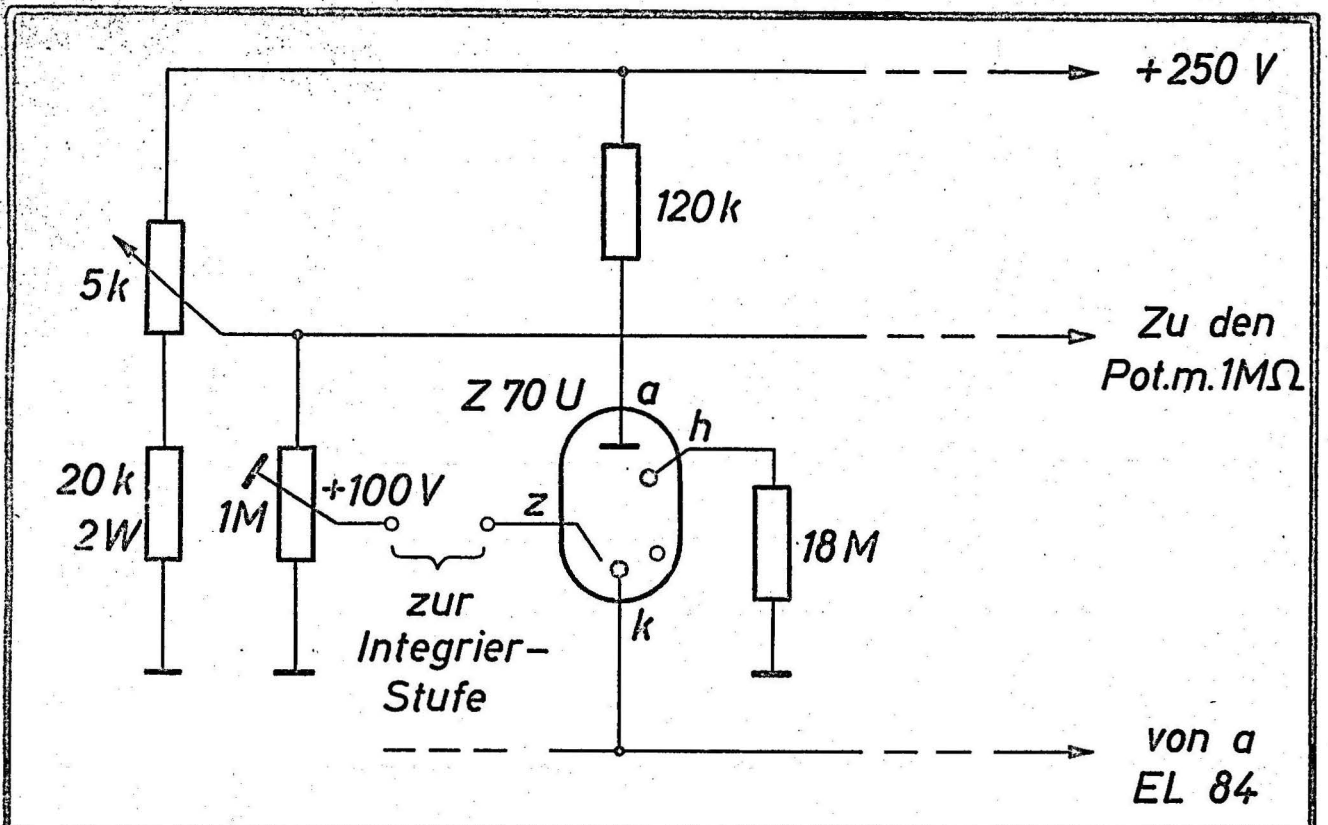


Abb. 9



Schaltung der Anzeigelampen

Abb. 11

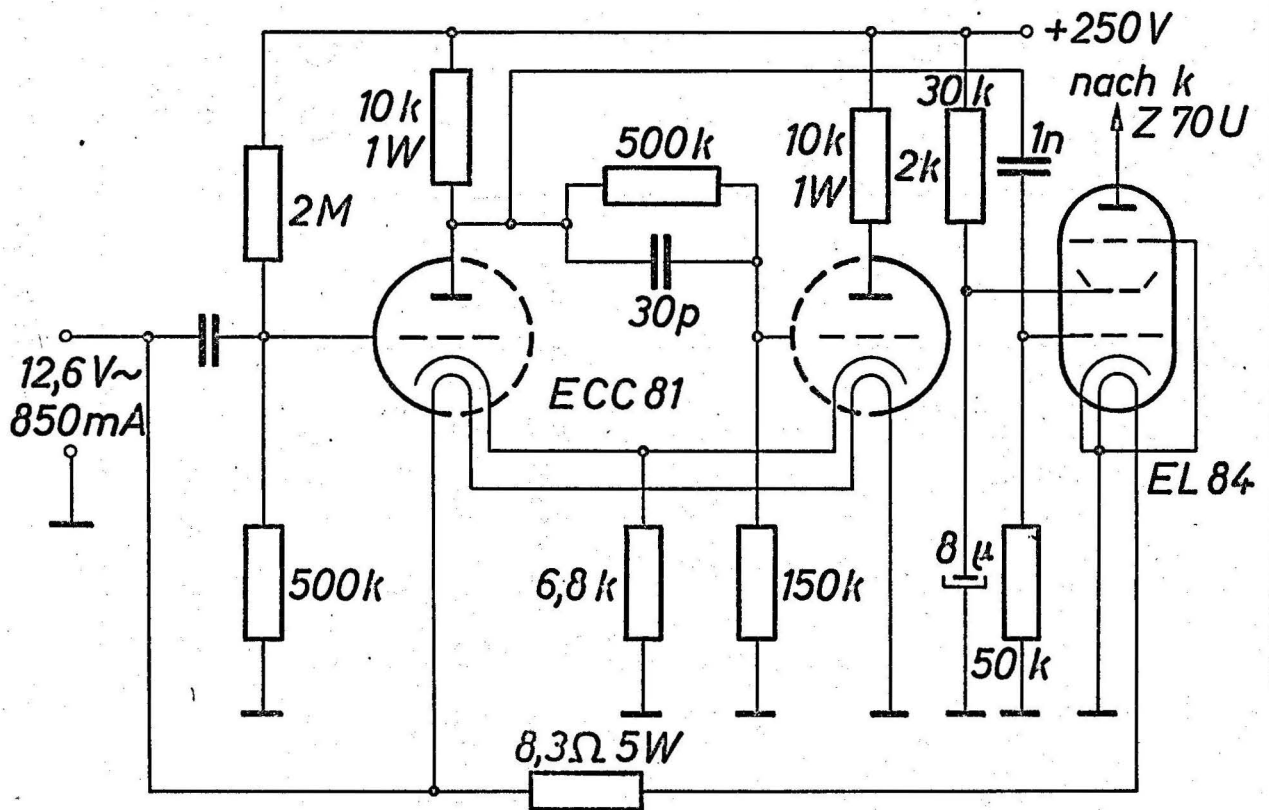


Abb. 12

Abb. 13

