D E U T S C H E S E L E K T R O N E N - S Y N C H R O T R O N
DESY
Hamburg-Gr. Flottbek 1, Flottbeker Drift 56

DESY-Bibliothek

Desy-Notiz A 2.92
Hamburg, den 17. Juli 1962
E-Dr. Stu/VM

DER LAWINENTRANSISTOR UND SEINE ANWENDUNG IN DER HOCHENERGIE - ELEKTRONIK

1. Einführung

Der Lawinentransistor nutzt den sehr schnellen Stromanstieg beim Durchbruch der Kollektorspannung aus, der Mechanismus wird im folgenden beschrieben. Wegen der Schnelligkeit der Stromvervielfachung ist der Transistor besonders für den Nanosekundenbereich geeignet. Während zunächst noch Transistoren mit besonders raschem Anstieg aus den üblichen Diffusionstypen ausgesucht werden mußten, können heute bereits industriell gefertigte Lawinentransistoren (Avalanche-Transistoren) benutzt werden. Die Erzeugung von Hochstrom-Impulsen von einer oder zwei Nanosekunden Dauer ist von großer Wichtigkeit für die Entwicklung schneller Schaltungen, besonders wenn der zeitliche Einsatzpunkt gut definiert werden kann. Unter den vielen Anwendungsmöglichkeiten zur Erzeugung kurzer Impulse ist der Einsatz in der Sampling-Technik von besonderer Bedeutung, weil dort die zeitliche Auflösung oder auch Anstiegszeit praktisch nur durch die Impulsbreite bestimmt wird.

2. Lawinenmechanismus

Im Bereich der Avalanche-Technik werden Kollektorspannungen an den Transistor gelegt, die weit höher als normal sind, so daß das Feld in der Kollektorübergangsschicht sehr hoch ist. Dadurch können Löcher, die vom Emitter in die Basis diffundieren, in Richtung zum Kollektor stark beschleunigt werden und dabei soviel Energie aufnehmen, daß sie weitere Elektron-Lochpaare durch Stoß im Kristallgefüge erzeugen können. Die Löcher wandern schnell zum Kollektor, die Elektronen zur Basiszone. Ist das Feld sehr hoch, können die Löcher weiterionisieren, so daß für jedes Diffusionsloch, das aus der Basis kommt, viele Löcher den Kollektor erreichen.

Der Vervielfachungseffekt ist in Bild 1 (Transistor in Basisschaltung) dargestellt. Bei kleineren Kollektorspannungen U_c ist das Feld für eine Multiplikation nicht ausreichend, man erhält eine normale Charakteristik. Bei höheren Spannungen beginnt der Kollektorstrom zu steigen, obgleich der Emitterstrom konstant bleibt, bis ein Punkt erreicht wird, bei dem vollständiger Durchbruch erfolgt; es ergeben sich dabei sehr hohe Werte des Kollektorstroms. Dieser Strom kann auch fließen, wenn der Emitterstrom Null ist, in diesem Fall besteht der Strom aus thermisch erzeugten Minoritätsträgern, normalerweise J_{co} genannt.

Die Stromverstärkung α gilt für den Normalbereich mit J_e = const., so daß im Avalanche-Bereich ein anderer Stromverstärkungsfaktor, nämlich $A\alpha$ gilt. Empirisch wurde gefunden, daß

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_c}{U_A}\right)^3}$$

für Germanium-Diffusionslegierungen gilt. Dabei ist U_A die Spannung, bei der der Durchbruch erfolgt, sie ist hauptsäch-

lich durch die Dotierung des Basis-Materials bestimmt. Bei jeder gegebenen Kollektorspannung muß die Kollektorübergangszone gerade genügend Donatoren (mit fester positiver Ladung) enthalten, um ein elektrisches Feld zu produzieren, das genau das äußerlich angelegte Feld neutralisiert. Besitzt die Basiszone eine große Zahl solcher Donatoren (das heißt, hat sie eine große Leitfähigkeit), so kann die Übergangszone sehr dünn sein, um diese Bedingung zu erfüllen; es genügt eine relativ kleine Spannung für den Durchbruch. Ist die Leitfähigkeit klein, muß die Zone dicker sein und daher die Durchbruchs-Spannung auch größer sein. Wenn jedoch die Leitfähigkeit zu klein wird oder die Basiszone zu dünn, so kann sich die Kollektorsperrschicht ganz über die Basiszone erstrecken. Dies ist als "Punch-through"-Effekt bekannt, die zugehörige Spannung ist U_p.

Lawinentransistoren werden so ausgesucht, daß U_A kleiner als U_p ist, jedoch nur sehr wenig. Das hat zur Folge, daß die effektive Basiszone nur sehr dünn ist, wodurch die Laufzeit der Ladungsträger stark verkürzt wird und damit der Stromanstieg in sehr kurzer Zeit (10^{-10} bis 10^{-9} sec) erfolgt.

3. Aussuchen von Lawinentransistoren

2N709

Als Lawinentransistoren bewähren sich alle diffusionslegierten Hochfrequenztransistoren, und unter diesen wieder diejenigen, die für besonders schnelles Schalten geeignet sind. Transistoren in Mesa-Technik sind nicht geeignet, da es keinen kurzen direkten Weg innerhalb des Transistors zur Lawinenbildung gibt. Ähnliches gilt von den Transistoren in Epitaxial- und wahrscheinlich auch Planar-Technik.

Wenn man die Transistoren aussuchen will, benötigt man einen schnellen Hg-Pulser sowie möglichst einen Sampling-Oszillographen mit etwa 1000 MHz-Bandbreite. In einfacheren Fällen

kann man statt des Oszillographen auch einen schnellen Diskriminator verwenden, eventuell mit folgendem Ratemeter, um die Häufigkeit des Durchbruch als Funktion der Hg-Pulser-Frequenz zu kontrollieren.

In jüngster Zeit sind die ersten industriell gefertigten Lawinentransistoren auf dem Markt erschienen, so z. B. in Deutschland der Philips-Typ ASZ 23, der Ströme von 60 bis 70 mA in einer Nanosekunde erzeugt. Ähnliche Typen in USA (National Semiconductors NS 1110) produzieren zwei Ampère in einer halben Nanosekunde. Von den üblichen Typen sind besonders von folgenden ausgesuchte Exemplare erprobt worden:

2 N 501 2 N 502 2 N 504 2 N 768 2 N 769 2 N 779 2 N 1500	Hersteller: Philco, Sprague
2 N 247 2 N 267	Hersteller: RCA
O C 44	Hersteller: Mullard, Valvo
X A 101 X A 102	Hersteller: Ediswan

4. Schaltungstechnik

Durch die Kombination einer sehr hohen Stromverstärkung und einer kurzen Trägerlaufzeit ist der Lawinentransistor besonders zur Erzeugung sehr kurzer Impulse geeignet. Um diese beiden besonderen Eigenschaften optimal auszunutzen, wird der Kollektor auf die Avalanche-Spannung U_A gebracht. Da U_A von Transistor zu Transistor schwankt, ist es ratsam, über einen großen Widerstand aus einer Spannungsquelle U_B ($U_B > U_A$) einen definierten Strom zu ziehen, das Kollektorpotential stellt sich dabei automatisch auf U_A ein. Wenn die

Emitterdiode gesperrt ist, fließt dann der Strom J_c, die statische Stromverstärkung ist J_c/J_{co}, wo J_{co} der Reststrom unter normalen Bedingungen ist. Es darf dabei $U_A \cdot J_c$ die Verlustleistung nicht überschreiten.

Die grundsätzliche Triggerschaltung ist in Bild 2 gezeigt. Der Kollektor zieht den Strom J_c, der Emitter ist durch eine positive Spannung an der Basis gesperrt. Gibt man einen negativen Impuls auf die Basis, so werden die Löcher vom Emitter in die Basis injiziert, von wo sie zur Kollektorsperrschicht abwandern, um dort in der beschriebenen Art vervielfacht zu werden. Der sich bildende Kollektorstrom wird durch die Kapazität C auf den Emitter zurückgekoppelt, so daß sich ein sehr schneller Stromanstieg ausbildet. Dieser wird dadurch verlangsamt und beendet, daß die Kollektorspannung von U_A nach Null steigt, dabei wird das hohe Beschleunigungsfeld in der Kollektorsperrschicht abgebaut.

Dieser Effekt erzeugt zunächst einen sehr schnellen Stromanstieg (vgl. Bild 3), der dann in einen stationären Wert übergeht, wenn die Kollektorspannung von U_A nach Null geht. Durch die hohe Stromverstärkung wird nur ein kleiner Teil der Ladung vom Kollektor über den Kondensator C an den Emitter zurückgegeben, um den Kollektorstrom aufrecht zu halten. Die überschüssige Ladung wird in Form von Löchern in der Basis gespeichert, wobei die Rekombination gering ist. Ist aber die Kollektorspannung soweit angestiegen, daß der Vervielfachungsprozeß beendet wird, dann wird die Schleifenverstärkung zu klein, um weitere Überschußladung zu bilden. Jetzt wird die gespeicherte Ladung in der Basis benutzt, um die Verluste im Kreis zu kompensieren, so daß der Kollektorstrom eine zeitlang auf seinem Wert gehalten wird. Der Anstieg der Kollektorspannung ist beendet, wenn alle gespeicherte Ladung aufgebraucht ist, der Kollektorstrom fällt dann auf den Wert J_{co} ab. Ist die gespeicherte Ladung sehr groß (abhängig von C), so kann die Kollektorspannung praktisch

bis auf Null ansteigen und dort verharren, bis die letzte Speicherladung verbraucht ist. Dieses ist in Bild 4 dargestellt.

Eine Schaltung zur Erzeugung kurzer Spannungsimpulse ist in Bild 5 gezeigt. In Serie mit dem Kondensator C ist der Widerstand R geschaltet. Der Transistor ist durch eine leitende Diode D gesperrt, der Kollektorstrom J_c fließt über die Basis. Das Triggern erfolgt mit einem negativen Impuls, die Ausgangsamplitude am Widerstand R ist

$$U_R = RC \frac{d U_c}{dt} ,$$

wobei RC klein gegen die Gesamtimpulsdauer am Kollektor ist. Mit den Werten C = 3 pF, R = 100 Ohm ergibt sich eine Amplitude von etwa 3 V bei einer Impulsdauer von 2 Nanosekunden. In Bild 6 ist die Erzeugung eines bipolaren Impulses gezeigt, es wird ein Ferritkern-Transformator (obere Frequenzgrenze ca. 1000 MHz) benutzt, wobei sich mit C = 3 pF, R = 100 Ohm, L = 25 nH eine Impulsbreite von etwa 1 nsec bei einer Amplitude von etwa 1,5 V ergeben.

Die Erholungszeit (Recovery-Time) der Schaltung ist durch das Wiederaufladen der Kollektor- und Schaltkapazität auf die Spannung U_A gegeben, und zwar von dem Spannungswert an, bis zu dem der Kollektor gestiegen war. Diese Zeit ist in erster Näherung

$$T_{rec} \approx C_{ges} \frac{\Delta U_c}{\Delta J_c} .$$

Mit den für Kleinleistungstransistoren typischen Werten von C_{ges} = 10 pF, ΔJ_c = 1 mA, ΔU_c = 25 V ergibt sich T_{rec} = 250 nsec, so daß eine maximale Folgefrequenz von etwa 4 MHz zulässig ist. Negative Ausgangssignale können auch nach

der Schaltung in Bild 7 hergestellt werden. Die Basis ist wie im vorigen Beispiel vorgespannt, der Kollektor ist über eine große Kapazität C_2 wechselstrommäßig geerdet. Der Emitter ist über einen Widerstand (hier 1 kOhm) an Masse gelegt. Das Signal entsteht am Emitterwiderstand, es wird dann über C_1 und R_1 differenziert. Da die Kollektorspannung sich während des Impulses ein wenig ändert, muß während der Erholungszeit auch C_2 wieder nachgeladen werden, dadurch sinkt die maximale Folgefrequenz gegenüber dem Beispiel in Bild 5.

Die Triggerverzögerung sowie deren Schwankung (Time-Jitter) ist abhängig von der Amplitude und der Anstiegszeit der Eingangsspannung. Um die Unsicherheit möglichst klein zu halten, kann man eine Schaltung benutzen, die in Bild 8 wiedergegeben ist. Die normale Schaltung wurde um den Transformator erweitert, der eine Gegenkopplung bewirkt. Der Transistor sieht nur einen kleinen Teil des Eingangssignals, unabhängig von dessen Länge, denn über den Transformator wird der Transistor nach einer kurzen Verzögerung (ca. 2 nsec) wieder gesperrt. Diese Verzögerung ergibt dann die Ausgangsimpulsbreite, bestimmt durch die Laufzeit des Signals vom Eingang über den Gegenkopplungsweg wieder zum Eingang. Diese Schaltung kann noch erweitert werden, wenn man, wie in Bild 9 gezeigt, einen zusätzlichen Emitterverstärker Q_2 anordnet, der das Potential des Kollektors von Q_1 (Lawinentransistor) sehr schnell wieder herstellt. Zwischen beiden Transistoren ist ein Laufzeitkabel eingeschaltet, in dem der Impuls entlangläuft, aus Emitter von Q_2 kurzgeschlossen wird (Schalttransistor mit hoher Stromverstärkung β und großer Bandbreite) und wieder zurückläuft. Die Kabellänge bestimmt daher die Impulsdauer. Die Zenerdiode ist nur zum Schutz des Emitterverstärkers, falls Q_1 ausfällt. Mit dieser Schaltung lassen sich Zählraten bis zu 20 MHz erreichen.

In manchen Fällen wird ein Generator benötigt, der Impulse erzeugt, die mit einer gut definierten Verzögerung nach

einem bestimmten Ereignis eintreffen. Dies kann man erreichen, indem man durch das erste Ereignis eine linear ansteigende Spannung startet, die bei Erreichen einer gewählten Schwelle einen Lawinentransistor triggert. Das Prinzip einer solchen Schaltung ist in Bild 10 gezeigt. Der Eingang ist hier z. B. induktiv gezeichnet. Auch hier muß der Time-Jitter möglichst klein bleiben. Die Genauigkeit des Triggern hängt aber auch von der Stabilität der Schwelle ab, die normalerweise etwa 2,5 mV pro Grad Celsius beträgt; das heißt bei einem Eingangssignal von 2,5 V ist diese Unsicherheit etwa 1 Promille. Eine solche Verzögerungsschaltung ist in Bild 11 aufgeführt. Die Basis ist statisch gesperrt durch die Spannung + U, die über die Sekundärwicklung des Transformators und die Diode D zugeführt wird. Eine linear abfallende Spannung an der Basis wird durch die Diode und den Kondensator C_1 erzeugt, der Entladestrom sei J_1. Es wird getriggert, wenn die Spannung um etwa den Wert U gefallen, das heißt nach etwa $\frac{UC_1}{J_1}$ Sekunden, wenn J_1 = const. gewählt wird, da $U \ll 300$ V ist. Der Ausgangsimpuls wird über R_3 abgenommen. Zusätzlich zum Time-Jitter durch die thermische Instabilität der Schwelle ist noch derjenige hinzuzufügen, der durch die Triggeramplitude und die Schwankung der Versorgungsspannungen hinzu kommt. Nach verschiedenen Messungen liegt diese zeitliche Unsicherheit bei weniger als einer halben Nanosekunde.

5. Logische Schaltungen mit Lawinentransistoren

Wegen seiner kurzen Anstiegszeit und der weitgehenden Unabhängigkeit der Ausgangsamplitude vom Eingangsimpuls ist der Lawinentransistor für den Aufbau logischer Schaltungen im Nanosekundenbereich gut geeignet.

Als Beispiel soll in Bild 12 eine Koinzidenzeinheit gezeigt werden, die mit einer Eingangsamplitude von etwa 0,5 V die

Koinzidenz auslöst. Zum Triggern werden die Impulse aus dem Photomultiplier benutzt, hierbei wirken die Lawinentransistoren gleich als Diskriminator; sie liefern Standardimpulse in eine Und-Schaltung, deren Ausgang wieder einen Lawinentransistor ansteuert. Dieser ist so vorgespannt, daß er entweder durch Einzelereignisse, Zweifach-, Dreifach- bzw. Vierfach-Koinzidenzen getriggert wird. Durch die Verwendung von Lawinentransistoren vor dem Und-Gate ist gewährleistet, daß die Dioden mit relativ großen Signalspannungen arbeiten. Letztere sind schnelle Schaltdioden mit niedrigem Innenwiderstand, z. B. JD 10 - 050, Q 6 - 100 oder aus der Hughes HD-5000-Serie. Die Zeitauflösung, die wenige Nanosekunden beträgt, kann durch Variation der Triggerspannung eingestellt werden.

Da die Impulsverzögerungen solcher Schaltungen, wie bereits oben erwähnt, sehr gering und im wesentlichen konstant sind, kann man die Ausgangsimpulse mehrerer dieser Koinzidenzkreise benutzen, um eine sekundäre Koinzidenz anzusteuern. Ein solches Beispiel ist in Bild 13 gezeigt. Am Eingang wird wieder eine Und-Schaltung aus Dioden benutzt, die, analog Bild 12, einen Lawinentransistor ansteuert, dessen Ausgangsimpulse jetzt 5 - 50 nsec gewählt werden können.

Eine andere Zweifachkoinzidenzschaltung ist im Bild 14 wiedergegeben. Zwei Lawinentransistoren werden an der Basis mit negativen Signalen angesteuert, das Ausgangssignal am gemeinsamen Emitter abgenommen. Dadurch wird der eine Transistor gesperrt, wenn der zweite leitet. Nur wenn die Eingangssignale gleichzeitig erscheinen, oder genauer, wenn die Durchbruchbedingung in beiden Transistoren innerhalb eines kleinen Zeitintervalls erfüllt ist, werden beide Transistoren getriggert. Durch die Addition am Emitter wird nur in dem eben beschriebenen Fall der nachfolgende Transistor ein so großes Signal erhalten, daß er ebenfalls einen Lawinenimpuls erzeugt. Mit Impulsen gleicher Form und Höhe

konnten Auflösungen von $\pm$ 0,2 nsec erreicht werden.

Für manche Experimente wird ein schnelles lineares Gate benötigt. Das bekannte 6-Dioden-Gate ist sehr linear, kann mit Impulsen beider Polarität gesteuert werden und kann gut abgeglichen werden, so daß der Gate- bzw. Signaldurchgriff gering bleibt. Der Nachteil der Schaltung ist, daß zwei Gateimpulse verschiedener Polarität benötigt werden, die größer sein müssen als das durchzulassende Signal. In Bild 15 ist ein solches 6-Dioden-Gate gezeigt, wobei ein Avalanche-Transistor den Gateimpuls liefert, sein Ausgangssignal geht über einen koaxialen Trenntransformator in verschiedener Polarität an das Gate. Man kann so Gateimpulsamplituden von 10 Volt erreichen. Der Transformator muß sorgfältig aufgebaut werden, da die Differenz zwischen beiden Signalen am Gateausgang als Störsignal erscheint. Die benutzten Dioden sind wieder die schon erwähnten schnellen Typen mit kleinem Innenwiderstand. Durch sorgfältigen Aufbau kann man Störsignale am Gateausgang von weniger als 20 mVolt erzielen.

Abschließend soll noch eine interessante Anwendung des Lawinentransistors besprochen werden, die von Gygi und Schneider am CERN erprobt wurde. Die Schaltung wird als Delay-Line-Oszillator bezeichnet, sie ist in Bild 16 wiedergegeben.

Wenn man den Ausgangsimpuls eines Lawinentransistors wieder in seinen eigenen Eingang gibt, so ist dieser Impuls um die Laufzeit durch das Verbindungskabel und die Verzögerungszeit im Transistor selbst verzögert. Die maximale Wiederholungsfrequenz ist durch die Erholungszeit des Transistors gegeben, man erreicht normalerweise einige Megahertz. Die Impulsbreite kann minimal etwa 1 nsec betragen. Die Frequenzstabilität wurde mit einem Hewlett-Packard-Frequenzzähler geprüft, die mittlere zeitliche Schwankung (Timejitter) wurde damit zu 10^{-10} sec bestimmt. Ohne weitere Temperaturstabilisierung

wurde eine Zehn-Minuten-Stabilität von 1 : 10^4 erreicht.

Dieser Oszillator bietet die Möglichkeit, Laufzeiten von schmalen Impulsen in Kabeln zu bestimmen. Zunächst mißt man die Folgefrequenz des Generators mit einer bestimmten Kabellänge, die zweite Messung erfolgt mit einer Serienverbindung des unbekannten Kabels mit dem bestimmten Kabel. Die unbekannte Laufzeit kann aus der Frequenzdifferenz ermittelt werden. Mit dieser Methode kann man einen Bereich von etwa 10^{-5} sec bis 10^{-10} sec überstreichen.

6. Zusammenfassung

Lawinentransistoren sind wegen ihrer sehr hohen Stromverstärkung und der kurzen Trägerlaufzeit für Schaltungen zur Impulserzeugung im Nanosekundenbereich ausgezeichnet geeignet. Ein besonderer Vorteil ist die Einfachheit der Schaltung, die die Lawinentransistoren mit den Tunneldioden gemeinsam haben. Kombinationen beider Schaltelemente werden voraussichtlich in der Zukunft in vielen logischen Bausteinen der Nanosekundentechnik enthalten sein.

Hans-J. Stuckenberg

LITERATUR

1) S. L. Miller, J. J. Ebers, Alloyed Junction Avalanche Transistors, Bell System Technical Journal 34, 883, 1955

2) H. Schenkel, H. Statz, Junction Transistors with Alpha Greater than Unity, Proc IRE, 44, 360, 1956

3) A. J. R. Beale, W. L. Stephenson, E. Wolfendale, A Study of High-Speed Avalanche Transistors, Proc. JEE, Paper No. 2367R, July 1957 in 104 B, 394, 1957

4) F. C. Williams, G. B. B. Chaplin, A Method of Designing Transistor Trigger Circuits, Proc. JEE, Paper No. 1428R, January 1953 in 106, Part III, 228, 1953

5) G. B. B. Chaplin, A. R. Owens, A Method of Designing Avalanche Transistor Trigger Circuits, Proc. JEE, Paper No. 2944, May 1959 in 106, Part B, 1959

6) R. Fullwood, On the Use of 2N504 Transistors in the Avalanche Mode for Nuclear Instrumentation, Rev. Sci, Instr. 31, 1186, 1960

7) W. M. Henebry, Avalanche Transistor Circuits, Rev.Sci. Instr. 32, 1198, 1961

8) E. Gygi, F. Schneider, Nanosecond Avalanche Transistor Circuits, Bericht auf der International Conference on High-Energy Instrumentation, July 1962, at CERN, Genf

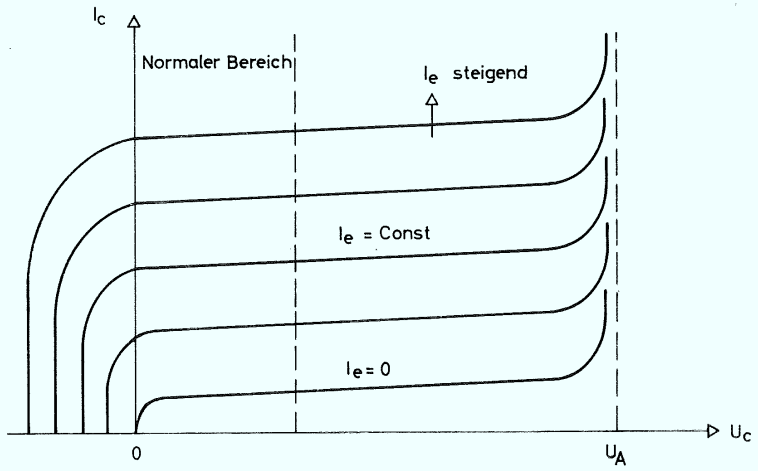


Bild 1

Kennlinien in Basisschaltung

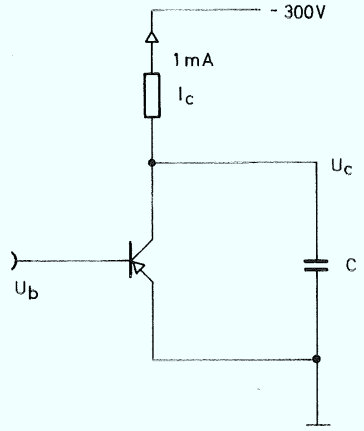


Bild 2

Einfache Triggerschaltung

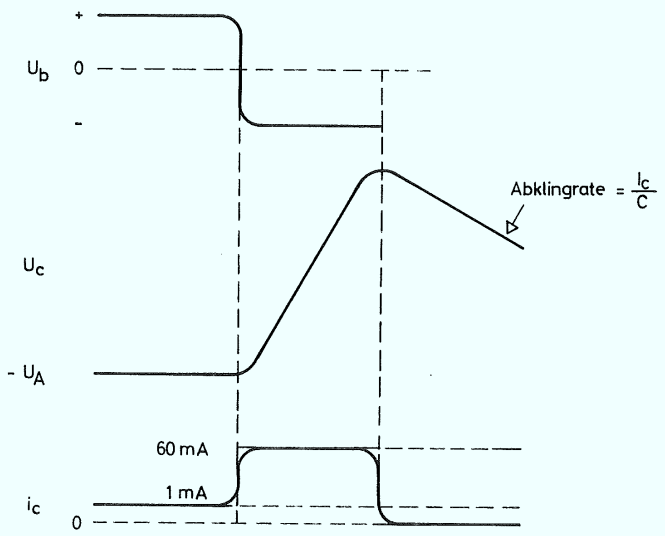


Bild 3

Impulsformen zu Bild 2

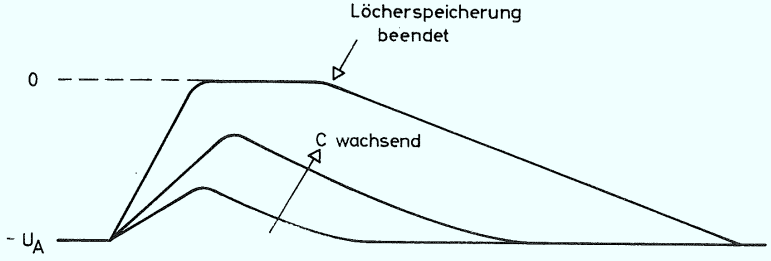
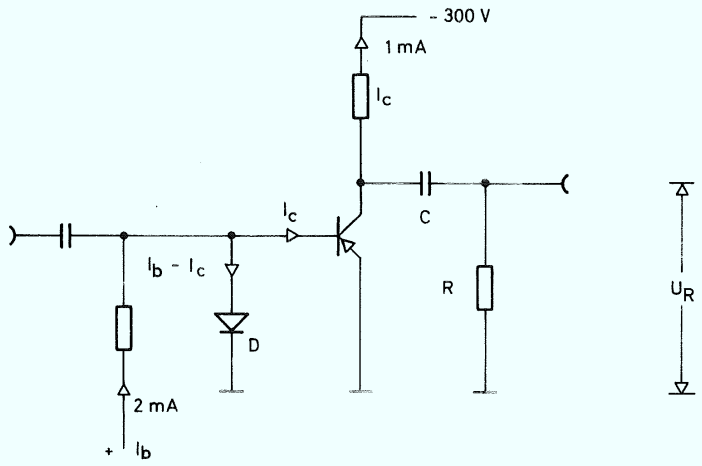


Bild 4

Einfluß der Kapazität C

auf die Spannung am Kollektor



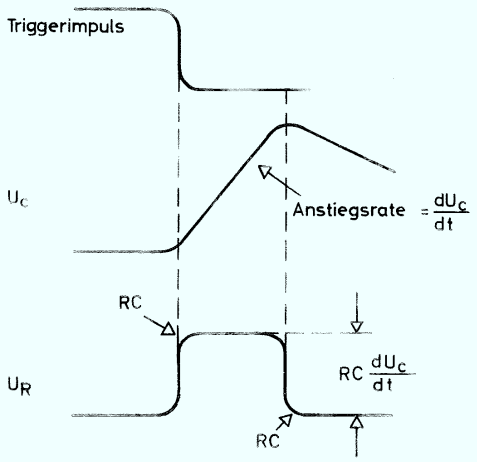
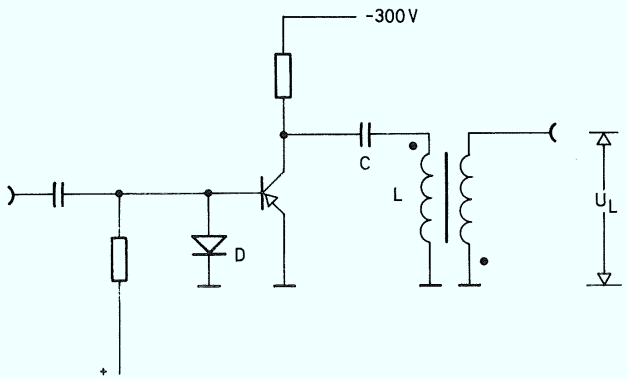


Bild 5

Praktische Triggerschaltung

mit Impulsform



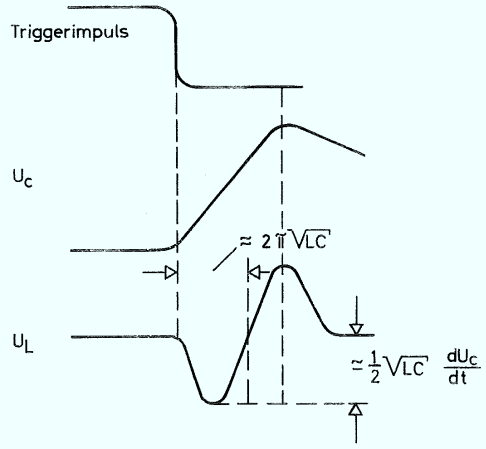
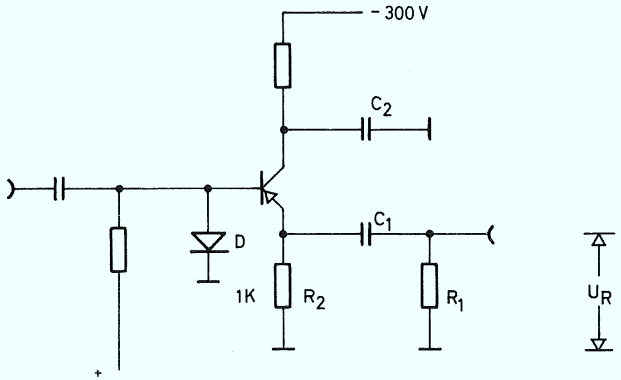


Bild 6

Triggerschaltung mit Umkehrtransformator



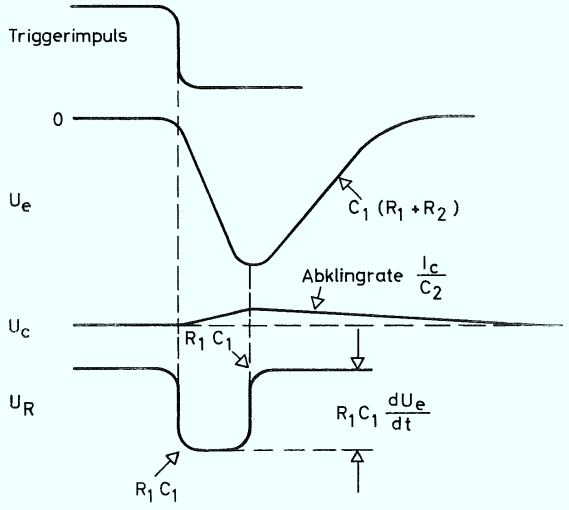


Bild 7

Generator für negative Impulse

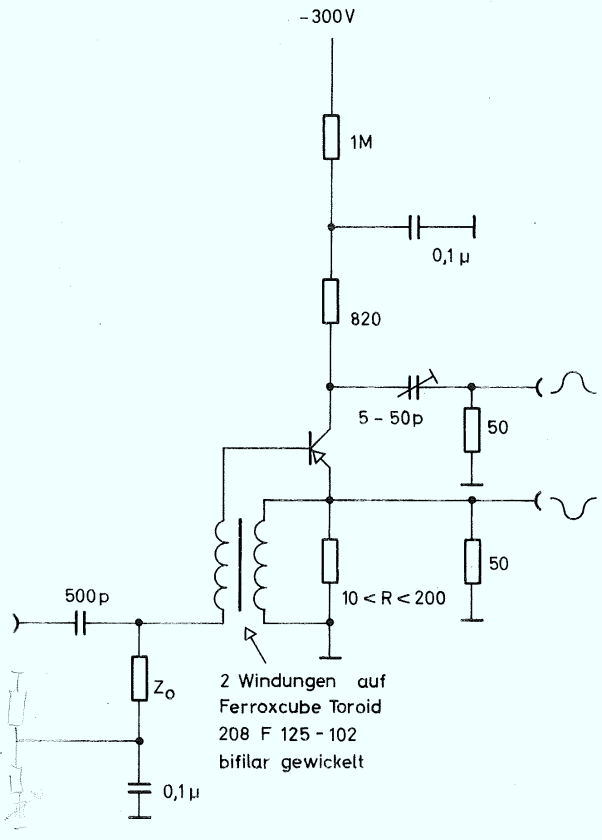


Bild 8

Lawinentransistor mit Gegen-

kopplungstransformator

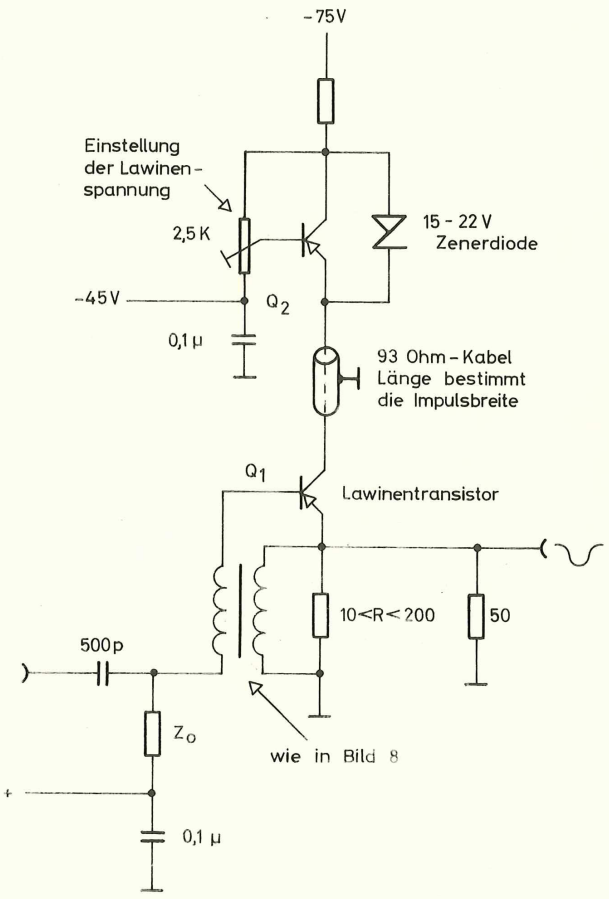


Bild 9

Lawinentransistor mit Emitterverstärker

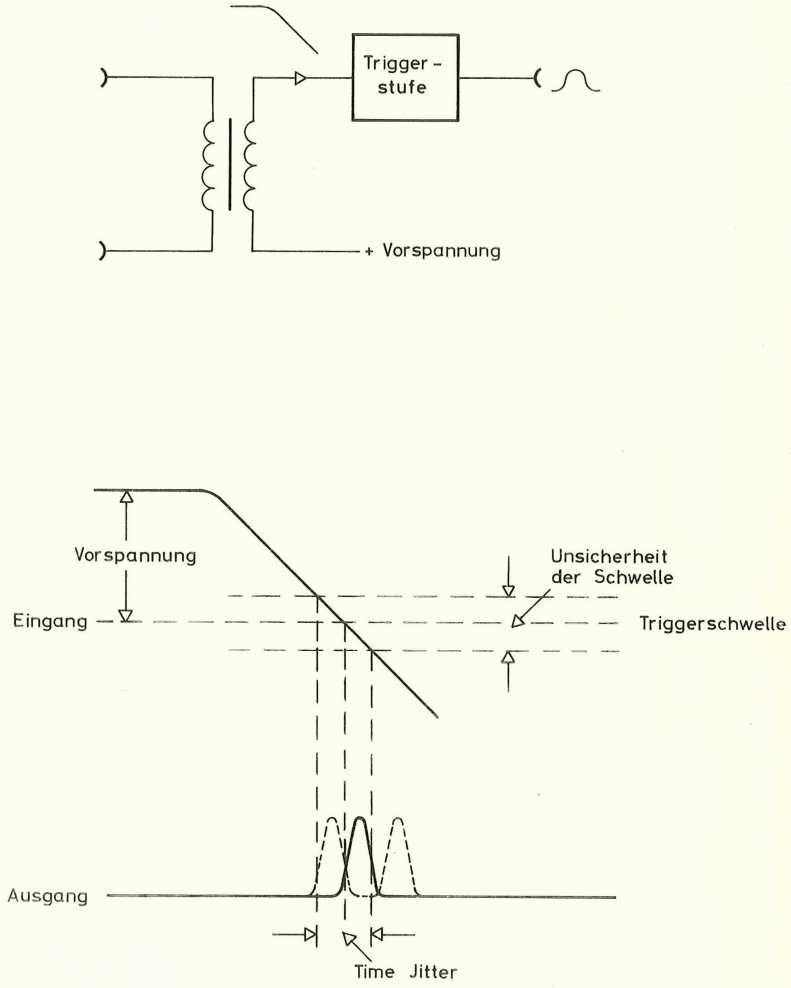
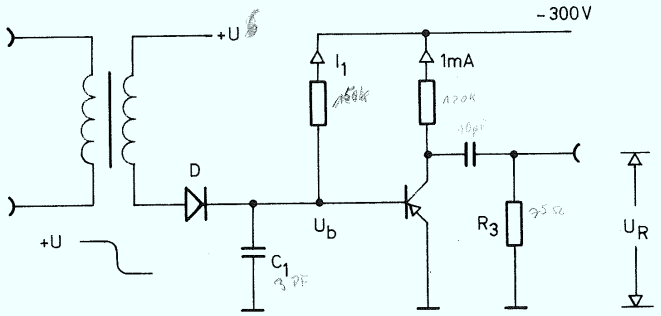


Bild 10

Prinzip der Erzeugung

verzögerter Impulse



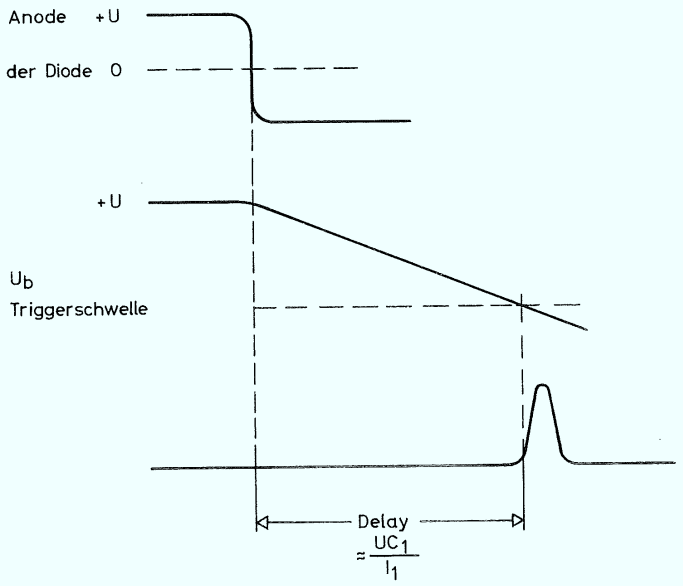


Bild 11

Generator für verzögerte Impulse

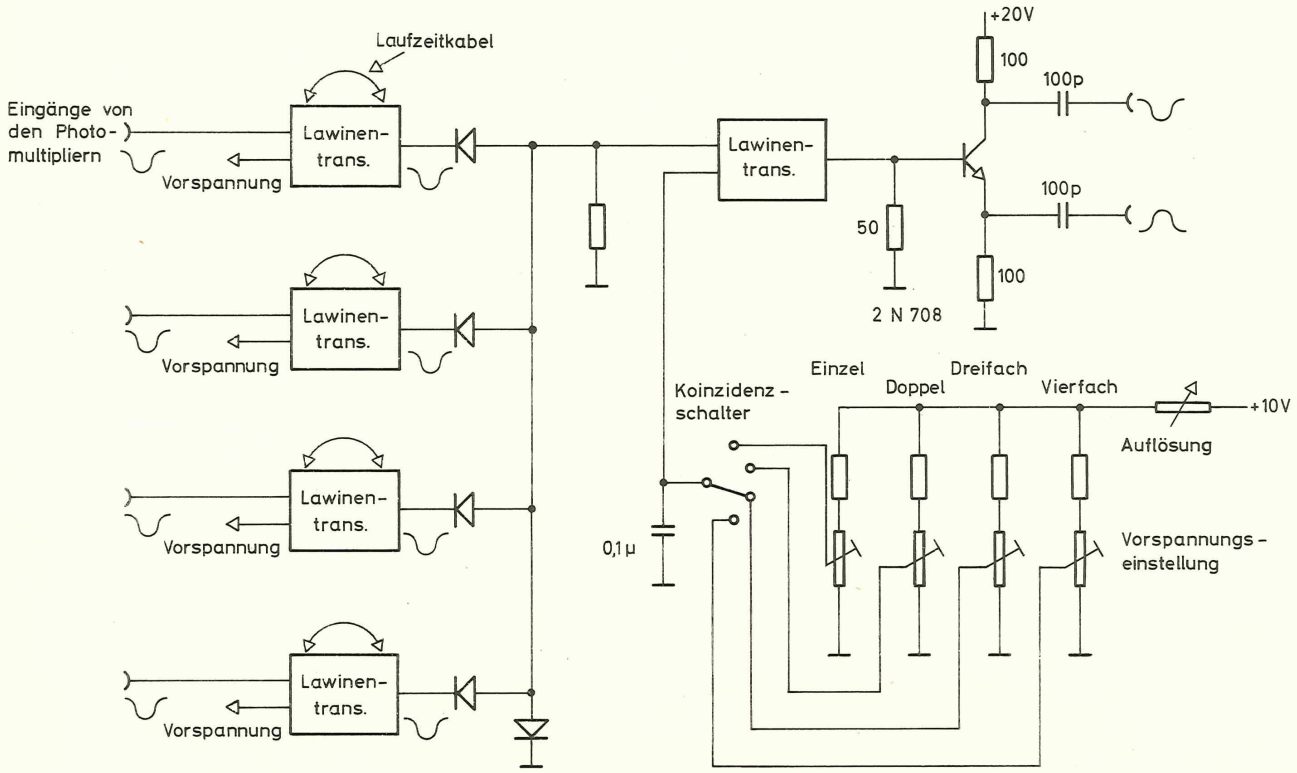


Bild 12

Primäre Koinzidenz

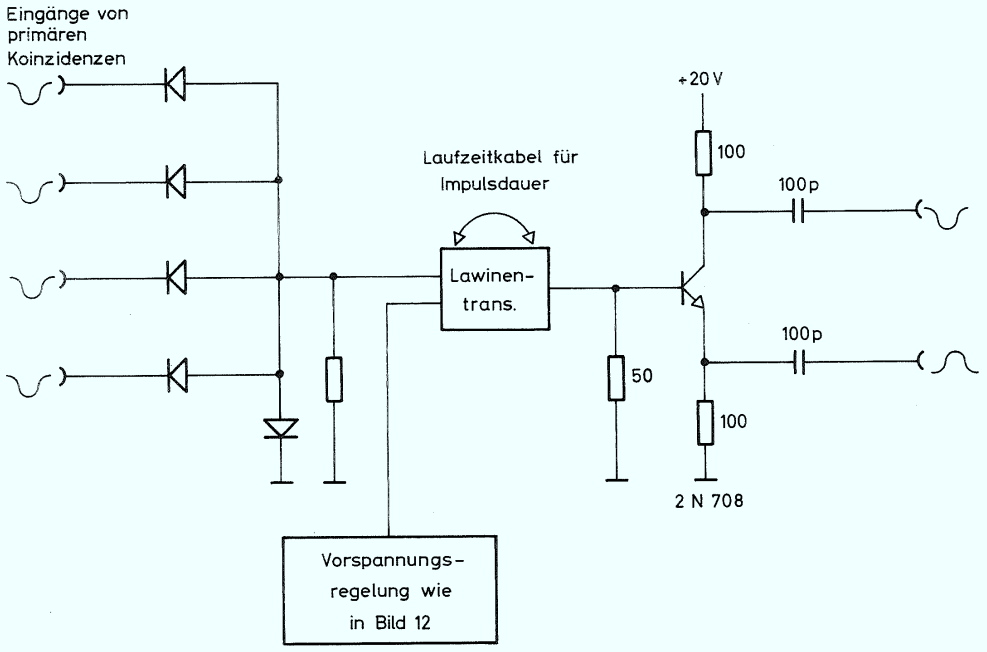


Bild 13

Sekundäre Koinzidenzschaltung

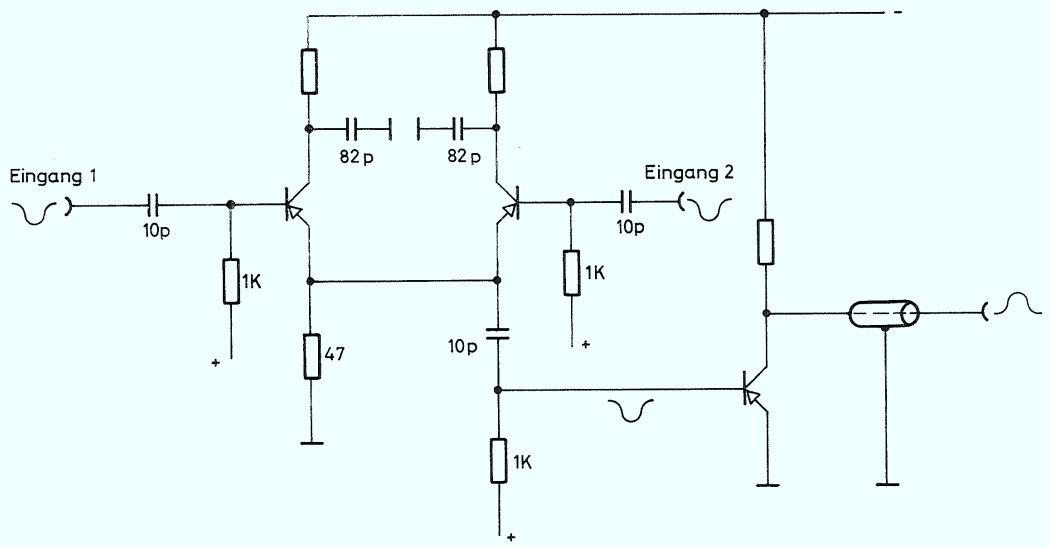


Bild 14

Zweifachkoinzidenz mit Lawinentransistoren

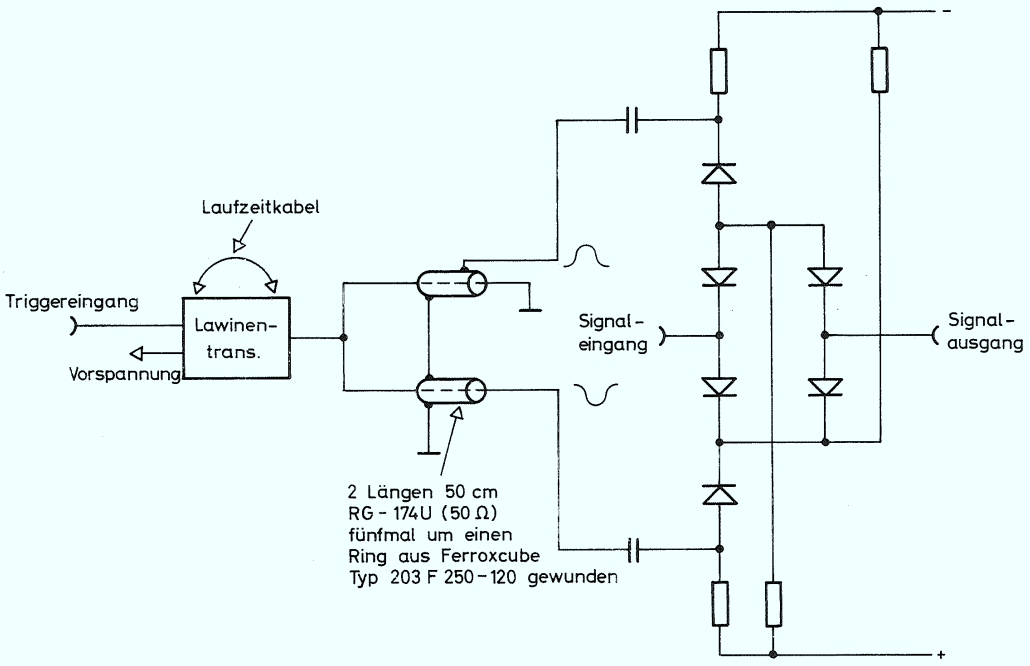


Bild 15

Schnelle lineare Gateschaltung

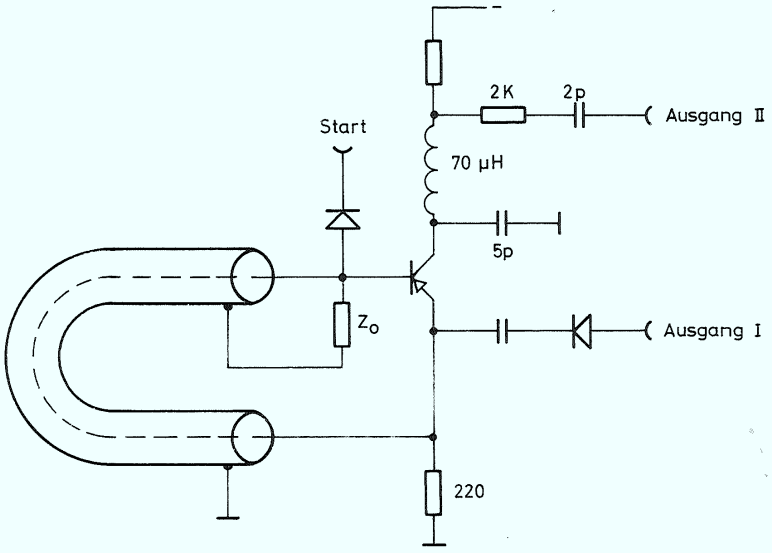


Bild 16

Delay - Line - Oszillator