Breitbandkompander zur Rauschminderung

HANS DORN

Das komplementäre Breitbandkompandersystem High Com wird im folgenden beschrieben. Es wird eine Schaltung für Kompaktkassettengeräte vorgestellt, die ohne Spezialbauelemente aufgebaut werden kann.

In der magnetischen Speichertechnik sind digitale Verfahren wegen des zu hohen Aufwandes noch nicht gebräuchlich. Über längere Zeit wird die analog bespielte Kompaktkassette daher noch das wichtigste Speichermedium bleiben. Die Verbesserung des Bandmaterials ist den physikalischen Grenzen nahegekommen. Magnetköpfe mit getrennten Aufzeichnungs- und Wiedergabesystemen und damit deren bestmögliche Gestaltung sind möglich. Mit Hilfe der verschiedensten Rauschminderungssysteme läßt sich das störende Bandrauschen und damit der Dynamikumfang merklich verbessern.

Eine übersichtliche Darstellung der gebräuchlichen Systeme ist in [1] zu finden. Aus der Vielfalt der untereinander nicht kompatiblen Systeme erlangte neben dem Dolby-System vor allem das System High Com (High Fidelity Compander) der Fa. Telefunken stärkere Beachtung und Verbreitung.

Kompander

Wie bei fast allen Kompandern wird auch beim High-Com-Kompander die Umschaltung der Charakteristik durch Betrieb des aktiven Teils in der Gegenkopplung eines Verstärkers erreicht. Im Unterschied zu Dolby-B ist hier der aktive Teil der Schaltung bereits der komplette Expander, weshalb keine mit genauen Widerständen zu bestückenden Summiernetzwerke erforderlich sind. Ebenso werden an die Genauigkeit des Verstärkers keine Ansprüche gestellt, es handelt sich um einen einfachen Operationsverstärker. Der Expander arbeitet wie im kommerziellen System Telcom-C4 nach dem Prinzip des Kettenverstärkers. Mehrere spannungsgesteuerte Verstärker sind in Kette geschaltet (Bild 1), der Ausgang des letzten liefert nach Gleichrichtung die Steuerspannung, die alle Verstärker in gleicher Weise steuert (Kompressorcharakteristik). Einige der Verstärker haben eine reziproke Steuercharakteristik und werden als zweite Kette parallel vom gleichen Signal gespeist (Expandercharakteristik an deren Ausgängen). Die Genauigkeit der ideal rationalen Kompressions- bzw. Expansionsfaktoren wächst mit der Gleichspannungsverstärkung der Steuerung und mit der Übereinstimmung bzw. Exaktheit der Reziprozität der Steuerkennlinien. Die letzte Forderung wird von den z. Z. verfügbaren Stellgliedern für spannungsgesteuerte Verstärker am besten durch differentielle Widerstände von pn-Übergängen erfüllt. Hinsichtlich eines hohen Dynamikbereiches im Zusammenwirken mit den Verstärkern wurden für das High-Com-System Diodenketten gewählt, die mit symmetrischen Gleichspannungen gesteuert werden.

Kompressions- und Expansionsfaktoren von Zwei, wie sie für die Kassettentechnik notwendig sind, um ausreichende Maskierung des Rauschens bei geringen Pegeln zu ermöglichen, werden mit zwei gesteuerten Verstärkern erreicht. Der Betrieb von nur einem dieser Verstärker in einer Gegenkopplungsschleife bringt jedoch weniger Stabilitätsprobleme mit sich, deshalb wird der Kompressor durch Inversion des Expanders gewonnen. Hauptvorteil derartiger Kompander ist, daß sie nicht vom absoluten Pegel abhängig sind. Bei High Com gilt das nur in einem gewissen Bereich, da der Stellbereich der Diodenketten auf etwa 26 dB eingeschränkt wurde. Die Begrenzung des Widerstandes nach oben geschieht sowohl in der Steuerspannungserzeugung als auch durch Shuntwiderstände. Ihre Begrenzung nach unten erfolgt ausschließlich in der Steuerspannungserzeugung. Dadurch werden Dynamikstörungen nach kurzzeitigen Übersteuerungen der Steuerspannungserzeugung verhindert.

Die Begrenzung des Stellbereiches erfordert die Einführung eines Referenzpegels. Der Bandfluß-Referenzpegel wurde wie bei Dolby-B gewählt: 200 nVs/m ≙ 0 dB. Der Referenzpegel der High-Com-Schaltung ist ihr Umkehrpunkt bei 315 Hz, d. h. der Pegel, bei dem die Verstärkung in allen Betriebsarten gleich ist. Der eigentliche Kompander hat dann die Verstärkung Eins, der Umkehrpunkt bei 315 Hz hat einen Pegel von 600 mV.

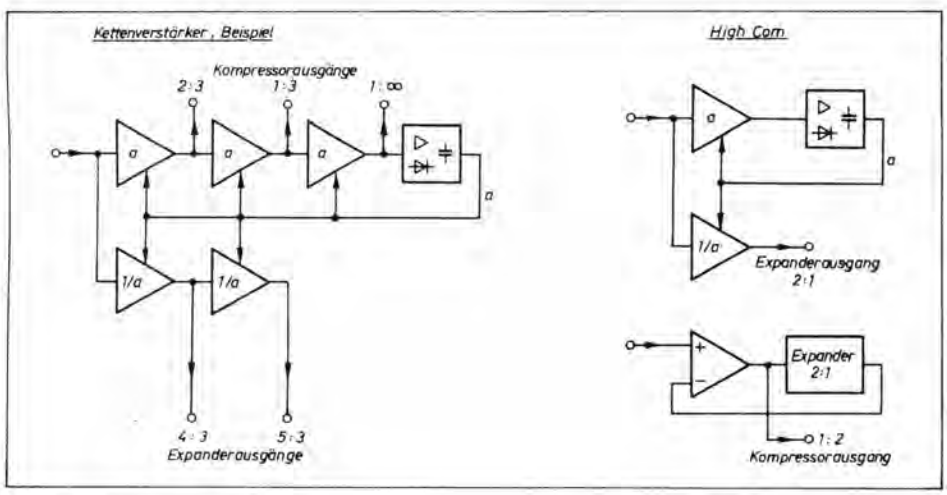


Bild 1: Kompander ▲

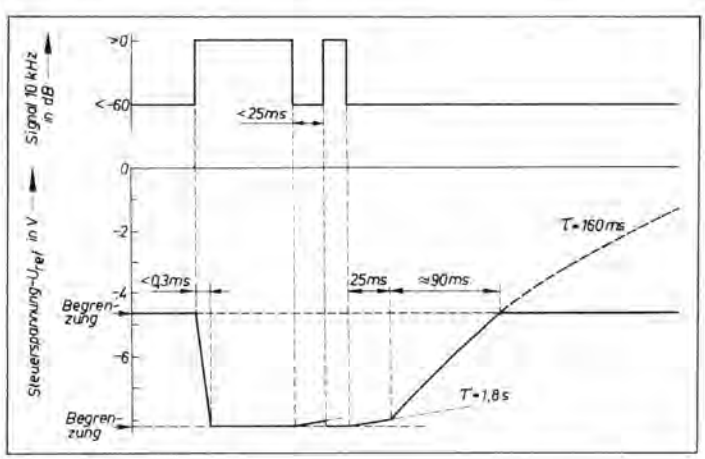


Bild 2: Steuerspannung

Erzeugung der Steuerspannung

Eine Übersteuerung des Bandmaterials führt durch Störung der komplementären Arbeitsweise zu Dynamikfehlern, muß also zuverlässig verhindert werden. Liegt nach längerer Pause plötzlich Signal mit Vollaussteuerung an, muß der 26-dB-Stellbereich durchlaufen werden, das geschieht beim High-Com-Kompander in weniger als 0,3 ms. Das System reagiert auf beide Halbwellen gleich, was ein Vorteil gegenüber den typischen Ausführungsbeispielen des Dolby-B- und Dolby-C-Kompanders ist, denn dort können bei unsymmetrischen Signalen (Spitzenwertgleichrichtung) Fehler entstehen, wenn bei Aufnahme und Wiedergabe die Polarität des Signals im Nebenzweig verschieden ist.

Problematischer ist die Wahl der Abklingzeit. Im Interesse besonders guter Maskierung des Rauschens (Unterdrückung der sog. Rauschfahnen) ist eine möglichst kurze Abklingzeit wünschenswert, sie ist aber nicht realisierbar, weil dann bereits kleinste Fehler in der komplementären Arbeitsweise zu deutlich hörbaren nichtlinearen Verzerrungen im Tieftonbereich führen würden. Bei High Com wurde daher ein signalabhängiges Umschalten zwischen einer langen und einer kurzen Abklingzeitkonstante realisiert (Bild 2).

In der Pause nach einem plötzlich abgeschalteten Signal, dessen Pegel im Regelbereich lag, ist zunächst für mindestens 25 ms die lange Abklingzeitkonstante (1,8 s) wirksam. Diese mit einem retriggerbaren Monoflop realisierte 25-ms-Wartezeit beginnt wieder von vorn, falls ein Signal mit einem Pegel über dem Schwellwert (nach Vollaussteuerung: —26 dB bei 315 Hz bis —60 dB bei 10 kHz) die Pause unterbricht. Ansonsten wird nach dieser Zeit die kurze Abklingzeitkonstante (160 ms) eingeschaltet. Durch eine Begrenzung der Steuerspannung nach oben sind die Abklingzeiten mit maximal 0,56 τ (1 s bzw. 90 ms) wesentlich kürzer, und die Steuerspannung ändert sich näherungsweise linear mit der Zeit.

Das pegelabhängige Umschalten führt nicht zu Schwierigkeiten in der komplementären Arbeitsweise, weil die 25-ms-Wartezeit noch immer klein ist gegen die Abklingzeit und der Schwellwert von der zuvor eingestellten Steuerspannung abhängt. Die Wartezeit wurde gerade so groß gewählt, daß bei den mit hohen Pegeln vorkommenden Frequenzen im Tieftonbereich eine halbe Periodendauer überbrückt wird (Spitze-Spitze).

Frequenzgänge (Bild 3)

Das High-Com-System enthält aus Aufwandsgründen nur eine Kompanderschaltung, die den gesamten NF-Bereich verarbeitet. Mit einem Breitbandkompander wird dann eine gute Maskierung der Störungen erreicht, wenn das Signal mit einem derartigen Amplitudenfrequenzgang aufgezeichnet wird, daß es in der spektralen Verteilung den Störungen entspricht. Die bestimmenden Störquellen im Kassettengerät sind Bandrauschen, Magnetkopfrauschen sowie Funkel- und Schrotrauschen des Wiedergabevorverstärkers bzw. -Entzerrers. Das Bandrauschen ist im Bereich 2...8 kHz besonders stark. Der Aufnahmefrequenzgang entspricht deshalb in diesem Bereich der Charakteristik eines Hochpasses mit +3 dB bei 1,5 kHz und einer maximalen Anhebung um 16,5 dB, zusammen mit einem Tiefpaß (—3 dB bei 10 kHz, maximale Absenkung 6 dB).

Die den Frequenzgang realisierenden Netzwerke des Expanders wurden so angeordnet, daß die leichte Höhenanhebung ab 10 kHz am kodierten Signal, die starke Höhenabsenkung ab 1,5 kHz jedoch am Ausgang des Expanders geschieht. Damit gehört dieser 16,5-dB-Tiefpaß invertiert auch mit zum Frequenzgang der Steuerspannungserzeugung des Kompressors. Die reale Expanderschaltung muß die dazu komplementäre Charakteristik aufweisen, da sie im Aufnahmebetrieb invertiert wird.

Das Band verhält sich auch in Bezug auf

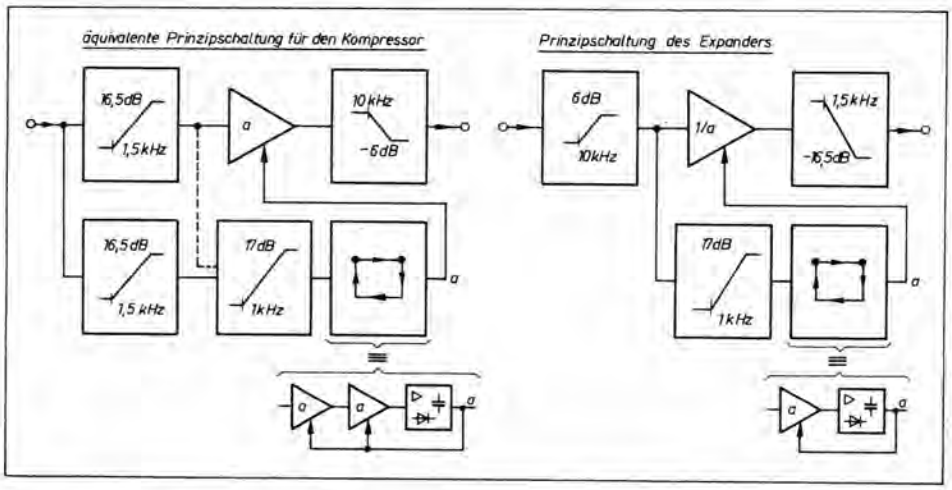


Bild 3: Frequenzgänge

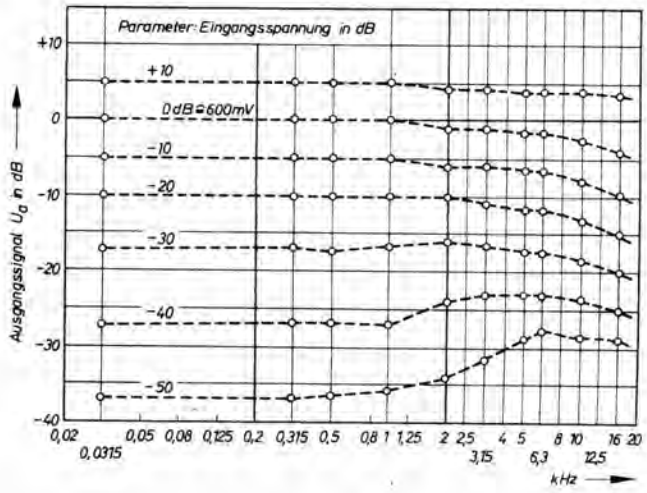


Bild 4: Frequenzgänge des Kompressors

das Nutzsignal nicht frequenzlinear. Der geringeren Empfindlichkeit bei hohen Frequenzen und dem dadurch erforderlichen höheren Aufsprechstrom tragen die meisten Aussteueranzeigen Rechnung. Unberücksichtigt bleibt aber oft der starke Abfall der Aussteuerbarkeit bei hohen Frequenzen. Eine Übersteuerung im hohen NF-Bereich würde durch die Verfälschung des kodierten Signals auch Dynamikfehler bei der Dekodierung hervorrufen. Der Hauptteil des zusätzlichen Aufnahmefrequenzganges verschlechtert trotz seiner Anordnung die Situation, weil er den Anteil hoher Frequenzen im Signalspektrum erhöht. Diese auch für die Steuerspannungserzeugung bereits wirksame 16,5-dB-Höhenanhebung bleibt bei High Com dadurch ohne schädliche Wirkung auf die Höhenaussteuerbarkeit, weil in der Steuerspannungserzeugung ein weiterer Hochpaß mit +3 dB bei 1 kHz und 17 dB maximaler Anhebung eingesetzt ist. Damit verschiebt sich der Arbeitsbereich des Kompressors bei hohen Frequenzen noch weiter zu niedrigen Pegeln. Die Aussteuerbarkeit des Bandes wird dabei besser ausgenutzt, als wenn eine zusätzliche Höhenanhebung für die Aussteueranzeige vorgesehen werden würde.

Um das Eindringen von tieffrequenten Störungen in die Steuerspannungserzeugung einzuschränken, ist die untere Grenzfrequenz des Verstärkers in der Steuerspannungserzeugung nur geringfügig kleiner gewählt, als die untere Grenzfrequenz gebräuchlicher Speichergeräte. Derartige Störungen entstehen in Schallplattenabspielgeräten und Mikrofonen und beeinträchtigen die komplementäre Arbeitsweise des Systems.

High-Com-Baustein

Seit 1979 wurden verschiedene Ausführungen des Systems verwendet. Gemeinsam ist ihnen der Telefunken-Spezialschaltkreis U 401 B, der den gesamten aktiven Teil der Schaltung enthält. Zusätzlich enthalten ist wie bei Dolby-B ein Vorverstärker, um die Signalelektronik des Speichergerätes einfacher gestalten zu können. Drei einfache Umschaltungen (im Baustein durch CMOS-Analogschalter realisiert) ermöglichen eine Dolby-B-kompatible Betriebsart mit objektiv besseren dynamischen Eigenschaften. Abweichungen beim Dekodieren Dolby-B-kodierter Signale sind subjektiv nicht wahrnehmbar. Die die Verstärkung und den Frequenzgang bestimmenden Netzwerke sind zum Teil auch mit integrierten Widerständen realisiert. Diese Parameter wurden durch Messungen ermittelt.

Eigenschaften des Systems

Der zusätzliche Aufnahmefrequenzgang des Kompressors kann mit Hilfe der Spektralanalyse am Ausgang gemessen werden, wenn mit rosa Rauschen angesteuert wird. Die zusätzliche Wirkung des Frequenzganges der Steuerspannungserzeugung wird bei Frequenzgangmessungen mit Sinussignalen verschiedener Pegel sichtbar (Bild 4).

Die Arbeitsweise des Systems ist stark abhängig von den Eigenschaften des Spei-

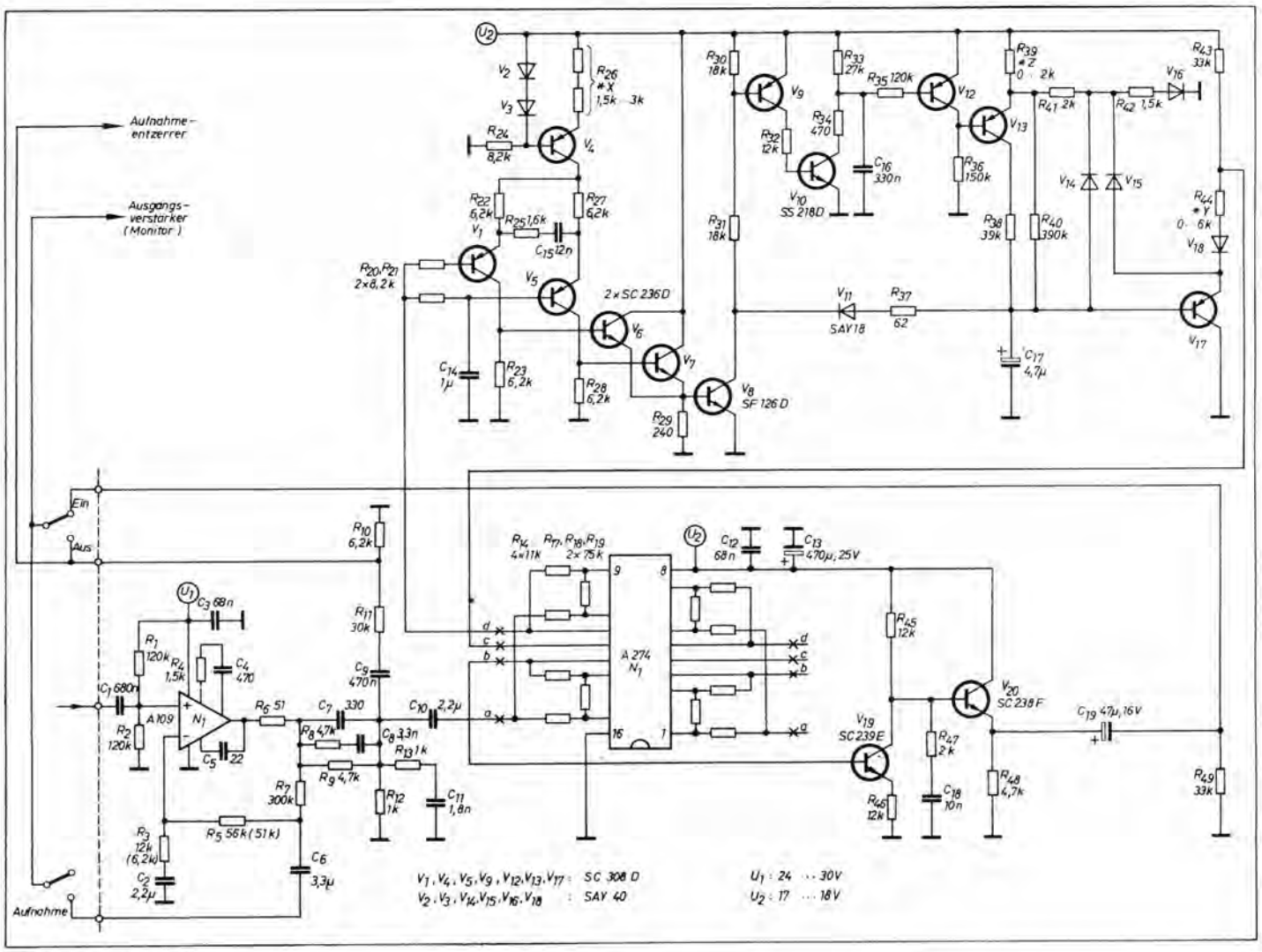


Bild 5: Schaltung ohne Spezialbauelemente

chergeräts. Dazu wurden subjektive Untersuchungen durchgeführt.

Die durch leichte Pegelfehler verursachten Dynamikverfälschungen wirken sich nicht sehr störend aus. Abweichungen von ±1,5 dB sind vertretbar. Vor allem im Interesse der Austauschbarkeit der Kassetten sollte die Einstellung des Wiedergabeverstärkers genau sein. Sie ist nur geringen Alterungserscheinungen unterworfen. Der Aufzeichnungsfaktor ist im Zusammenhang mit dem Tonkopfabrieb leichten Änderungen unterworfen, weshalb die Toleranz dem Aufnahmeweg vorbehalten sein sollte.

Besonders störend jedoch wirken sich Frequenzgangfehler des Speichergerätes aus. Das gesamte Signal wird mit dem Pegel seiner Hochtonanteile moduliert, positiv oder negativ, je nach Lage der Abweichung. Da die Höhenempfindlichkeit trotz internationaler Normungsbestrebungen auch bei Kassetten gleicher Bandsorte um etwa 8 dB streut, macht sich ein Einmessen des Speichergerätes auf einen bzw. einige wenige Kassettentypen mit ähnlichen Eigenschaften erforderlich.

Übersteuerungen im Hochtonbereich treten bei korrekter Aussteuerung nicht auf. Erfolgt jedoch die Aussteuerungsanzeige mit Hilfe eines VU-Messers am Monitorausgang, kommt es bei kritischen Signalen (Popmusik mit überbetonten Höhen) zu Hochtonübersteuerungen, die durch die entstehenden Dynamikstörungen auffallen.

Schaltung ohne Spezialbauelemente (Bild 5)

Filter zum Fernhalten von Löschfrequenz- und MPX-Resten sind vor dem Eingang der Schaltung anzuordnen.

Als spannungsgesteuerte Verstärker wurden elektronische Potentiometer der IS A 274 (Stromverteilungssteuerung) verwendet. Die inverse Steuerkennlinie wird durch Vertauschen der Eingänge erzielt. Durch die Widerstandsbeschaltung ist ein etwas größerer als der benötigte Steuerbereich festzulegen. Bei noch immer 26 dB Gegenkopplung fällt die mit 40 dB recht niedrige Leerlaufverstärkung nicht allzusehr ins Gewicht. Die wirksame Begrenzung des Steuerbereiches muß in der Steuerspannungserzeugung geschehen. Mit Rücksicht auf eine leichte Übersteuerungsreserve (die meisten Kassettenbänder sind bei $k_3 = 3\,\%$ noch einige Dezibel über 200 nVs/m aussteuerbar) wurde der Referenzpegel (Umkehrpunkt bei 315 Hz) auf 580 mV festgelegt. Im Umkehrpunkt muß die mittlere Verstärkung auftreten. Setzt man den Referenzpegel als 0-dB-Marke der Aussteuerungsanzeige (dadurch evtl. verschenkte 3 dB sind in Anbetracht des 20-dB-Dynamikgewinns unwesentlich), dann treten keine höheren Pegel mehr auf, weder im kodierten, noch im Originalsignal. Die Grenzen sind dann ±13 dB. Bei diesen Werten soll der exponentielle Bereich der Steuerkennlinie noch nicht verlassen werden. R_{14} bis R_{19} sind entsprechend zu wählen. Die höchste Verstärkung im Signalweg (geringste Steuerspannung) wird, ausgehend von dem durch V_{11}, V_{17}, V_{18} gegebenen Anfangspunkt, mit R_{44} festgelegt. Diese Einstellung ist zuerst vorzunehmen. Die Obergrenze (niedrigste Verstärkung im Signalweg) wird mit R_{39} festgelegt. Dabei sorgen R_{41}, R_{42}, V_{16} ständig für das korrekte Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Spannung über R_{38}, R_{40}. Die Flußspannungen von V_{16} und V_{11} bzw. von V_{15} und die Basis-Emitterspannung von V_{17} heben sich auf. V_{14} verhindert ein weiteres Aufladen von C_{17}. Die Schaltung erspart ein zusätzliches Einstellen der Abklingzeiten.

Anstelle einer Kippschaltung für die Zeitkonstantenumschaltung wurden einfache Schaltverstärkerstufen mit Zeitglied eingesetzt. Die Zeitkonstante C_{16}, R_{33}, R_{35} ist kleiner als $^1/_3$ der Wartezeit, weil das Verhältnis zwischen U_2 und $-U_{BE\,V12}$ sehr groß ist.

Die symmetrische Spitzenwertgleichrichtung übernimmt ein Differenzverstärker im Zusammenhang mit Folgestufen, die im C-Betrieb arbeiten. R_{25}, C_{15}, R_{22}, R_{27} bewirken den zusätzlichen Frequenzgang der Steuerspannungserzeugung. Mit R_{26} wird der Arbeitspunkt des Gleichrichters und damit der Umkehrpunkt des Systems eingestellt. Die Wahl von C_{14} bestimmt den Tiefenfrequenzgang der Steuerspannungserzeugung.

Durch die Wirkung von N_1 als invertierender Verstärker ist die Phasenumkehrstufe mit V_{19} erforderlich. R_{47}, C_{18}, R_{45} realisieren die 16,5-dB-Höhenabsenkung am Ausgang des Expanders.

N_2 ist Eingangsverstärker und Umkehrverstärker für den Kompressorbetrieb. Die Dimensionierung gilt für eine Umkehrpunkt-Eingangsspannung von 115 mV (Werte in eckigen Klammern für 58 mV). Die Gleichstrombelastung des Ausgangs von N_2 sorgt für dessen A-Betrieb und erspart einen vierten Koppelkondensator in der Gegenkopplungsschleife des Kompressors. Das passive Netzwerk am Ausgang von N_2 realisiert den leichten Tiefpaßanteil des zusätzlichen Aufnahmefrequenzganges und dient der Frequenzkompensation im Kompressorbetrieb. In der Expanderschaltung bedeutet das einen Hochpaß mit +3 dB bei 10 kHz und einer maximalen Anhebung von 6 dB. Die Dimensionierung wurde so gewählt, daß der Ausgangsspannungshub von N_2 bei einer mit U_2 gemeinsamen Betriebsspannung $U_1 = 18$ V noch gerade ausreichen würde. Im Interesse der Übersteuerungsreserve sollte aber U_1 größer gewählt werden.

Hinweise

Ein Stereobaustein (N_1 wird dann gemeinsam genutzt) der Schaltung nach Bild 5 läßt sich bei stehenden Widerständen und Kondensatoren auf 110 cm² Leiterplattenfläche unterbringen, die dann, von Brücken und Anschlüssen abgesehen, 426 Lötstellen tragen muß. Zu empfehlen ist die doppelte Größe für die Leiterplatte. Die Einstellungen y und z können festgelegt werden, für den Umkehrpunkt (x) sollte ein Einstellwiderstand vorgesehen werden. Exemplarstreuungen der Halbleiter wirken sich hier stark aus. Wegen der hohen Empfindlichkeit kann der Einstellbereich durch einen Festwiderstand eingeschränkt werden.

Für die frequenzgangbestimmenden Kondensatoren genügen Exemplare mit 5 % Toleranz (für die zeitbestimmenden – 10 %). C_{17} sollte aus Gründen der Stabilität ein Tantal- bzw. MKT-Typ sein. Die Betriebsspannungen müssen brummspannungsfrei sein, U_2 auch stabilisiert.

Beim Entwurf der Schaltung wurde u. a. Wert auf Übersichtlichkeit gelegt, Vereinfachungen sind selbstverständlich möglich.

Literatur

[1] Bergmann, H.: Verfahren zur Rauschminderung bei der Tonsignalverarbeitung. radio fernsehen elektronik, Berlin 31 (1982) 11, S. 731–736

[2] Janetzke, K.; Mewis, H.-J.; Wiedenroth, B.: Das erste Cassetten-Tapedeck mit „HIGH COM"-Rauschunterdrückung. Funktechnik, Berlin (W) 34 (1979) 6, S. 261–273

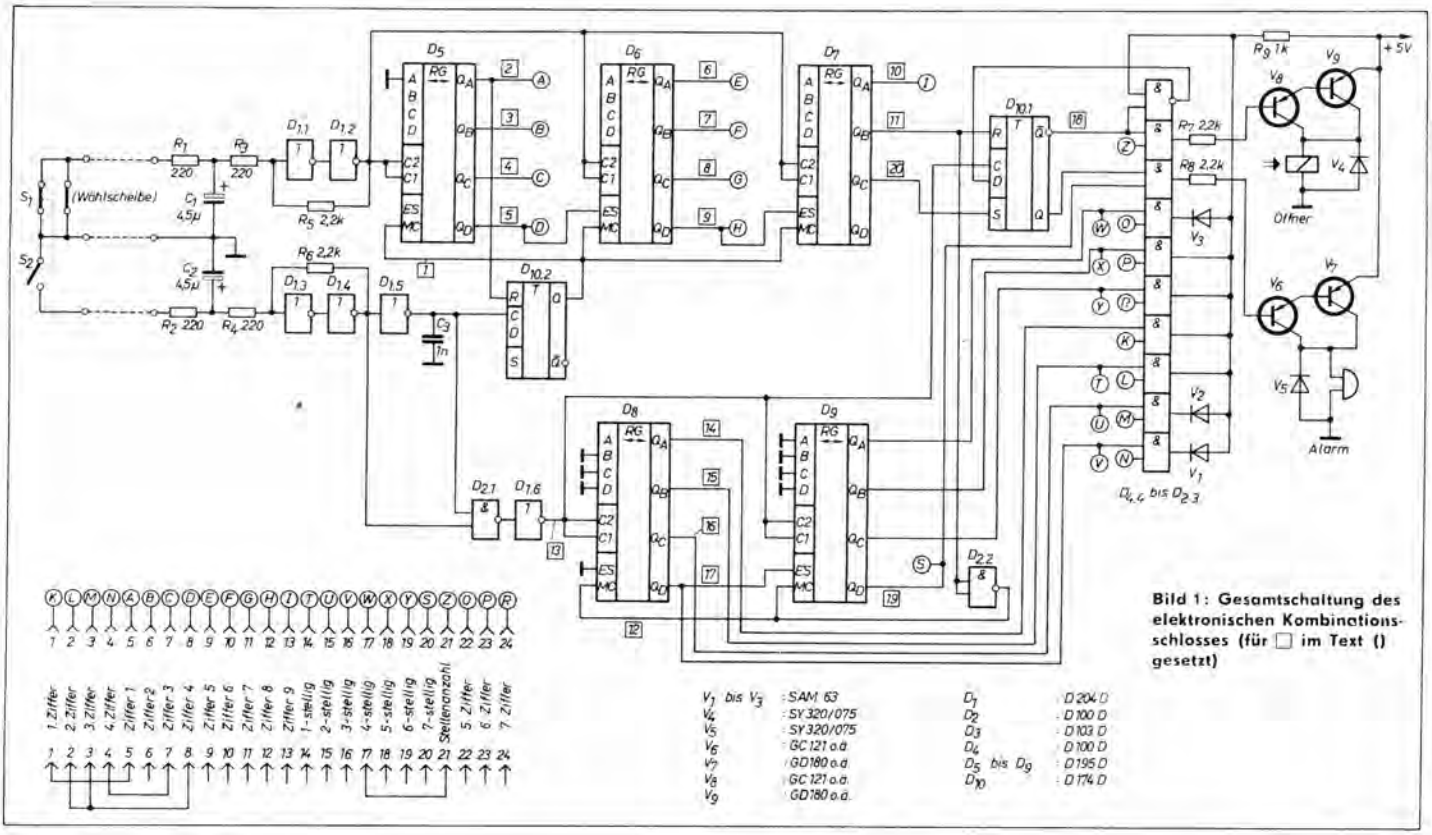
Programmierbares Kombinationsschloß

CHRISTIAN SCHWERIN

Es wird ein elektronisches Ziffernschloß für bis zu siebenstellige Kodes beschrieben, das sich durch einfache Programmierung und Bedienung auszeichnet. Als Bedienorgan findet eine Telefonwählscheibe Verwendung.

Elektronische Kombinationsschlösser haben oft den Nachteil, daß sehr viele Leitungen (in [1] 13 Leitungen) vom Bedienfeld zur im abgesicherten Raum befindlichen elektronischen Schaltung führen. Es wurde deshalb nach einer Lösung gesucht, die mit erheblich weniger Leitungen und außerdem noch verringertem Gesamtaufwand gegenüber [1] auskommt. Unter Verwendung einer Telefonwählscheibe eines defekten Telefons entstand eine Lösung, bei der nur noch drei Leitungen benötigt werden. Der Aufwand an integrierten Schaltkreisen wurde von 14 (in [1]) auf zehn reduziert, wobei ausschließlich Bastlerschaltkreise Verwendung fanden. Die Sicherheit des Schlosses hängt im Prinzip nur noch von der Stabilität und der Zugriffssicherheit der (elektromagnetischen) Verriegelung ab. Die Schaltung besitzt folgende Eigenschaften:

- Der Kode kann nicht durch Messung an den drei nach außen führenden Leitungen gefunden werden, weshalb diese nicht besonders vor Fremdeingriffen geschützt verlegt zu werden brauchen.
- Die Anzahl der Ziffern (Ziffern 1 bis 9 möglich) kann von 1 bis 7 beliebig gewählt werden (wobei die Alarmauslösung bei einer falschen Ziffer erst nach der Wahl der siebenten Ziffer erfolgt,



V_1 bis V_3 : SAM 63
V_4 : SY 320/075
V_5 : SY 320/075
V_6 : GC 121 o.ä.
V_7 : GD 180 o.ä.
V_8 : GC 121 o.ä.
V_9 : GD 180 o.ä.

D_1 : D 204 D
D_2 : D 100 D
D_3 : D 103 D
D_4 : D 100 D
D_5 bis D_9 : D 195 D
D_{10} : D 174 D

Bild 1: Gesamtschaltung des elektronischen Kombinationsschlosses (für ☐ im Text () gesetzt)