

Außergewöhnliche Anwendung von Fotowiderständen

P. SALOMON

(rescript funkamateur 1971, H7, S331-333)

Großer Beliebtheit erfreuen sich bei den Tanzmusikern elektronische Methoden der Klangbeeinflussung, neuerdings besonders die Anhebung oder Absenkung bestimmter Frequenzbereiche (Wau-Wau-Effekt usw.). Der folgende Beitrag gibt einige schaltungstechnische Hinweise zur Realisierung solcher Einrichtungen. Es wird allerdings nur ein Teil der Schaltung beschrieben.

Die Helligkeitssteuerung der Lampe wurde nicht behandelt. Sie läßt sich z. B. aber leicht über Gleichspannungsquelle und ein zwischengeschaltetes pedalangetriebenes Potentiometer bewerkstelligen. Für die zugehörigen Vor- und Endverstärker wurden in unserer Zeitschrift bereits viele Schaltungsvorschläge veröffentlicht.

RC-Schaltungen erfreuen sich insbesondere im Hinblick auf die Anwendung in integrierten Schaltkreisen immer größerer Beliebtheit. Bei einfachen RC-Gliedern bereitet das Verändern der Übertragungsparameter keine besonderen Schwierigkeiten. Durch Variation eines der beiden Schaltelemente ist das leicht zu erreichen. Kompliziert wird das Problem bei Schaltungen, die mehrere veränderbare Schaltelemente verlangen. Die erforderlichen Mehrfachpotentiometer sind schwer zu beschaffen und Drehkondensatoren in Verbindung mit Halbleiterschaltungen sind im NF-Bereich kaum zu gebrauchen. Es wird nun hier gezeigt, wie das Problem mit modernen Bauelementen elegant zu lösen ist.

Auf die komplizierte und recht langwierige mathematische Behandlung des Problems wurde hier mit Rücksicht auf den Umfang des Beitrages verzichtet. Es sollen daher nur ein Überblick bzw. Anregungen anhand von konkreten Beispielen gegeben werden. Inwiefern die Anordnung in Zukunft mit Lumineszenzdioden vielleicht voll integrierbar wäre, ist ein noch zu untersuchendes interessantes Problem.

Versuchsaufbau

Drei Fotowiderstände vom VEB Carl Zeiss Jena des Typs CdS-8 wurden in der in Bild 1 gezeigten Weise in einem aus Leiterplattenmaterial zusammengelöteten Gehäuse untergebracht.

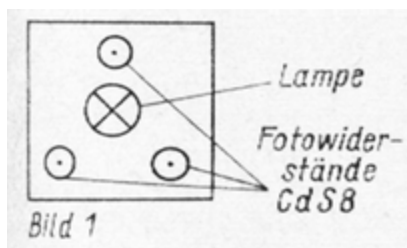


Bild 1: Versuchsaufbau der Abstimmereinheit (von oben gesehen)

Die Glühlampe La (6 V, 50 mA), die sich ebenfalls in dem Gehäuse befindet, beleuchtet die drei Fotowiderstände mit annähernd gleicher Helligkeit. Die Betriebsspannung der Lampe La muß unbedingt reine Gleichspannung sein, da schon geringe Wechsellspannungsanteile die Funktion der nachfolgend beschriebenen Schaltungen sehr beeinträchtigen.

Die gemessenen Widerstandswerte der Fotowiderstände sind im Diagramm Bild 2 dargestellt.

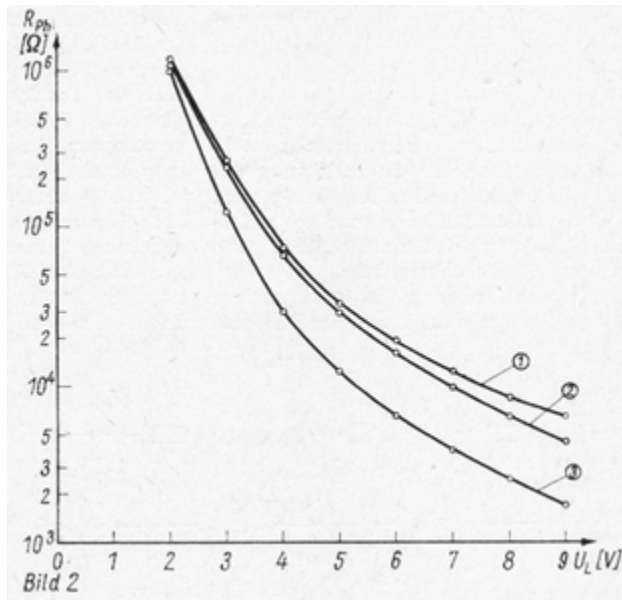


Bild 2: Widerstandsverlauf der drei Fotowiderstände in Abhängigkeit von der Spannung an der Lampe

Es ist zu sehen, daß die Kurvenverläufe mehr oder weniger voneinander abweichen. Das ist auf die Exemplarstreuungen der Fotowiderstände zurückzuführen. Leider standen dem Verfasser nur 3 Exemplare zur Verfügung, so daß eine Auswahl auf annähernd gleiche Kurvenläufe nicht möglich war. Wie sich jedoch aus den Messungen ergab, konnten nur geringe nachteilige Folgen festgestellt werden.

Für höhere Ansprüche empfiehlt sich entweder die Anwendung von ausgesuchten Exemplaren, oder man versucht, durch Reihen- und Parallelschalten von Widerständen die Kennlinien annähernd übereinstimmend „hinzubiegen“, was jedoch immer auf Kosten des Abstimmereiches geht.

(Anm.d. Red.: Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Fotowiderstände in verschiedenen Abständen von der Lampe anzuordnen oder Blenden zu benutzen. Der Abstimmereich wird dann lediglich vom "schlechtesten" Fotowiderstand bestimmt.)

RC-Ketten

RC-Ketten kann man grundsätzlich in zwei verschiedenen Ausführungen auf bauen. Bild 3 zeigt die beiden Möglichkeiten.

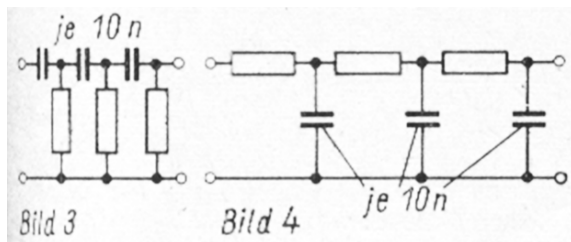


Bild 3: Schaltung eines dreigliedrigen Hochpasses

Bild 4: Schaltung eines dreigliedrigen Tiefpasses

Es entstehen entweder Hoch- oder Tiefpässe, die durch Einsatz der drei Fotowiderstände dreigliedrig sind. Selbstverständlich kann man zur weiteren Erhöhung der Flankensteilheit noch weitere Glieder hinzufügen.

Es besteht aber noch eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Flankensteilheit, von der hier Gebrauch gemacht wurde. Durch Kombination mit einer aktiven Schaltung und Einführung einer Rückkopplung wird besonders im Übergangsbereich eine Versteilerung der Flanken erreicht. Bild 5 zeigt die Schaltung des auch im weiteren verwendeten Verstärkers in Zusammenschaltung mit einer RC-Kette.

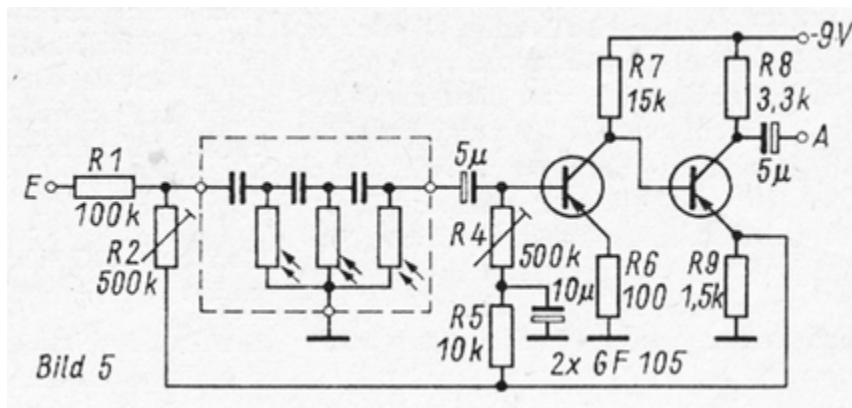


Bild 5: Aktive RC-Kette

Mit R2 wird der gewünschte Grad der Rückkopplung eingestellt. Leider konnte der theoretisch nach Bild 2 zu erwartende Durchstimmbereich von über zwei Dekaden nicht voll ausgenutzt werden. Bei den sehr hohen Dunkelwiderständen (entspricht hier niedriger Grenzfrequenz) macht sich der endliche Eingangswiderstand des Transistorverstärkers sehr störend bemerkbar, so daß sich keine realen Verhältnisse mehr ergeben.

Durch Parallelschalten von je 100 k Ω (in Bild 3 bis Bild 5 nicht dargestellt) zu den Fotowiderständen wurde deshalb der Durchstimmbereich künstlich eingegrenzt. In Bild 6 und Bild 7 sind die gemessenen Frequenzgänge der Schaltung nach Bild 5 dargestellt.

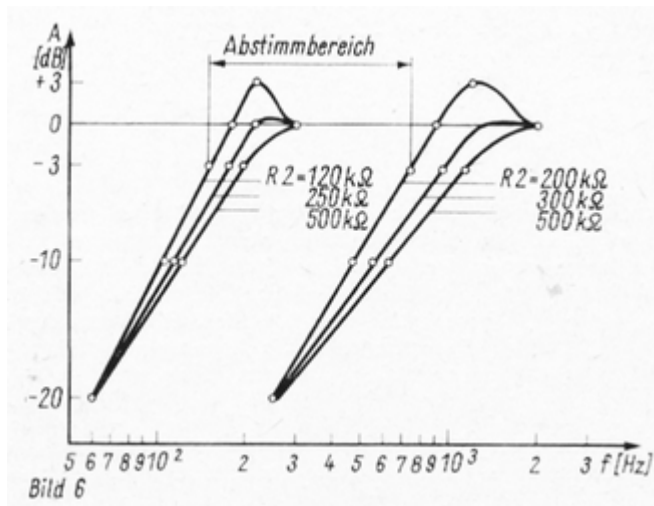


Bild 6: Frequenzgang der Hochpaßschaltung, Parameter: Rückkopplungsgrad

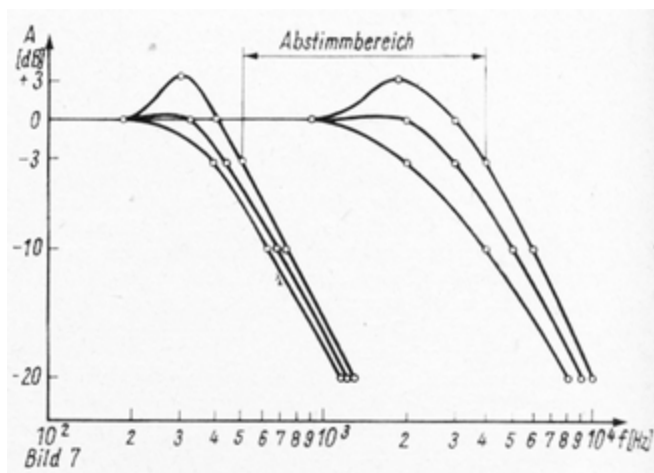


Bild 7: Frequenzgang der Tiefpaßschaltung, Parameter: Rückkopplungsgrad

Deutlich ist die Wirkung der Rückkopplung über R_2 zu erkennen. Die in Bild 6 angegebenen Parameterwerte von R_2 sind sehr von den Eigenschaften des Transistorverstärkers abhängig, sie sind daher nur als Anhaltswerte zu betrachten bzw. um die Tendenz zu veranschaulichen. Die Kurven wurden einmal bei Dunkelheit ($U_L = 2 \text{ V}$) und dann bei voller Beleuchtung der Fotowiderstände aufgenommen. Wie man sehen kann, ist trotz der Einengung des Abstimmbereiches eine Veränderung der Grenzfrequenzen der beiden Schaltungen über mehr als zwei Oktaven möglich. Durch Kombination von Hoch- und Tiefpässen dieser Art erhält man Bandpässe mit in weiten Grenzen veränderbarer Bandbreite und Mittenfrequenz.

Einfache RC-Schaltungen mit Bandpaßcharakter

Durch Kombination einfacher RC-Glieder kann man RC-Schaltungen aufbauen, deren Übertragungsverhalten ein Maximum haben, d. h., sie wirken wie stark gedämpfte LC-Schwingkreise. Bild 8 zeigt die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten.

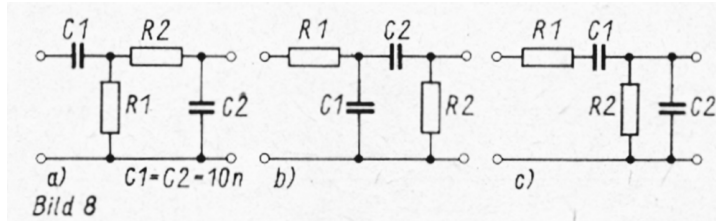


Bild 8: Einfache RC-Schaltungen mit Bandpaßcharakter

Es wurde nun eine solche Schaltung aufgebaut, wobei aber anstelle der Widerstände bzw. Potentiometer zwei der in der Abstimmereinheit befindlichen Fotowiderstände verwendet wurden. Die Selektionseigenschaft der RC-Schaltung ist sehr von der guten Übereinstimmung - d. h. kleinen Toleranz - der Bauelemente abhängig. Wenn nun veränderbare Bauelemente verwendet werden sollen, so muß man für einen guten Gleichlauf der Abstimmelemente sorgen, damit die Güte über den gesamten Abstimmbereich konstant bleibt. Da im allgemeinen ein exakter Gleichlauf sehr schwer zu erreichen ist und außerdem auch die theoretisch maximalen Gütewerte relativ gering sind ($Q = 0,5$) [1], wurde der RC-Vierpol wieder in eine aktive Schaltung einbezogen (Bild 9).

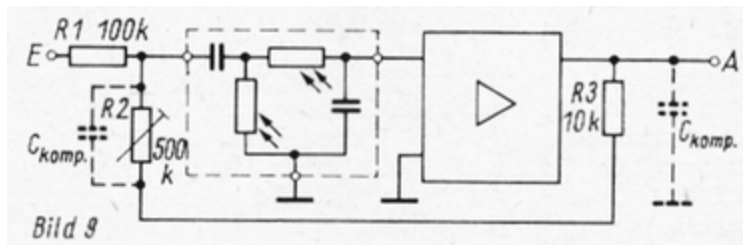


Bild 9: Aktiver RC-Bandpaß

Dadurch ist es auch möglich, eventuelle Güteveränderungen, die durch Gleichlaufdifferenzen am Anfang oder Ende des Abstimmbereiches auftreten, zum Teil zu kompensieren.

Als Verstärker wird der bereits in Bild 5 dargestellte verwendet. Da es sich jedoch bei dieser Schaltung um eine Mitkopplung handelt, ist dem Stabilitätsproblem (Speisespannung und Temperatur) besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Mit R2 läßt sich die gewünschte Mitkopplung und damit der entsprechende Gütewert einstellen.

T-Glied-Schaltung

Die T-Glied-Schaltung zeigt im Übertragungsverhalten ein gerade entgegengesetztes Verhalten wie die oben beschriebene RC-Schaltung, d. h., bei „Resonanz“ entsteht ein Minimum in der Frequenzgangkurve. Im Bild 10 sind die beiden Schaltungsmöglichkeiten des überbrückten T-Gliedes dargestellt.

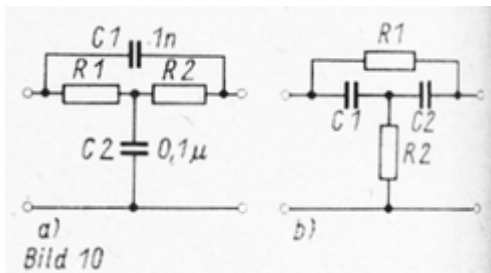


Bild 10: Schaltungsmöglichkeiten von überbrückten T-Gliedern

Durch geeignete Dimensionierung lassen sich für RC-Schaltungen recht gute Dämpfungswerte erreichen [2]. Die Dimensionierung der beiden Schaltungsmöglichkeiten ist keineswegs identisch. Sie wurde nur für den hier interessierenden Teil ausgeführt, wobei wiederum zur Linearisierung und zur Begrenzung des Abstimmereiches die 100-kΩ-Parallelwiderstände zu den Fotowiderständen geschaltet wurden. Für unseren Fall - Fotowiderstände als durchstimmbare Bauelemente - eignet sich die Anordnung nach Bild 10a besonders. Zwei Fotowiderstände übernehmen die Funktion der Längswiderstände. Damit läßt sich erreichen, daß sich die maximalen Dämpfungswerte innerhalb des Abstimmereiches nur wenig ändern.

Wird das T-Glied als Gegenkopplung eines Verstärkers ausgeführt, so erhält man einen sehr stabilen RC-„Schwingkreis“. Bild 11 zeigt die Anordnung und Bild 12 die ermittelte Güte in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz.

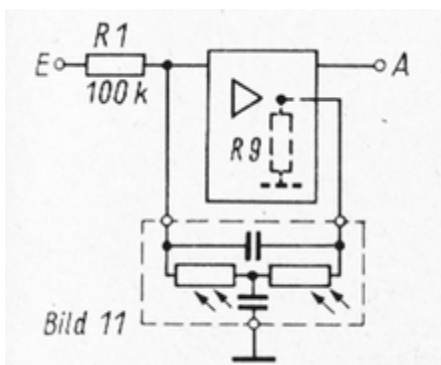


Bild 11: Schaltung eines aktiven RC-Schwingkreises mit überbrücktem T-Glied

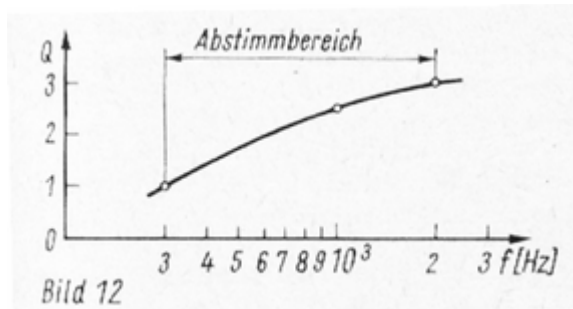


Bild 12: Güte des aktiven RC-"Schwingkreises" (überbrücktes T-Glied)

Wie zu sehen ist, sind die erreichbaren Gütewerte nicht hoch. Das liegt insbesondere an den Eigenschaften des Verstärkers (Verstärkung, Eingangswiderstand).

Läßt man im Verstärker (Bild 5) den Emitterwiderstand R_6 weg, erhält man zwar eine höhere Verstärkung, aber gleichzeitig sinkt der Eingangswiderstand stark ab. Es ergaben sich dann zwar bei hohen Resonanzfrequenzen wesentlich bessere Güten, aber bei den niedrigen ändert sich kaum etwas. Durch die parasitären Verstärkereinflüsse kann es mitunter vorkommen, daß die Schaltung besonders bei hohen Resonanzfrequenzen schwingt. Ein entsprechend phasendrehendes Glied (RC-Reihenschaltung) parallel zum Emitterwiderstand R_9 vermeidet diesen Effekt.

Doppel-T-Glied

Während beim überbrückten T-Glied bei "Resonanz" nur ein Minimum vorhanden war, hat das Doppel-T-Glied dort eine Nullstelle. Das trifft selbstverständlich nur zu, wenn die Dimensionierungsvorschrift (Bild 13) genau eingehalten wird.

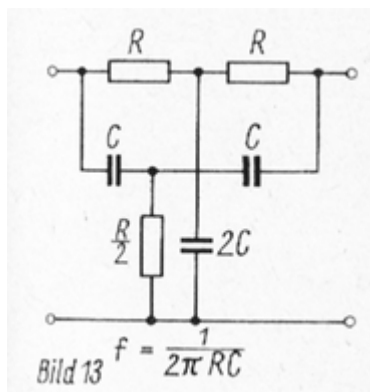


Bild 13: Übliche Dimensionierung des Doppel-T-RC-Gliedes

Schon geringe Abweichungen, die durch Toleranzen oder Temperatureinflüsse eintreten, lassen aus der Nullstelle nur noch ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Minimum werden. Ähnlich verhält es sich bei Belastung am Ausgang des Doppel-T-Gliedes.

Die im Bild 13 dargestellte Dimensionierungsvorschrift gilt, genau genommen, nur für den Fall, daß der Doppel-T-Vierpol von einem Spannungsgenerator ($R_i \rightarrow 0$) gespeist und am Ausgang in Leerlauf ($R_a \rightarrow \infty$) betrieben wird [3]. In der praktischen Anwendung, z. B. als Gegenkopplungsvierpol eines Transistorverstärkers, ist das natürlich nicht der Fall. Eine mathematische Behandlung der dann auftretenden Verhältnisse ist sehr kompliziert und umfangreich [3], so daß für nicht allzu hohe Ansprüche auf Genauigkeit und auch im Hinblick auf die Toleranzen der Fotowiderstände eine empirische Ermittlung der günstigsten Werte der Kondensatoren als einfacher empfunden wurde.

Bild 14 zeigt die im Versuch als günstig ermittelten Werte für ein als Gegenkopplungsvierpol des Verstärkers nach Bild 5 geschaltetes Doppel-T-Glied (Bild 15).

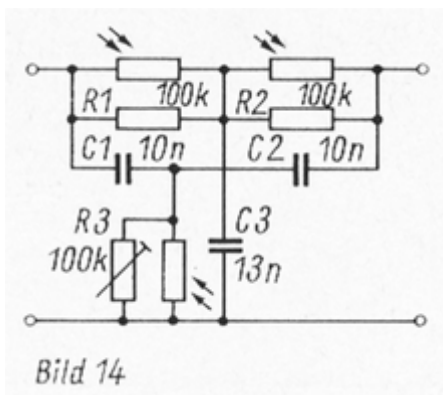


Bild 14: Empirisch ermittelte Dimensionierung des Doppel-T-Gliedes

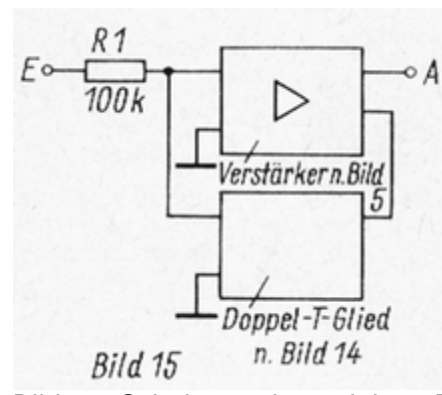


Bild 15: Schaltung eines aktiven RC-"Schwingkreises" mit Doppel-T-Glied

Diese Werte können jedoch, wie schon gesagt, nur als Anhaltswert gelten. Dabei ist folgendes zu beachten: R_3 beeinflusst die Güte bei niedrigen Frequenzen, während C_3 mehr die Güte bei hohen Frequenzen bestimmt (Bild 14), Somit ist es möglich, durch einen Zweipunktvergleich eine von der jeweiligen Resonanzfrequenz relativ unabhängige Güte zu erzielen (Bild 16).

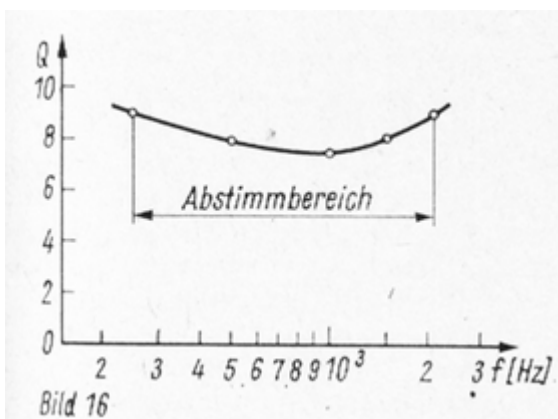


Bild 16: Güte des aktiven RC-"Schwingkreises" (Doppel-T-Glied)

Wie zu sehen ist, wurde ein Durchstimmbereich von fast einer Dekade erreicht.

Literatur

- [1] Dr. Ing. Bohne, R.: Schwingkreise aus Widerständen und Kondensatoren, Radio und Fernsehen 16 (1967), H. 21, S. 650 ff.
- [2] Weissbach, G., Günther, K.: NF-Selektivverstärker mit RC-Vierpolen, Radio und Fernsehen 13 (1984), H. 21, S. 662 ff.
- [3] Günther, H.: Eigenschaften des RC-Doppcl-T-Vierpols, VEB Verlag Technik, Berlin 1953
- [4] Gesell, F.: Einfache Grundschaltungen der aktiven RC-Technik, Radio Fernsehen Elektronik 19 (1970), H. 10, S. 317 ff.
- [5] Harms, L.: Aktive Filter für tiefe Frequenzen, Radio Fernsehen Elektronik 19 (1970), H. 19, S. 646 ff.

© Copyright Peter Salomon, Berlin, rescript aus funkamateur 1971/7; bearbeitet 2014

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, Irrtum und Änderungen vorbehalten. Eine auch auszugsweise Vervielfältigung bedarf in jedem Fall der Genehmigung des Herausgebers.

Die hier wiedergegebenen Informationen, Dokumente, Schaltungen, Verfahren und Programmmaterialien wurden sorgfältig erarbeitet, sind jedoch ohne Rücksicht auf die Patentlage zu sehen, sowie mit keinerlei Verpflichtungen, noch juristischer Verantwortung oder Garantie in irgendeiner Art verbunden. Folglich ist jegliche Haftung ausgeschlossen, die in irgendeiner Art aus der Benutzung dieses Materials oder Teilen davon entstehen könnte.

Für Mitteilung eventueller Fehler ist der Autor jederzeit dankbar.

Es wird darauf hingewiesen, dass die erwähnten Firmen- und Markennamen, sowie Produktbezeichnungen in der Regel gesetzlichem Schutz unterliegen.