# Kampt

Es stört, es vernebelt die feinen Details, es legt einen Grauschleier über die Musik. Das Rauschen von elektronischen Schaltungen, insbesondere bei HiFi-Verstärkern, ist ausgesprochen unbeliebt. Wenn es einmal im Tonsignal enthalten ist, dann lässt es sich nicht mehr entfernen; Tricks mit Filtern oder Denoisern sind allenfalls ein Notbehelf. Stattdessen nutzt man besser alle Möglichkeiten, es von vornherein am Entstehen zu hindern. Hier sind dazu die Grundlagen erläutert und konkrete Tipps genannt.

Dipl.-Phys. Helmuth Lemme

Die schlechte Nachricht zuerst: Absolut rauschfreie elektronische Schaltungen gibt es nicht - leider. Die Physik lässt sich nun einmal nicht überlisten. Aber mit entsprechendem Know-how kann man zumindest Fehler bei der Auslegung vermeiden und damit sehr dicht an die physikalische Grenze herangehen. Ohne dieses Wissen würden viele vermeidbare Fehler machen, ohne die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten voll auszureizen. Spannend ist in diesem Zusammenhang: Wie geht der Vergleich zwischen Röhren und Transistoren bezüglich Rauschen aus? Die Antwort schon kurz vorweg: nicht eindeutig. Es hängt sehr stark von der Schaltungsdimensionierung ab. Mehr darüber später. Über das Thema Rauschen sind schon zahllose Forschungsarbeiten publiziert worden. Wollte man alle zu einem Gesamtwerk zusammenfassen, was wegen der vielen Widersprüche gar nicht einfach ist, ergäbe sich ein Buch mittlerer Stärke. Wer sich tiefer mit der Materie beschäftigt, der wird sehr schnell von einem Berg von höherer Mathematik erschlagen. Das ist unvermeidlich, denn wenn man der Sache wissenschaftlich auf den Grund gehen will, dann kommt man an den Formeln nicht vorbei. In diesem Heft ist aber mehr die Praxis gefragt, deshalb sind hier die Formeln auf das

absolute Minimum beschränkt. Ganz ohne Theorie geht es aber doch nicht. Soll es zwischen wissenschaftlicher Exaktheit und konkretem Anwendernutzen einen sinnvollen Kompromiss geben, erfordert dies einige Vereinfachungen. Die Theoretiker mögen es verzeihen. Die Praxis ist dann sowieso wieder weitgehend anders, als es die Theorie erklären kann. Bei näherer Betrachtung zeigt sich: Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Arten von Rauschen, die sich in ihrer Wirkung alle addieren. Zur Bekämpfung muss man jede für sich angehen. In diesem Artikel geht es allein um das Rauschen von elektronischen Schaltungen, speziell von Audioverstärkern. Das Rauschen von Tonspeichern wie Schallplatten und Magnetbändern sowie solches, das über die Antenne in einen Empfänger hereinkommt, ist nicht das Thema dieses Artikels.

#### Thermisches Widerstandsrauschen

Die stärkste Komponente ist in den meisten Fällen das thermische Rauschen, auch Johnson- oder Nyquist-Rauschen genannt, zwei Forscher, die das vor Jahrzehnten gründlich untersucht haben. Doch wie entsteht das thermische Rauschen? In einem Leiter mit endlichem Widerstand, der zunächst noch nicht von Strom durchflossen ist, befinden sich zahllose freie Elektronen, weshalb man auch von einem "Elektronengas" spricht. Sie bewegen sich aufgrund der Brownschen Molekularbewegung unregelmäßig hin und her, wie ein Schwarm Mücken. Kommen sie an eine Außenfläche, dann werden sie wegen der elektrischen Anziehung durch die positiv geladenen Atomkerne sehr bald am Austreten gehindert, sofern der Leiter nicht gerade glüht, wie z.B. bei Röhrenkathoden. Im zeitlichen Mittel stoßen an beiden Enden des Leiters gleich viele Elektronen an die Grenzfläche. Für kurze Momente können es aber mal an einen Ende ein paar mehr sein als am anderen. Dadurch entsteht zwischen beiden Enden momentan eine winzige elektrische Spannungs-

# Rauschen



differenz, mal mit positivem und mal mit negativem Vorzeichen. Sie ist stochastisch, d.h. regellos, nicht vorhersagbar, sondern nur mit statistischen Rechenmethoden beschreibbar. Ihr zeitlicher Mittelwert ist natürlich Null. Die in der Statistik bewährte Methode ist es, die Abweichung des Momentanwertes vom Mittelwert zu guadrieren, zu mitteln und daraus die Wurzel zu ziehen. Diese mittlere quadratische Abweichung ist der Effektivwert der Rauschspannung, das hier entscheidende Maß. Der Scheitelwert liegt in der Größenordnung des Siebenfachen des Effektivwerts. Das thermische Rauschen eines Widerstandes hat eine ganz bestimmte Leistung, die nur von seiner absoluten Temperatur, gemessen in Kelvin über dem absoluten Nullpunkt von -273 °C, und von der erfassten Frequenzbandbreite abhängt, nicht aber vom Widerstandswert. Es gilt hier die Formel:  $P_R = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f$  mit der Boltzmann-Konstante k = 1,38·10-23 Ws/K. Bei unendlich großer Bandbreite müsste demnach auch die Rauschleistung unendlich sein, was natürlich nicht sein kann. Irgendwo bei extrem hohen Frequenzen nimmt die Leistung bei weiterer Steigerung der Bandbreite nicht mehr zu. Aber in dem in der Elektronik interessierenden Bereich, heute bis größenordnungsmäßig 100 GHz, merkt man davon noch nichts. Die Gültigkeit der Formel hört erst bei einigen THz auf. Bis dahin ist in jedem gleich großen Frequenzintervall die gleiche Rauschleistung enthalten. Dabei ist es egal, von wo bis wo dieses reicht. Zwischen 1 Hz und 64 Hz, was musikalisch sechs Oktaven entspricht, steckt also genauso viel drin wie zwischen 1000 Hz und 1063 Hz, musikalisch etwa ein Halbton. Derartiges Rauschen nennt man - in Anlehnung an die Optik, wo weißes Licht alle Spektralfarben gleichmäßig stark enthält – "weißes Rauschen". Ein solches ist das thermische Widerstandsrauschen. Der Höreindruck ist sehr scharf, d.h. höhenreich. Es gibt auch andere Rauscharten mit ungleichmäßig verteiltem Frequenzspektrum, so das "1/f-Rauschen"; mehr darüber später. Die Rauschleistung selbst hängt, wie bereits erwähnt nicht vom Widerstand des betrachteten

Leiters ab, wohl aber die zwischen seinen Anschlüssen herrschende Rauschspannung, die sich mi folgender Formel beschreiben lässt:

$$U_R{}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f$$
 , daraus folgt  $U_R = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$ 

Ein konkretes Beispiel: Die Rauschspannung eines dynamischem Mikrofons mit 200  $\Omega$  Spulenwiderstand beträgt bei T = 300 K = 27° C und 20 kHz Bandbreite 0,257  $\mu$ V, entsprechend -131 dBm. Schließt man den rauschenden Widerstand kurz, dann fließt außen herum ein Rauschstrom

von 
$$I_R{}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R}$$
, daraus folgt  $I_R = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R}}$ .

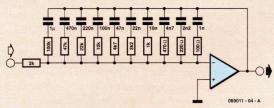
Die Rauschspannung ist demnach proportional, der Rauschstrom umaekehrt proportional zur Wurzel aus dem Widerstand. Beide sind außerdem proportional zur Wurzel aus der Messbandbreite und zur Wurzel aus der absoluten Temperatur in Kelvin. Wenn man das thermische Rauschen eines gegebenen Widerstandes bei konstanter Bandbreite vermindern will, dann muss man seine Temperatur absenken. Bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff (Siedetemperatur 77 K) sinkt die Rauschleistung im Vergleich zur Raumtemperatur etwa auf ein Viertel, die Rauschspannung etwa auf die Hälfte. Diese Methode wird in der wissenschaftlichen Forschung angewandt, in der realen Audiotechnik ist sie leider nicht praktikabel. Die genannten Formeln gelten nur für metallische Leiter sowie für solche Teile von Halbleiterbauelementen, die nicht von Sperrschichten durchzogen sind. Bei Kohleschichtwiderständen kommt noch ein anderer Effekt hinzu, der zu einem stärkeren Rauschen führt, doch davon später. Ideale Kondensatoren sind prinzipiell rauschfrei, schlechte, vor allem gealterte Elkos, können unter Umständen Prasselstörungen erzeugen. Bei komplexen Impedanzen kommt es auf den Betrag an. Hier bleibt das Rauschen nicht "weiß", sondern es ändert sich das Spektrum. In der Realität kommen häufig Parallelschaltungen von Widerständen (Signalquelle) und Kondensatoren (Zuleitungskabel, Eingangskapazität des aktiven Bauelements) vor. In diesem Fall ergibt sich ein weißes Rauschen bis zur Grenzfrequenz

$$f = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$
 , darüber geht es in ein so genanntes

"rotes Rauschen" über. Dieses hört sich weit weniger scharf an. Die parallel zu einem Widerstand liegende Kapazität ist in der Praxis nicht auf Null zu kriegen. Der Widerstand muss sorgfältig abgeschirmt sein, damit es nicht brummt, dazu hat das verstärkende Bauelement immer eine gewisse Eingangskapazität, die bei jedem Typ verschieden ist.

## "Farbiges" Rauschen

"Weißes" (thermisches oder Schrot-) Rauschen enthält in gleichen absoluten Frequenzintervallen die gleiche Leistung. In der Audio-Messtechnik benötigt man als Testsignal vielfach ein Rauschen, das in gleichen musikalischen, d.h. relativen Intervallen (Oktave, Terz, o.ä.) die gleiche Leistung enthält. Der Höreindruck ist wesentlich dunkler. Um es zu erhalten, muss man weißes Rauschen filtern. Die Leistung muss umgekehrt proportional zur Frequenz abfallen (1/f-Rauschen), die Spannung demnach umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Frequenz, gleichbedeutend mit 3 dB Abfall pro Oktave. Dies ist mit einem einfachen RC-Filter nicht exakt möglich, es gibt nur mehr oder weniger gute Annäherungen dafür. Einen Vorschlag zeigt die Schaltung im Bild. Das Ergebnis wird in Anlehnung an die Optik "rosa Rauschen" genannt, weil hier die tiefen Frequenzen analog zu größeren Wellenlängen des roten Lichts etwas stärker repräsentiert sind als die hohen, die den kleineren Wellenlängen von blauem Licht entsprechen. Seltener verwendet werden die Begriffe "rotes Rauschen", womit ein Abfall der Spannung proportional zur Frequenz mit 6 dB pro Oktave gemeint ist. "Blaues Rauschen" hat einen Anstieg proportional zur Frequenz um 6 dB pro Oktave, und "hellblaues Rauschen" einen Anstieg proportional zur Wurzel aus der Frequenz, was 3 dB pro Oktave entspricht.

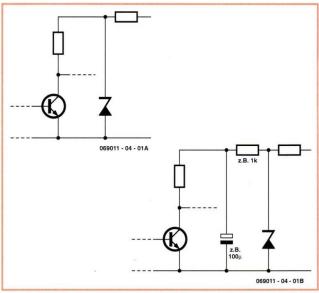


Schaltung zur Erzeugung von Rosa Rauschen aus Weißem Rauschen, Abfall der Verstärkung um 3 dB/Oktave.

#### Rauschen bei Stromfluss

In aktiven elektronischen Bauelementen wie Transistoren oder Röhren treten, sobald Strom fließt, noch mehrere weitere Arten von Rauschen auf, die sich bei der Signalverstärkung zum thermischen Rauschen addieren. Was man letztlich aus dem Lautsprecher hört, ist eine Überlagerung von allen Rauscharten. Der Rauschabstand, das ist das Verhältnis von Nutzleistung zu Rauschleistung, wird dadurch im Vergleich zur Signalquelle schlechter. In Verstärkern mit mehreren Stufen trägt die Eingangsstufe weitaus am meisten zum zusätzlichen Rauschen bei, weil hier der geringste Signalpegel herrscht. In allen nachfolgenden Stufen ist dieser sehr viel höher, der Signal-Rausch-Abstand dadurch besser, so dass deren Beitrag meist vernachlässigt werden kann. Wenn die Signale von mehreren voneinander unabhängigen, d.h. nicht korrelierten Rauschquellen zusammengemischt werden, dann addieren sich die jeweiligen

Leistungen linear. Wenn man in Spannungen rechnet, dann müssen deren Werte "geometrisch" addiert werden nach der Formel  $U_{Rges} = \sqrt{U_{RI}^2 + U_{R2}^2 + U_{R3}^2 + \dots}$ Wie viel eine Verstärkerstufe dem Signal an Rauschen hinzufügt, wird durch den Rauschfaktor F beschrieben, der das Verhältnis des Signal/Rausch-Abstands am Verstärkereingang zum Signal/Rausch-Abstand am Ausgang darstellt. Die in der Praxis häufiger verwendete Rauschzahl (noise figure) F oder F\* ist der in dB angegebene Logarithmus des Rauschfaktors  $F = 10 \cdot \log F$  . Ideal wäre  $F^* = 0$  dB aber das ist in der Praxis nicht zu schaffen. Die zweite wichtige Rauschart ist das "Schrotrauschen", auch "Schottky-Rauschen" genannt, englisch "shot noise". Ursache ist die Quantelung der Elementarladung, durch die der Stromfluss "körnig" wird. Immer wenn diskrete Ladungsträger – Elektronen oder Löcher, die ja letztendlich auch Elektronen sind, nur anders verteilt - eine Potenzialschwelle überwinden und das mit ihrer kinetischen Energie erreichen müssen, dann kommt es durch den ungleichmäßigen Übertritt zu regellosen Schwankungen des Stromflusses. Weil die Energie wegen der Brownschen Molekularbewegung statistisch verteilt ist, können nur diejenigen Ladungsträger die Schwelle überwinden, deren Energie dafür ausreicht. Schrotrauschen entsteht in Dioden und Transistoren und auch in Röhren beim Austritt der Elektronen aus der Kathode. Es ist temperaturunabhängig. Vom Spektrum her ist es ein weißes Rauschen. Die Stärke hängt von der Größe des fließenden Stromes ab:  $I_n = \sqrt{2 \cdot Q \cdot I_b \cdot \Delta f}$ Q = Elektronenladung,  $\Delta f$  = Bandbreite,  $I_b$  = Biasstrom An dieser Stelle schon Tipp 1 zum Schaltungsentwurf: Wird die Versorgungsspannung einer Vorstufe durch eine Z-Diode stabilisiert, dann kann dadurch Rauschen ins Signal kommen, weil in der im Durchbruch betriebenen Sperrschicht Schrotrauschen erzeugt wird. Das muss



mit einem RC-Glied weggefiltert werden (Bild 1a/b).

Bild 1. Z-Dioden erzeugen Schrotrauschen, das voll ins Signal gehen kann: a) ungefiltert, schlecht und b) gefiltert, gut.

Eine Art von Schrotrauschen tritt auch in Kohleschichtwiderständen auf. Die Schicht ist aus kleinen Partikeln zusammengesetzt, zwischen denen beim Stromfluss winzige Potenzialunterschiede überwunden werden müssen. Die Stärke des dadurch verursachten Rauschens hängt stark von der Herstellungstechnologie und von der Qualität der Schicht ab. Tipp 2: In hochwertigen Verstärkerschaltungen sollten nach Möglichkeit nur Metallschichtwiderstände verwendet werden. Der rauschmäßige Unterschied zwischen beiden Typen ist umso größer, je höher der Wert ist. Bei z.B. 100 Ohm dürfte es noch ziemlich egal sein, welche Bauart man nimmt, im höheren Kiloohm- oder Megohm-Bereich aber mit Sicherheit nicht mehr. Die dritte wichtige Rauschart ist das "Funkelrauschen" (englisch "flicker noise"). Es macht sich vor allem im Bereich tiefer Frequenzen bemerkbar. Es ist kein weißes Rauschen, sondern seine Leistung fällt umgekehrt proportional zur Frequenz ab, weshalb man auch von "1/f-Rauschen" spricht (ganz streng gilt dieses Gesetz nicht immer). Die Rauschspannung sinkt umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Frequenz um 3 dB pro Oktave, es ist also ein "rosa Rauschen". Die Intensität hängt entscheidend vom Herstellungsprozess des Bauelements ab. Die tiefer liegenden Ursachen sind dabei nicht vollständig geklärt, möglicherweise sind es Unregelmäßigkeiten im Kristallgitter, die als Fallen für Ladungsträger wirken. Während die Eckfrequenz bei älteren Transistoren typisch bei 100 Hz lag, konnte sie bei modernen Exemplaren durch geeignete Bearbeitungsverfahren deutlich gesenkt werden, so dass diese Art von Rauschen zumindest in Tonfrequenzverstärken heute praktisch keine große Rolle mehr spielt. Ein anderes Kapitel sind Gleichspannungsverstärker für Messzwecke, die durch diese Rauschart sehr wohl gestört werden können. Auch Röhren zeigen Funkelrauschen. Wie das Schrotrauschen entsteht es durch Effekte in der Kathode, wo die Emission einzelner Gebiete infolge spontaner Umkristallisationen schwankt. Neben diesen drei Hauptrauscharten gibt es noch einige weitere, die aber nur eine untergeordnete Rolle spielen und über die auch nur wenig brauchbare Information zu finden ist. So z.B. das "Popcorn-Rauschen" (burst noise, Prasseln) am unteren Ende des Spektrums (unter 100 Hz). Es wird hervorgerufen durch extrem kurzzeitige zufällige Änderungen der Stromverstärkung, die sich in Knackgeräuschen äußern, daher der Name.

#### **Praktisches Rauschmodell**

Jetzt soll es mehr zur Praxis gehen. Auch wenn dieses Heft in erster Linie die Röhren zum Thema hat, so ist es sinnvoll, Transistoren hier gleich mit zu betrachten. Bezüglich des Rauschens bestehen da allerhand Verwandtschaften. Sie sollen als erstes behandelt werden,

Anzeige —

weil die einschlägige Literatur sehr viel besser und dazu auch leichter beschaffbar ist. Dabei spielt es keine Rolle, ob man Einzeltransistoren oder solche in integrierten Schaltungen betrachtet, die Physik ist dieselbe. Die meisten und besten Publikationen untersuchen das Rauschen von Operationsverstärkern. Für diese wurde das folgende Modell entwickelt, das sich als sehr praxistauglich erwiesen hat [4]. Man kann die Modelle dann auf Einzeltransistoren und auch auf Röhren rückwärts übertragen. An den Eingängen eines als idealen, rauschfreien Operationsverstärkers werden mehrere unkorrelierte Rauschquellen angenommen, in denen die zuvor genannten Rauscharten summiert sind: eine Rauschspannungsquelle zwischen den beiden Eingängen und eine Rauschstromquelle zwischen jedem Eingang und Masse (Bild 2).

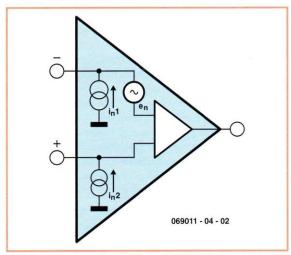


Bild 2. Rauschmodell eines Operationsverstärkers.

Die Rauschspannungsquelle ist unabhängig von den Eigenschaften der Signalquelle stets vorhanden und nicht beeinflussbar. Der Rauschstrom dagegen fließt durch alle Schaltungsteile am Eingang, die aus Signalquelle und eventuell angeschalteten Widerständen bestehen, und erzeugt eine zusätzliche Rauschspannung, die proportional zu der insgesamt am Eingang liegenden Impedanz ist. In der häufig verwendeten Schaltung nach Bild 3 hängt sie beim nichtinvertierenden Eingang somit vom Innenwiderstand der Signalquelle ab. Die Widerstände im Gegenkopplungs-Spannungsteiler erscheinen wechselstrommäßig als Parallelschaltung. Daraus ergibt sich Tipp 3: In Schaltungen in der Art von Bild 3 sollte man die Widerstände im Gegenkopplungszweig nach Möglichkeit sehr viel kleiner auslegen als den Innenwiderstand der Signalquelle; in diesem Fall kann man den Beitrag des invertierenden Eingangs zum Gesamtrauschen ohne großen Fehler vernachlässigen. Die Widerstände müssen so dimensioniert sein, dass die Ausgangsstrombegrenzung des OPs gerade noch nicht anspricht. Man muss auch die angeschlossene Last berücksichtigen, die zu treiben ist. Wie weit man mit der Gesamtlast heruntergehen kann, steht in den Datenblättern der jeweiligen OPs. Beide Rauschkomponenten addieren sich am Eingang des Verstärkers geometrisch und machen den Anteil des Verstärkers am Gesamtrauschen aus. Dazu kommt

natürlich noch das sowieso immer vorhandene Widerstandsrauschen der Quelle, das mit dem Verstärker nichts zu tun hat, aber von ihm mitverstärkt wird. Tipp 4: Wenn ein invertierender Verstärker mit hohem Eingangswiderstand von z.B. 1 M $\Omega$  benötigt wird, dann sollte man ihn nicht so auslegen wie in Bild 4, weil hier die beiden 1-M $\Omega$ -Widerstände dem Signal ein 500 k $\Omega$ entsprechendes thermisches Rauschen hinzufügen. Es ist also besser zuerst einen Impedanzwandler vorzuschalten und dann einen zweiten OP mit niedrigerer Widerstandsbeschaltung z.B. im 10-kΩ-Bereich.

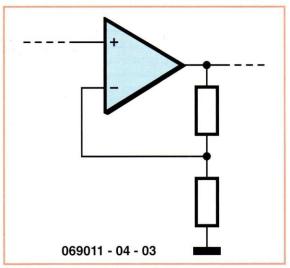


Bild 3. Übliche nichtinvertierende Schaltung mit einem Operationsverstärker.

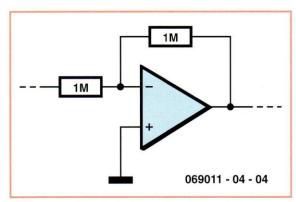


Bild 4. Für rauscharme Schaltungen nicht zu empfehlen: invertierender Impedanzwandler mit hohen Widerständen. So entsteht zusätzlich das thermische Rauschen eines Widerstandes von

Das Verhalten eines rauschenden (Operations-) Verstärkers wird am besten deutlich, wenn man sein Gesamtrauschen in Abhängigkeit vom Quellwiderstand in einem doppelt logarithmischen Diagramm gemäß Bild 5 aufträgt. Man erhält dann eine Kurve, die sich aus drei Teilen zusammensetzt und an die sich Geraden als Tangenten anlegen lassen: Abschnitt A: Bei sehr kleinen Quellwiderständen dominiert das Spannungsrauschen. Das Gesamtrauschen ist hier nicht vom Quellwiderstand abhängig. Es ist bei jedem OP-Typ unterschiedlich, der Wert steht im Datenblatt. Will man es niedrig halten, dann muss man einen Typ mit niedriger Rauschspannungsdichte  $e_n (nV / \sqrt{Hz})$ auswählen. Dies ist der waagerechte Teil der Kurve links.

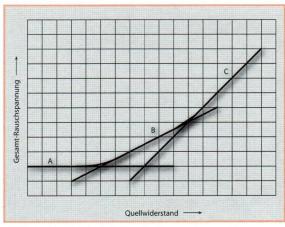


Bild 5. Zusammenhang zwischen Quellwiderstand und Gesamtrauschspannung bei Operationsverstärkern (doppelt logarithmische Darstellung).

Abschnitt B: Mit steigendem Innenwiderstand der Signalquelle überwiegt hier deren thermisches Rauschen. Es steigt proportional zur Wurzel aus dem Innenwiderstand und hängt nicht vom Verstärkertyp ab, d.h. es ist auch bei Röhren das gleiche. Es ist nur absenkbar durch Verringerung der Bandbreite oder der Temperatur der Quelle. Dies ist der mittlere Teil der Kurve, angenähert durch eine Gerade mit der Steigung von 0,5. Abschnitt C: Bei höchsten Quellwiderständen trägt das Stromrauschen des Verstärkers den größten Teil zum Gesamtrauschen bei. Dieses ist direkt proportional zum Quellwiderstand. Hier spielt der OP-Typ wieder die entscheidende Rolle. Für niedriges Gesamtrauschen muss man hier einen Typ mit möglichst niedriger Rauschstromdichte i<sub>n</sub> ( $fA/\sqrt{Hz}$ ) (fA = Femtoampere) auswählen. Wer dies nicht weiß und die Entscheidung nur aufgrund der Rauschspannungsdichte trifft, kann fatale Ergebnisse erhalten. Im Diagramm ist das der rechte Teil der Kurve, angenähert durch eine Gerade mit der Steigung 1.

Zwischen den drei Teilbereichen sind die Übergänge kontinuierlich. Es gibt hier zwei Eckfrequenzen, bei denen die sich überlagernden Anteile gerade gleich stark sind. ldeal wäre ein Verstärkertyp, bei dem Rauschspannung und Rauschstrom beide gleichzeitig extrem niedrig sind, damit Abschnitt B der Kurve so groß wie möglich wird. Leider ist das technisch nicht zu schaffen. Im Allgemeinen ist es so, dass ein Typ mit niedriger Rauschspannung einen relativ hohen Rauschstrom hat und umgekehrt. Die Messgröße, die in der Praxis interessiert, ist die Rauschzahl. In Bild 5 ist das der Abstand der Kurve von der Geraden B, die das thermische Rauschen der Quelle repräsentiert. In Bild 6 [4] ist das thermische Rauschen davon subtrahiert, so dass nur der vom Verstärker selbst hinzugefügte Rauschanteil übrig bleibt. Die Darstellung ist auch wieder im doppeltlogarithmischen Maßstab. Wie man sieht, hat diese Kurve bei einem bestimmten Quellwiderstand ihr Minimum. Dieses ist genau der Quotient aus Rauschspannung und Rauschstrom, beide Angaben finden sich in den Datenblättern; er liegt beim Schnittpunkt der Geraden A und C. Bei jedem der wohl tausenden von Operationsverstärkertypen, die auf dem Markt sind, liegt dieser optimale Quellwiderstand woanders.

Tipp 5: Um das Rauschen zu minimieren, muss man also den Quellwiderstand kennen und den OP-Typ entsprechend auswählen. Hilfreich ist dabei z.B. die Darstellung von Bild 7 (Linear Technology). Die schräge Gerade repräsentiert das thermische Rauschen, die horizontale Koordinate eines Punktes ist der optimale Quellwiderstand des Typs, die vertikale zeigt an, um wie viel das Eigenrauschen hier unter dem thermischen Rauschen der Quelle liegt.

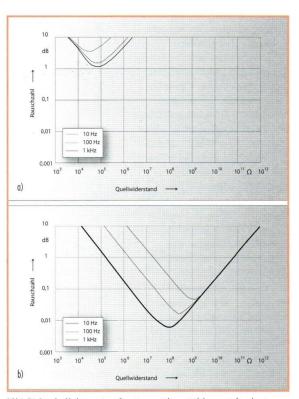


Bild 6. Die Rauschzahl, das von einem Operationsverstärker zusätzlich erzeugte Rauschen in Abhängigkeit vom Quellwiderstand, bei verschiedenen Frequenzen [4]
a) 0P-07 und
b) LMC662

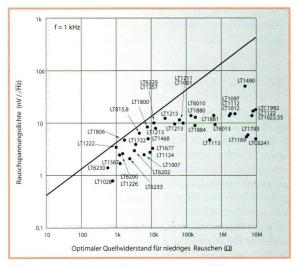


Bild 7. Optimaler Quellwiderstand und Beitrag zum Rauschen bei verschiedenen OPs (Linear Technology).

Ein praktischer Vergleich: Die Typen OP-07 und LMC662 [4]. Bei 10 kΩ Quellwiderstand hat der OP-07 die kleinere Rauschzahl, bei 10 MΩ der LMC662, siehe Bild 6. Kaum ein Hersteller von Operationsverstärkern gibt die Rauschzahlkurven seiner Produkte in Abhängigkeit vom Quellwiderstand an. Diese lassen sich aber aus en und in ungefähr abschätzen. Was ist nun der entscheidende Unterschied zwischen Einzeltransistoren und in Operationsoder anderen Verstärkern integrierten Transistoren? Die Physik ist, wie bereits erwähnt, dieselbe. Verschieden sind die Dimensionen und die Ströme. Bei integrierten Transistoren sind diese intern festgelegt; leider weiß man nur in den seltensten Fällen, auf welchen Wert. In diskret aufgebauten Schaltungen werden sie dagegen durch die äußeren Widerstände bestimmt. Hier hat der Schaltungsentwickler Freiheit über bis zu vier Größenordnungen hinweg. Einzeltransistoren zeigen bei ihrer Rauschzahl im Prinzip das gleiche Verhalten wie in Bild 5 und 6. Allerdings

hängt die Lage ihres Minimums der Kurve ganz entscheidend davon ab, mit welchem Strom sie betrieben werden. Die Kurven sind den Datenblättern zu entnehmen. Hier kann man den Strom über die äußere Beschaltung in weiten Grenzen variieren und, dies ist Tipp 6, je nach Quellwiderstand geeignet anpassen.

Mit zu den rauschärmsten Transistoren auf dem Markt zählen die folgenden Typen: BC413 ≈ BC549 ≈ BC849

BC415 ≈ BC559 ≈ BC859 BC414 ≈ BC550 ≈ BC850 BC416 ≈ BC560 ≈ BC860

Nur geringfügig mehr rauschen die Klassiker im Metallgehäuse BC107, BC108, BC109 und deren Abkömmlinge, sie sind heute immer noch recht gut zu gebrauchen. Erheblich schlechter sind aber Germaniumtransistoren. Sie haben in hochwertigen Verstärkern nichts zu suchen. Irgendwelche Nostalgiegefühle sind hier gründlich fehl am Platz. Zwischen NPN- und PNP-Transistoren ist rauschmäßig kein Unterschied zu erkennen. Wie die Rauschzahl typischerweise vom Kollektorstrom und vom Quellwiderstand abhängt, zeigt Bild 8 für den BC550. Bei einem bestimmten Strom hat sie demnach ein Minimum, bei kleineren und größeren Strömen ist sie höher. Der Strom für minimales Rauschen hängt

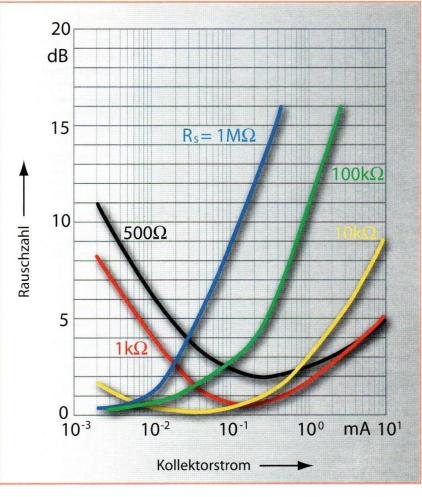


Bild 8. Rauschkurven des BC550 (bei 10 kHz, wo der Beitrag des 1/f-Rauschens verschwindend ist).

vom Quellwiderstand ab. Wer eine Verstärkereingangsstufe entwickelt, muss also wissen, für welche Art von Signalquellen sie gedacht sein soll. Die "eierlegende Wollmilchsau" gibt es leider nicht. Zu den niederohmigen Quellen gehören z.B. dynamische Mikrofone (typisch 200 Ω) und Moving-Coil-Tonabnehmer. Hierfür erzielt man mit den genannten Transistoren den höchsten Rauschabstand bei einem Kollektorstrom von etwa 200 µA. Sehr hochohmige Quellen sind z.B. die uralten Kristalltonabnehmer sowie piezoelektrische und magnetische Tonabnehmer für Musikinstrumente. Hier legt man den Kollektorstrom am besten in den unteren µA-Bereich. So lassen sich Rauschzahlen unter 0,2 dB erreichen, damit ist der Abstand von der physikalischen Grenze nur noch sehr gering. Im Rauschkurvenbild des BC550 erkennt man, dass man mit zunehmendem Quellwiderstand mit dem Kollektorstrom immer weiter heruntergehen muss, um das Rauschminimum zu erreichen. Das bringt aber andere Komplikationen mit sich. Je kleiner der Strom, desto geringer wird erstens die Verstärkung und zweitens die Anstiegsgeschwindigkeit der Stufe. Parasitäre Kapazitäten werden dann immer langsamer umgeladen, die nutzbare Bandbreite nimmt ab. Irgendwo hört ein sinnvoller Betrieb auf, weshalb das Diagramm auch unter 2 µA nicht mehr weitergeführt worden ist. Die optimale Auslegung der Schaltung auf Rauschmini-

mum ohne Verlust an Bandbreite erfordert eine sorgfältige gegenseitige Abstimmung vieler Parameter. In den Datenblättern findet man häufig mehrere Rauschdiagramme, die bei verschiedenen Frequenzen ermittelt wurden. Bei tiefen Frequenzen rauscht es mehr, siehe auch Bild 6a/b. Die Ursache ist das 1/f-Rauschen. Für Audiozwecke sind Rauschkurven bei z.B. 10 Hz uninteressant, hier braucht man nur diejenigen im kHz-Bereich zu betrachten. Jetzt kommen wir endlich zum Rauschen von Röhren. Hierüber ist vor vielen Jahrzehnten viel publiziert worden, heute sind diese Arbeiten nur noch schwer zu finden. Die wohl besten Informationen, allerdings gespickt mit Mathematik, finden sich in den legendären "Telefunken-Laborbüchern" der 1960er Jahre [5]. Auch hier treten die Begriffe Schrotrauschen und 1/f-Rauschen auf, die Eckfrequenz von letzterem liegt typischerweise bei etwa 10 kHz. Das Modell mit unabhängigen Quellen von Spannungs- und Stromrauschen ist auch hier gut anwendbar, letztlich ergibt sich ein ähnliches Verhalten wie in Bild 5. So aussagekräftige Diagramme wie in Bild 7 oder 8 sind aber nirgends zu finden. Bei Röhren hat man wenig Freiheit bei der Wahl des Arbeitspunkts. Strom und Arbeitswiderstand müssen bestimmte Werte haben, damit eine gewisse Verstärkung erreicht wird. Bei falschen gewählten Werten fällt sie stark ab. Transistoren sind in dieser Hinsicht sehr viel flexibler. Bei einzelnen kann man die externen Widerstände in weiten Grenzen variieren, bei OPs hat man eine breite Auswahl verschiedener Typen.

#### Der Versuchsaufbau

Genug der Theorie. Welcher Verstärker wirklich am wenigsten rauscht, kann man letztlich nur mittels Messgerät und Hörtest feststellen. Dazu wurde vom Autor ein Testaufbau entwickelt, in dem zehn verschiedene Verstärker mit zwölf verschiedenen Quellwiderständen kombiniert werden können (Bild 9). Es handelt sich dabei um folgende Schaltungen:

- zwei mit Einzeltransistoren (in der Eingangs-Differenzstufe zwei bipolare oder JFETs, am Ausgang ein PNP-Transistor, Bild 10), jeweils mit fünf verschieden Kollektor- bzw.- Drainströmen betreibbar (Drehschalter mit fünf Stufen),
- sechs verschiedene Operationsverstärker: mit Fassungen für Standard-Anschlussschema, je zwei für Einfach-, Zweifach- und Vierfachtypen

 zwei Röhren (Trioden, hier beschränkt auf den Typ ECC83/12AX7).

Alle Stufen wurden auf die gleiche Verstärkung und den gleichen Eingangswiderstand von 10 MOhm ausgelegt. Um Brummstörungen von außen abzuschirmen, sitzen alle in einem Metallgehäuse, alle Netzteile befinden sich extern in größerer Entfernung. Es zeigte sich als erforderlich, auch im Inneren die Signalleitungen abzuschirmen, um wildes Schwingen zu verhindern.

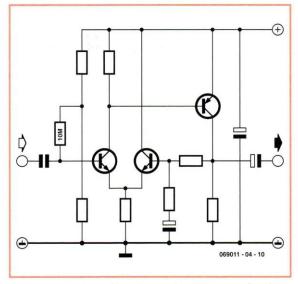
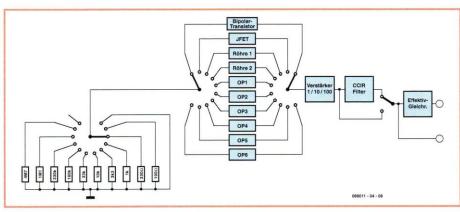


Bild 10. Verwendeter Schaltungstyp für Verstärker mit Einzeltransistoren. Hier gezeigt für BipolarTypen. Für JFETs am Eingang entsprechend, ebenfalls mit BC560 am Ausgang. Der gemeinsame Emitter-/Source-Widerstand ist umschaltbar in Stufen 10 k $\Omega$ , 33 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 330 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ .

Mit dem einen Drehschalter wird der zu untersuchende Verstärker ausgewählt, mit dem anderen der Quellwiderstand. Die daran sitzenden Werte betragen: 0  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 330  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 3,3 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 33 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 330 k $\Omega$ , 1,1 M $\Omega$ , 4,7 M $\Omega$  (alle Metallschicht), unendlich. In den letzteren drei Schaltstellungen "sieht" der Verstärkereingang dann etwa 1 M $\Omega$ , 3,3 M $\Omega$  und 10 M $\Omega$ . Der jeweils ausgewählte Ausgang gelangt auf einen weiteren, vorher als rauscharm nachgewiesenen Vorverstärker mit den Verstärkungsfaktoren 1-, 10- und 100-fach. Dessen Ausgang führt über ein zu- oder

abschaltbares Rauschbewertungsfilter (CCIR 468-2) zu einem Effektivwertspannungsmesser und an einen Audio-Ausgang, an den eine Leistungsendstufe mit Lautsprecher angeschlossen wird. Im Test wurde zwischen den verschiedenen Verstärkern umgeschaltet und dann gemessen und gehorcht.



 $Bild\ 9.\ Blockschaltung\ des\ Rauschmessplatzes.$ 

### Unübersichtliche Ergebnisse

Zunächst einmal lässt sich mit der Apparatur sehr deutlich zeigen, wie das Gesamtrauschen grundsätzlich mit steigendem Quellwiderstand zunimmt. Das ist im Wesentlichen das thermische Widerstandsrauschen, das mit dem Verstärker selbst nichts zu tun hat. Wie viel dieser dann noch hinzufügt, also seine Rauschzahl, ist bei jedem Typ unterschiedlich und ebenfalls vom Quellwiderstand abhängig. Bei einem bestimmten Wert liegt ein Minimum, darüber und darunter ist es mehr (siehe Bild 6). Bei Operationsverstärkern ist der sinnvoll nutzbare Bereich enger eingegrenzt als bei Einzeltransistoren, weil der Kollektor- bzw. Drainstrom der Eingangsstufe intern festgelegt ist. Bei Röhren ist der Bereich sehr breit, so dass der vergleichsweise enge Spielraum bei der Beschaltung nicht so sehr ins Gewicht fällt. Einige näher untersuchte Beispiele: Um die Unterschiede möglichst gut herauszustellen, wurden aus Bild 7 zwei Extreme ausgewählt. Der LT1028 (ganz links) hat die außergewöhnlich niedrige Rauschspannungsdichte von nur  $0.85V/\sqrt{Hz}$ , dafür aber mit  $1pA/\sqrt{Hz}$ eine relativ hohe Rauschstromdichte. Dadurch ist er bei niedrigsten Quellwiderständen exzellent ruhig. Somit eignet er sich bestens für dynamische Mikrofone mit einem Quellwiderstand von 200 Ω. Bei hohen Quellwiderständen von 1 M $\Omega$  oder mehr wird er dagegen zum schlimmsten Rauschgenerator. Ganz auf der rechten Seite liegt z.B. der LT1793. Seine Rauschspannungsdichte ist mit  $6nV/\sqrt{Hz}$  relativ hoch, dafür ist seine Rauschstromdichte mit  $0.8 fA/\sqrt{Hz}$  um drei Größenordnungen kleiner als die des LT1028. Er ist für sehr hohe Quellwiderstände in der Größenordnung von einigen Megaohm gedacht und z.B. für Piezotonabnehmer geeignet, dafür aber weniger für dynamische Mikrofone tauglich. Was sonst noch an OPs auf dem Markt ist, liegt meist zwischen diesen beiden Typen. Erreicht wird dieses unterschiedliche Verhalten vor allem durch die Auslegung der Eingangsstufe. Bei niedrigen Quellwiderständen sind Bipolartransistoren am günstigsten, wobei gemäß Bild 8 der Strom optimal zu wählen ist. Bei hohen Quellwiderständen sind JFETs deutlich rauschärmer. Hier hängt die Rauschzahl aber kaum vom Betriebsstrom ab, so dass man bei der Schaltungsdimensionierung großen Freiraum hat. Im Bereich mittlerer Quellwiderstände zwischen etwa  $10~\text{k}\Omega$  und  $100~\text{k}\Omega$ ist die Wahl nicht kritisch, weil hier sowieso das thermische Rauschen dominiert, siehe Bild 5 Abschnitt B. Was jetzt im Zusammenhang mit den Röhren interessiert: Wie sieht der Vergleich zu den Transistoren aus? Das Ergebnis ganz überschlägig: Bei sehr niedrigen Quellwiderständen bis etwa 200  $\Omega$  ist der LT1028 unschlagbar am besten. Röhre und Bipolartransistor mit relativ hoch gewähltem Kollektorstrom rauschen mehr, beide etwa gleich stark, der JFET rauscht noch deutlich stärker und ist hier nicht zu gebrauchen. Mit steigendem Quellwiderstand schrumpft der Vorsprung des LT1028 schnell, über 1 k $\Omega$  geht er verloren. Hier beginnt der sinnvolle Einsatz von Röhren oder Bipolartransistoren. Zwischen beiden besteht praktisch kein Unterschied, weil das Rauschen in diesem Bereich hauptsächlich aus der Quelle kommt. JFETs sind hier immer noch schlechter.

Das bleibt so bis in den Bereich von einigen  $100 \text{ k}\Omega$ . Dann überholt der JFET allmählich den jetzt auf minimalen Kollektorstrom einzustellenden Bipolartransistor. Bei etwa 1 M $\Omega$  liegen JFET und Röhre etwa gleich, der Bipolartransistor ist schlechter. Bei noch höheren Quellwiderständen, die mit der beschriebenen Apparatur bis  $10 \text{ M}\Omega$  untersucht wurden, ist die Röhre allen anderen überlegen, sie rauscht noch weniger als der JFET, wenn auch nicht gravierend. Der Unterschied ist am besten hörbar, wenn man das Rauschsignal durch das CCIR-Filter schickt. Demnach ist der Eingangsrauschstrom von Röhren extrem niedrig. In den Datenblättern findet man dafür keine Werte, jedenfalls muss er weit unter den für den LT1793 genannten  $0.8 fA / \sqrt{Hz}$ liegen. Dieser OP rauscht bei allen genannten Quellwiderständen mehr als die anderen Verstärker. Eingangsimpedanzen von 10 MΩ kommen im HiFi-Bereich nicht vor, wohl aber bei Musikinstrumentenverstärkern. Einige Hersteller von Piezotonabnehmer geben an, dass diese mit so hoher Impedanz abgeschlossen werden sollen, damit vom Klang nichts verloren geht. Das Experiment zeigt, dass bei Belastung mit kleineren Widerständen die Bässe abgeschwächt werden. Ein Piezotonabnehmer ist eine Signalquelle mit kapazitiver Impedanz und typischen Werten von einigen 100 pF bis mehrere 1000 pF. Diese bildet zusammen mit dem äußeren Abschlusswiderstand einen Hochpass, dessen untere Grenzfrequenz umso höher wird, je kleiner der Abschlusswiderstand ist. Tipp 7: Bei der Entwicklung eines derartigen Verstärkers wird es sich lohnen, Röhre und JFET gegeneinander auszutesten und dann nach Gehör zu entscheiden. Wird der Eingang eines Verstärkers mit sehr hoher Eingangsimpedanz offen gelassen und der Lautstärkeregler aufgedreht, dann rauscht es gewaltig. Wird ein Piezotonabnehmer angeschlossen, geht das Rauschen stark zurück, weil jetzt eine RC-Parallelschaltung am Eingang liegt. Die hohen Frequenzen werden abgeschwächt, oberhalb der RC-Grenzfrequenz wird das Rauschen "rot", der Klang sehr viel dunkler und weit weniger störend. Soweit die erste Grobklassifizierung. Wie es dann im jeweiligen Einzelfall aussieht, hängt auch noch ganz wesentlich vom Schaltungsaufbau ab, außerdem vom einzelnen Exemplar der Röhre. Hier gibt es durchaus Schwankungen. Vor allem alte Röhren, bei denen das Kathodenmaterial verschlissen oder das Vakuum nicht mehr gut ist, können erhöhtes Rauschen zeigen. Bei Transistoren sind die Exemplarstreuungen dagegen minimal. Nicht ganz einfach ist ein objektiver Vergleich auch deshalb, weil die "Klangfarbe" des Rauschens immer wieder anders ist. Bei Transistoren, bipolar wie JFET, klingt das Rauschen heller, bei Röhren dunkler, was mit dem Verhältnis von 1/f-Rauschen zu Schrotrauschen zusammenhängt. Dazu kommen noch die Einflüsse der Schaltkapazitäten.

18 elektor — Röhren Sonderheft

#### Horchen statt theoretisieren

Noch ein spezielles Wort zu Röhren. Was das Rauschen angeht, können sie, sofern man nicht ein schlechtes Exemplar erwischt hat, sehr gut sein, ausgenommen bei sehr niedrigen Quellwiderständen. Nun bestehen aber die störenden Nebengeräusche nicht nur aus dem eigentlichen Rauschen, sondern es treten daneben noch andere Komponenten auf, die den Musikgenuss sehr trüben können, vor allem Mikrofonie. Die Elektroden in den Röhren sind oft nicht richtig starr, sondern etwas elastisch, vor allem das Steuergitter. Mechanische Erschütterungen erzeugen ein hörbares "Klingen". Das sollte nicht sein, kommt aber immer wieder vor. Dabei gibt es erhebliche Unterschiede, nicht nur zwischen verschiedenen Herstellern, sondern auch zwischen verschiedenen Exemplaren desselben Herstellers. Sogenannte "klangliche Unterschiede" verschiedener Röhren sind großenteils hierauf zurückzuführen. Speziell in Gitarrenverstärkern, wo die Verstärkung zwecks extremer Übersteuerbarkeit sehr hoch eingestellt ist, kann es, wenn die Eingangsröhre wie in Comboverstärkern durch den Lautsprecher beeinflußt wird, zu interner Rückkopplung kommen. Auch wenn gar keine Gitarre angeschlossen ist, ertönt bei weit aufgedrehten Gain- und Master-Volume-Reglern ein lautes Heulen oder Pfeifen. Dagegen hilft nur die Wahl hochwertigster Röhren, oder aber eine Bewusstseinserweiterung, nämlich von dem starrsinnigen, vordergründigen Dogma "kein Transistor im Signalwea" loszulassen. Ein einziger Transistor oder OP in der Eingangsstufe, der Transistor auf den richtigen Kollektorstrom eingestellt, der OP richtig ausgwählt und beschaltet, kann die Mikrofonie drastisch verringern, und vom Rauschen her ergäbe sich kein gravierender Unterschied. Im Buch "Gitarrenverstärker selbstgebaut" (Elektor-Verlag) wurde von dieser Option Gebrauch gemacht. Der röhrentypische Sound entsteht nicht in der Eingangsstufe, sondern erst in den nachfolgenden Stufen, wo der Signalpegel sehr viel höher ist. Diese Verstärkerstufen können bleiben wie sie sind. Es empfiehlt sich zu horchen und zu experimentieren statt zu theoretisieren. In Eingangsstufen, die so empfindlich sind, dass sich das Rauschen bemerkbar macht, spielt auch immer das Problem der Mikrofonie mit hinein. Siehe dazu auch vorigen Beitrag in diesem Heft. Nebenbei bemerkt kann Mikrofonie in der Schaltung aber auch von anderen Bauteilen herrühren, vor allem von keramischen Kondensatoren. Wenn das Dielektrikum ferroelektrisch ist (Bariumtitanat oder verwandte piezoelektrische Materialien), wirkt der Kondensator wie ein - sehr schlechtes - Mikrofon.

Bei extrem niedrigem Quellwiderstand wie z.B. Moving-Coil-Tonabnehmern kommen Bipolartransistoren wie der BC550 und auch Röhren nicht mehr auf ihr Rauschminimum. Besser ist es hier, das Signal zuerst hochzutransformieren, umso auf einen günstigeren Quellwiderstand zu kommen. Dabei muss man berücksichtigen, dass Übertrager brummempfindlich sind.

Sie fangen Streufelder vom Netztrafos und auch vom Ausgangsübertrager einer Röhrenendstufe ein. Deshalb müssen sie mit Mu-Metall sorgfältig abgeschirmt werden. Tipp 8: Wenn man zwei identische Übertrager dicht nebeneinander platziert und gegenphasig schaltet, kommt nur noch die Felddifferenz zur Wirkung. Die ist bei genügender Entfernung von Netztrafo sehr klein. Schließlich noch Tipp 9: Parallelschalten von rauschenden Verstärkerstufen senkt das zusätzlich erzeugte Rauschen (aus dem Halbleiter oder der Röhre) um den Faktor Wurzel aus deren Anzahl. Allerdings wird nicht das thermische Widerstandsrauschen der Quelle damit gemindert. Dieser Trick wurde bei Vorverstärkern für Moving-Coil-Tonabnehmern verwendet, beispielsweise mit vier parallel geschalteten Transistoren, wodurch sich die Rauschspannung halbiert. Auch Operationsverstärker kann man parallel schalten. Man darf hier jedoch nicht die Ausgänge direkt verbinden, sondern muss sie über Entkopplungswiderstände von z.B. 1 k $\Omega$  zusammenführen.

#### Fazit

Rauschen Röhren weniger als Transistoren? Die Antwort lautet wie bei Radio Eriwan: Im Prinzip ja, aber... Überlegen sind Röhren nur bei sehr hohen Quellwiderständen ab etwa 1 M $\Omega$ . Die Nebengeräusche bestehen aber nicht nur aus dem eigentlichen Rauschen, sondern auch aus Brummen, Dieses muss durch geeigneten Schaltungsaufbau beseitigt werden. Mit Gleichstromheizung, gut gesiebter Hochspannung und ordentlichem Schaltungsaufbau lassen sich Röhrenverstärker so ruhig stellen, dass das Brummen unter das physikalische Grundrauschen sinkt. Bei sehr niedrigen Quellwiderständen (Mikrofonen) lässt sich durch richtige Anpassung mit einem Übertrager (z.B. 1 : 16) das Rauschen soweit drücken, dass man vom physikalischen Minimum nur etwa 0,5 dB entfernt ist. Dazu gibt es Veröffentlichungen mit den Röhren ECC83S und ECC808 (Mikrofon-Vorverstärker in Röhrentechnik, Elektor Januar 2003) und mit der ECL86/PCL86. Daneben können Störgeräusche durch die Röhrenmikrofonie verursacht werden. Transistoren sind dagegen physikalisch bedingt mikrofoniefrei. Wer unbedingt Röhren einsetzen will, kommt nicht daran vorbei, diese sehr sorgfältig zu selektieren, sonst wird aus "high end" sehr leicht "low end". Auf welchem Weg in einem konkreten Gerät letztlich der beste Fremdspannungsabstand zu erreichen ist, hängt ansonsten ab 1. vom Quellwiderstand;

- von den verwendeten passiven Bauelementen: Kohleschichtwiderstände rauschen, und keramische Kondensatoren sind sehr häufig mikrofonisch. Beide sind in hochempfindlichen Eingangsstufen unbedingt zu meiden; und
- von der jeweiligen Schaltungsauslegung.
   Die Entwicklung von High-End-Verstärkern ist nach wie vor eine hohe Kunst. Wer die hier genannten Tipps berücksichtigt, kann dem Ziel ein Stück näher kommen.

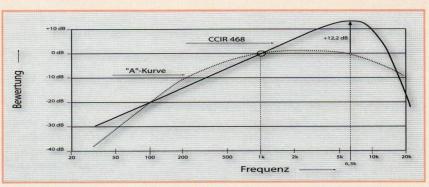
# Rauschbewertungsfilter

Wie die praktische Erfahrung zeigt, ist mit Rauschspannungen und Rauschzahlen allein nur unzureichend beschreibbar, wie stark der Musikgenuss wirklich gestört wird. Eine lineare Bewertung entspricht nicht sehr gut dem, was das menschliche Ohr empfindet. Am stärksten stören Frequenzanteile im kHz-Bereich. Um die Lästigkeit des Rauschens besser zu erfassen, haben erfahrene Akustiker nichtlineare Bewertungskurven definiert, die mehr oder weniger genau die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Ohres widerspiegeln. Weil sie dazu unterschiedliche Meinungen haben, sind verschiedene Kurven aufgekommen. Die verbreiteste ist die "CCIR 468-2" mit einer Überbewertung um 12 dB

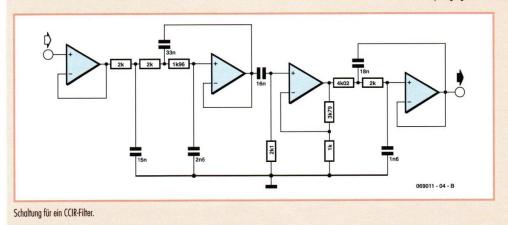
bei 5 kHz, die vorwiegend im professionellen Studiobereich angewandt wird. Im unteren Teil verläuft der Anstieg proportional zur Frequenz (6 dB pro Oktave, blaues Rauschen), im oberen ist der Abfall sehr steil (Filter 5. Ordnung, 30 dB pro Oktave).

Bild unten links zeigt eine dafür geeignete Schaltung. In Konkurrenz dazu steht die "A-Kurve", die vorzugsweise im Heim-HiFi-Bereich eingesetzt wird. Diese Bewertungskurve stammt aus der Röhrenhochzeit. Die starke Abschwächung im unteren Frequenzbereich ist ein Zugeständnis an die mit Wechselstrom geheizten Röhren und die oft nur mäßige Siebung der Betriebsspannung im Netzteil. Da das Ohr für tiefe Frequenzen weniger empfindlich ist, wurde die Toleranzgrenze in diesem Bereich großzügig ausgelegt.

Folgendes Bild gibt die beiden Frequenzgänge wieder.



Frequenzgänge verschiedener Rauschbewertungskurven



# Literatur

- [1] Hameg: Was ist Rauschen? www.hameg.com/ downloads/fachartikel/HAMEG\_Rauschen.pdf
- [2] Schnell, D.: Was ist eigentlich Rauschen? Funkschau Nr. 4/1979, S. 183.
- [3] Skritek, P.: Handbuch der Audio-Schaltungstechnik. Franzis-Verlag

- [4] Christensen, J.: Auf die Rauschzahl kommt es an. Elektronik Nr. 2/1996, S. 78.
- [5] Telefunken-Laborbücher, Bd. 2-6. Franzis-Verlag.
- [6] Datenblätter und Applikationsschriften von Linear Technology, National Semiconductor, Texas Instruments

Dieser Artikel wurde zuerst veröffentlicht in Elektor "Special Project Röhren 3" (April 2007).

Hier veröffentlicht von GITEC mit freundlicher Genehmigung.

Forum E-Gitarrentechnik e.V. (GITEC)

