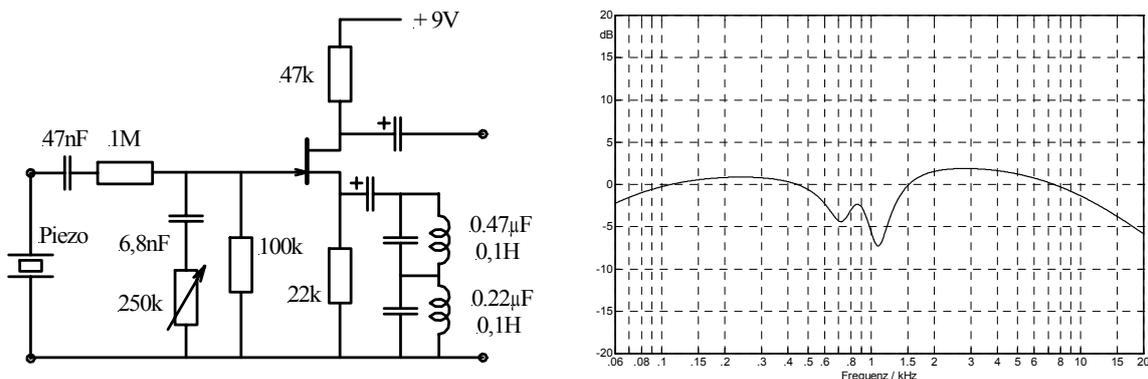


## 6.7 Rauschen

Bei jedem Piezo-Tonabnehmer mit batteriebetriebenen Vorverstärker ist ein Zielkonflikt zwischen Störrauschen und Batterie-Lebensdauer zu lösen: Je kleiner der Drainstrom des Feldeffekttransistors, desto länger hält die Batterie – desto größer ist jedoch die Rauschspannungsdichte  $e_n$  und damit das Vorverstärkerrauschen. In aller Regel bewegt man sich aber in eher unkritischen Bereichen und entscheidet zugunsten der Batterie.

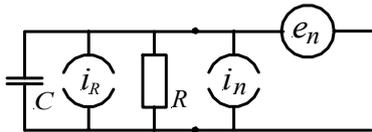


**Abb. 6.21:** Schaltbild und Verstärkungsmaß eines frühen Ovation-Verstärkers. Der einstellbare 250-k $\Omega$ -Widerstand dient als Klangblende, am Ausgang liegt ein (nicht eingezeichnetes) 100-k $\Omega$ -Lautstärkepotentiometer.

In **Abb. 6.21** ist das Schaltbild eines batteriebetriebenen FET-Verstärkers dargestellt, wie er in den ersten **Ovation**-Gitarren eingesetzt wurde. Bei einem Ruhestrom von ca. 0,1 mA ist eine Batterielevensdauer von ungefähr 4000 Stunden zu erwarten (Alkaline-Batterie). Von zwei an Source liegenden Resonanzkreisen wird eine Mittenbedämpfung verursacht, die – Herstellerangaben zufolge – den Klang günstig beeinflusst. Da der FET in dieser Beschaltung eine Spannungsverstärkung von ca. 20 erreicht und leicht übersteuert werden könnte, muss das Piezo-Signal durch einen Eingangs-Teiler entsprechend reduziert werden. In dem für das Gehör wichtigen Frequenzbereich um 2 kHz wirkt am FET-Eingang damit ein Widerstand von 67 k $\Omega$  – und rauscht mit 33 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  so stark, dass das FET-Rauschen vernachlässigbar ist. Multipliziert man die o.a. Rauschspannungsdichte mit der Wurzel aus der Bandbreite der 2-kHz-Terz und mit der Spannungsverstärkung, so erhält man am Schaltungsausgang in der 2-kHz-Terz eine Rauschspannung von 14  $\mu\text{V}$  – das ist nicht gerade als Lownoise-Design zu bezeichnen, aber bei einer maximal erzielbaren Nutzspannung von ca. 1–2 V auch nicht direkt schlecht.

Spätere Ovation-Verstärker unterscheiden sich von dem oben beschriebenen Modell durch etwas geringeres Rauschen, und deutlich höheren Stromverbrauch. Beispielsweise beträgt die **Ruhestromaufnahme** der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Ovation Viper ca. 1,2 mA, die SMT zieht sogar 4,6 mA aus der 9-V-Batterie. Wobei aber erwähnt werden muss, dass diese Gitarren über einen vielseitigeren Equalizer verfügen, der natürlich auch Strom braucht. Wenn man zum Vergleich nun die Daten von integrierten Operationsverstärkern (OP) heranziehen möchte, ist zuallererst deren Spannungsversorgung zu beachten: Typischerweise wird ein OP mit  $\pm 15\text{ V}$  betrieben; Batteriebetrieb mit  $\pm 4,5\text{ V}$  oder sogar nur  $\pm 3,5\text{ V}$  ist in vielen, aber nicht allen Fällen möglich. Ferner ist zu beachten, dass sich einige OP-Daten gegenüber den Datenblattangaben verschlechtern, wenn die Betriebsspannung reduziert wird.

Zur Berechnung des Verstärker-Rauschens ist es zweckmäßig, alle Rauschquellen des Verstärkers an den Eingang zu transformieren und als sog. äquivalente Eingangs-Rauschquellen anzugeben. In OP-Datenbüchern wird diesbezüglich die **Rauschspannungsdichte**  $e_n$  und die **Rauschstromdichte**  $i_n$  spezifiziert. Ein überschaubares Rausch-Ersatzschaltbild (**Abb. 6.22**) berücksichtigt die Piezo-Kapazität  $C$  (1,5 nF), den Verstärker-Eingangswiderstand  $R$  (1 M $\Omega$ ), die Verstärker-Rauschspannungsdichte  $e_n$  (42 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ), die Verstärker-Rauschstromdichte  $i_n$  (10 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ). Für dieses erste Beispiel sind die Rauschdichten dem Datenblatt eines FET-OP (TL061) entnommen, der mit nur 0,25 mA Stromaufnahme batterietauglich ist.

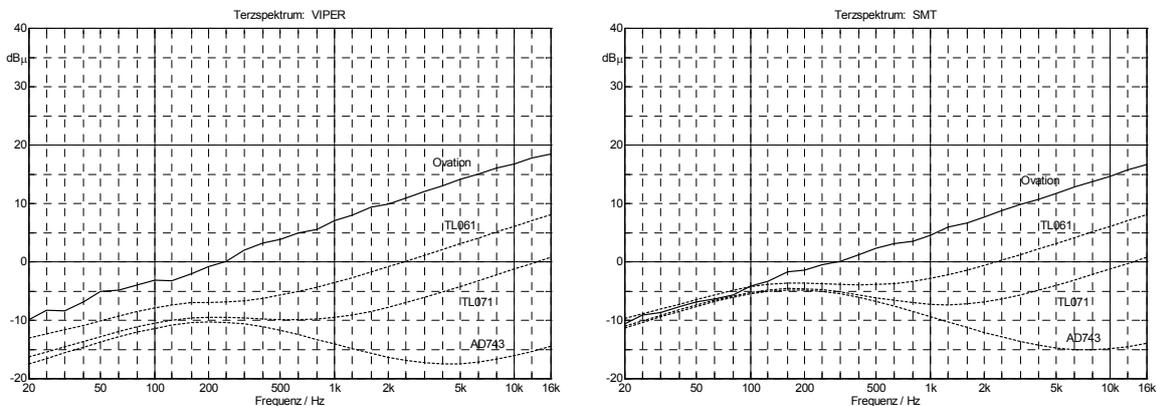


$$i_R = \sqrt{4kT/R}$$

$$\sqrt{4kT} = 1,3 \cdot 10^{-10} \sqrt{\text{W}/\text{Hz}}$$

**Abb. 6.22:** Rausch-Ersatzschaltbild eines Piezo-Tonabnehmers mit angeschlossenem Verstärker.

Alle Rauschprozesse sind näherungsweise statistisch unabhängig, ihre Wirkungen müssen pythagoreisch addiert werden. Gegenüber der vom Widerstand  $R$  verursachten Rauschstromdichte  $i_R$  ist die Rauschstromdichte  $i_n$  eines typischen FET-OP vernachlässigbar. Die Kapazität  $C$  bildet zusammen mit  $R$  und  $i_R$  einen Tiefpass, dessen Grenzfrequenz (je nach Dimensionierung) bei ca. 150 Hz liegt. Die Kapazität des Piezo-Tonabnehmers schließt folglich das Widerstandsrauschen zu hohen Frequenzen hin zunehmend kurz, sodass in dem für das Gehör wichtigen kHz-Bereich das Rauschen überwiegend von  $e_n$  verursacht wird. Im tieffrequenten Bereich dominiert beim TL071 das Widerstandsrauschen ( $i_R$ ), beim TL061 liefert auch der OP noch einen nennenswerten Beitrag (Funkelrauschen).



**Abb. 6.23:** Ausgangs-Terzpegelspektrum des Piezo-Vorverstärkers. 0 dB $\mu$   $\Rightarrow$  1  $\mu$ V. Ovation-Viper (links), Ovation-SMT (rechts). Spannungs-Verstärkung = 0,5. Ovation: Messung; FET-OP: Berechnung.

**Abb. 6.23** zeigt Mess- und Rechenwerte im Vergleich: Der **TL061** ist gut geeignet, mit nur 0,25 mA sollten 1600 Stunden Batteriebetrieb möglich sein. Selbst bei nur 7 V Versorgungsspannung kann der Ausgang noch 1,7 V<sub>eff</sub> abgeben. Der **TL071** verbraucht mit 2 mA schon deutlich mehr Strom, rauscht aber im Hörbereich weniger stark. Noch wesentlich weniger rauscht der **AD743**, der aber mit 10 mA Stromverbrauch am Netzteil betrieben werden sollte. Großer Leidensdruck zur Verwendung besonders rauscharmer Verstärker besteht aber nicht: Bei lautem Spiel gibt der Tonabnehmer ca. 1 V ab, so dass selbst mit dem Ovation-Verstärker ein ausreichender Rauschabstand erzielbar ist – zumal die Gitarre selbst ja auch Störgeräusche liefert.