

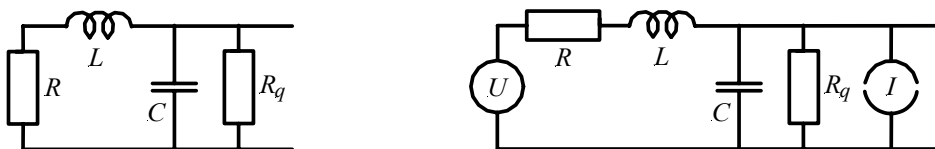
## 5.12 Tonabnehmer-Rauschen

Jeder Tonabnehmer erzeugt unerwünschte Störgeräusche. Der Magnettonabnehmer wandelt magnetische Störfelder in Störspannungen um (Kap. 5.7), er erzeugt aber auch schon ohne Anwesenheit eines Magnetfeldes eine breitbandige Rauschspannung. Breitbandig bedeutet, dass dieses Rauschen kontinuierlich von ganz tiefen bis zu ganz hohen Frequenzen verteilt ist. Ursache hierfür sind die im Kupferdraht frei beweglichen Leitungselektronen, die zufällige Bewegungen ausführen. Die Überlagerung all dieser Ladungsbewegungen führt zu einer normalverteilten (= gaußverteilten) Rauschspannung, deren Stärke als Effektivwert  $\tilde{U}$  (auch RMS-Wert genannt) angegeben wird. In Abhängigkeit von der absoluten Temperatur  $T$ , der Messbandbreite  $B$ , und der Boltzmannkonstante  $k$  erhält man am Widerstand  $R$ :

$$\tilde{U} = \sqrt{4kTBR} = 0,127 \mu\text{V} \cdot \sqrt{B/\text{kHz} \cdot R/\text{k}\Omega} \quad \text{Thermische Rauschspannung}$$

Beispielsweise würde ein 10-k $\Omega$ -Widerstand bei 10 kHz Messbandbreite 1,27  $\mu\text{V}$  Rauschen erzeugen. Diese Berechnung gilt aber nur für reelle, unbelastete Widerstände; beim Tonabnehmer ist die frequenzabhängige Belastung zu berücksichtigen. Zur orientierenden Betrachtung ist es ausreichend, den Magnettonabnehmer durch seinen Wicklungswiderstand  $R$ , seine Induktivität  $L$ , die vor allem vom Kabel gebildete Lastkapazität  $C$ , und den Querwiderstand  $R_q$  nachzubilden (**Abb. 5.12.1**).  $R_q$  wird von drei parallel liegenden Widerständen gebildet: Dem Verstärker-Eingangswiderstand (typisch 1 M $\Omega$ ), dem Volume-Poti der Gitarre, und dem über einen "Klang-Kondensator" angeschlossenen Tone-Poti. Dieser in Reihe zum Tone-Poti liegende "Klang-Kondensator" kann für Rauschspannungen als Kurzschluss betrachtet werden, so dass alle drei Widerstände parallel angenommen werden können. Für einen typischen Stratocaster-Tonabnehmer ist beispielsweise  $R = 6000 \Omega$ ,  $L = 2,2 \text{ H}$ ,  $C = 0,7 \text{ nF}$ ,  $R_q = 111 \text{ k}\Omega$ . Nur die reellen Widerstände der Schaltung erzeugen thermisches Rauschen, das für  $R$  in der seriellen Rauschspannungsquelle  $U$ , und für  $R_q$  in der parallelen Rauschstromquelle  $I$  nachgebildet wird. Beide Rauschprozesse verlaufen unabhängig voneinander, ihre Wirkungen dürfen getrennt berechnet und überlagert werden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die beiden Effektivspannungen – wie bei inkohärenten Signalen erforderlich – **pythagoreisch** addiert werden. Zur Berechnung lässt man zunächst die Stromquelle weg, und ermittelt die von  $U$  erzeugte Klemmenspannung; danach ersetzt man die Spannungsquelle durch einen Kurzschluss, und ermittelt die von  $I$  erzeugte Klemmenspannung. Beide Klemmenspannungen werden quadriert und addiert; die Wurzel hieraus ist die tatsächliche Rauschspannung.

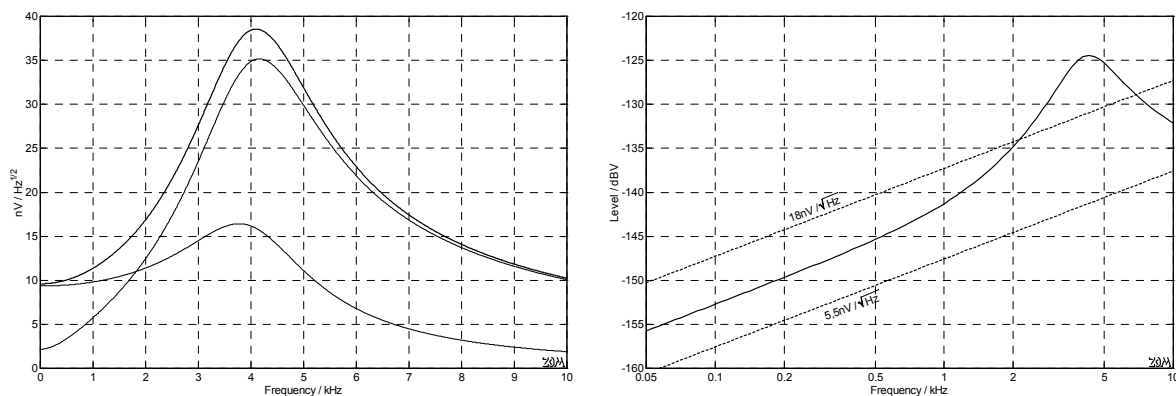
Die spektrale Verteilung des Rauschens wird im **Rauschspektrum** dargestellt: Abszisse ist hierbei die Frequenz, Ordinate die Rauschleistungsdichte (W/Hz), oder die normierte Wurzel hieraus, die sog. **Rauschspannungsdichte** ( $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ).



**Abb. 5.12.1:** Tonabnehmer-Ersatzschaltbild; links ohne, rechts mit Rauschquellen. Das Ersatzschaltbild ist Grundlage für die in Abb. 5.12.2 dargestellten Rauschspektren.

Die thermische Rauschleistung eines reellen Widerstandes  $R$  beträgt  $4kTB$ ; sie ist unabhängig vom Widerstandswert. Die auf die Bandbreite  $B$  bezogene Rauschleistung ist die (spektrale) Rauschleistungsdichte  $PSD = 4kT = 1,62 \cdot 10^{-20}$  W/Hz. Hierbei steht **PSD** für Power Spectral Density, für  $T$  wurde 293K eingesetzt (Zimmertemperatur). Da die Rauschleistungsdichte in jeder Frequenzlage denselben Wert hat (d.h. nicht von  $f$  abhängt), wird dieses Rauschen als **Weißes Rauschen** bezeichnet; wie beim weißen Licht sind "alle Frequenzen beteiligt". In der Schaltungstechnik wird jedoch anstelle von PSD üblicherweise die Rauschspannungsdichte  $e_n$  verwendet. Man erhält sie, indem die Rauschspannung  $\tilde{U}$  durch die Wurzel aus der Bandbreite dividiert wird:  $e_n = \sqrt{4kTR}$ . Ein 6-k $\Omega$ -Widerstand erzeugt Weißes Rauschen mit einer Rauschspannungsdichte von  $9,85$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . In Abb. 5.12.1 charakterisiert dieser Wert die mit  $U$  bezeichnete Rauschspannungsquelle. Das hiervon an den Ausgangsklemmen ankommende Rauschen ist aber nicht mehr weiß, sondern durch  $L$  und  $C$  tiefpassgefiltert. **Abb. 5.12.2** zeigt im linken Bild in der untersten Kurve die Frequenzabhängigkeit der von  $R$  bewirkten, an den Ausgangsklemmen liegenden Rauschspannungsdichte. Bei 3,8 kHz erkennt man deutlich die tiefpassbedingte Resonanzüberhöhung.

Die zweite Rauschquelle ist der Querwiderstand  $R_q$ . Sein Rauschen wird zweckmäßigerweise mit einer parallelen Rauschstromquelle nachgebildet, deren spektrale Rauschstromdichte  $i_n$  sich zu  $e_n / R_q$  ergibt. Für 111 k $\Omega$  erhält man  $382$  fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . Um die hiervon erzeugte Klemmenspannung zu berechnen, muss  $i_n$  mit dem Betrag der Schaltungsimpedanz multipliziert werden; in Abb. 5.12.2 links durch die mittlere Kurve dargestellt. Die pythagoreische Summe beider Spektralkurven ist im linken Bild als obere Kurve gezeichnet. Unterhalb von 1,8 kHz dominieren die Rauschteile des Wicklungswiderstandes  $R$ , darüber die Rauschteile der Poti/Verstärker-Widerstände  $R_q$ , die insgesamt den wesentlichen Anteil des Rauschens ausmachen. Im rechten Bild von **Abb. 5.12.2** ist das Pegelspektrum des Gesamtrauschens gezeichnet. Hierbei wurde eine (relativ konstante) **1/12-Oktav**-Bandbreite gewählt. Die relative 1/12-Oktav-Bandbreite beträgt 5,8%, das entspricht bei 100 Hz Mittenfrequenz 5,8 Hz absoluter Bandbreite, bei 1 kHz dementsprechend 58 Hz. Eine Rauschspannungsdichte von  $9,85$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  erzeugt bei 5,8 Hz Bandbreite  $23,7$  nV Rauschspannung, entsprechend einem Pegel von  $-152,5$  dBV. Gestrichelt sind in Abb. 5.12.2 (rechtes Bild) die Pegelverläufe für Weißes Rauschen mit  $5,5$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (ECC83, LT1113) bzw.  $18$  nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (TL071) dargestellt. Der TL071 verschlechtert das Tonabnehmer-Rauschen unter 2 kHz, ECC83 und LT1113 fügen so gut wie kein eigenes Rauschen hinzu. Die Auswirkungen der Rauschströme ( $10$  fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) können bei **FET-OPs** und **Röhren** vernachlässigt werden. Hingegen wäre der Transistor-OP NE5532 mit ca.  $500$  fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  unzuverlässig, trotz seines guten  $e_n$ -Wertes.



**Abb. 5.12.2:** Tonabnehmer-Rauschspannungsdichte (links), 1/12-Oktavpegel (rechts). Berechnung für das Ersatzschaltbild aus Abb. 5.12.1, mit  $R = 6$  k $\Omega$ ,  $L = 2,2$  H,  $C = 700$  pF,  $R_p = 111$  k $\Omega$ .  $\Rightarrow U_{\text{gesamt}} = 2,2$   $\mu$ V.