

### 10.9.2 Röhren-Watt vs. Transistor-Watt

Angeblich sind bei gleicher Leistung Röhrenverstärker lauter als Transistorverstärker. Ehe man diese Thematik aus wissenschaftlicher Sicht diskutiert, muss genau definiert sein, was mit "das ist ein 50-W-Verstärker" eigentlich gemeint ist. *Nicht* gemeint ist die Leistungsaufnahme, also die aus dem Netz aufgenommene Leistung – es handelt sich bei derartigen Angaben immer um die an den Lautsprecher abgegebene Leistung. Wäre der Lautsprecher-Widerstand frequenzunabhängig und reell, könnte man diese Leistung ohne Probleme angeben. Der Lautsprecher-Widerstand ist aber frequenzabhängig und komplex, trotz der Aufschrift  $8\ \Omega$ . Damit dennoch eine Wattzahl spezifiziert werden kann, ersetzt man bei der Leistungsmessung den Lautsprecher durch einen reellen Widerstand, und für diesen gilt die angegebene Wattzahl. Der Hersteller spezifiziert also z.B.: Dieser Verstärker leistet 50 W an  $8\ \Omega$ . Welche Leistung dieser Verstärker an einen  $8\text{-}\Omega$ -Lautsprecher abgeben kann, ist damit noch nicht gesagt, denn ein  $8\text{-}\Omega$ -Lautsprecher hat nicht bei allen Frequenzen  $8\ \Omega$  (Kap. 11.2).

Ein Wechselstrom mit der effektiven Stromstärke  $I = 2\ \text{A}$  erzeugt an einem  $8\text{-}\Omega$ -Widerstand die effektive Spannung  $U = 16\ \text{V}$ ; das Produkt aus Stromstärke und Spannung ergibt die Leistung:  $P = 32\ \text{W}$ . Zum Zeichen, dass es sich um Effektivwerte handelt, wird häufig eine Tilde (Schlange) über das Formelzeichen gesetzt:

$$P = \tilde{U} \cdot \tilde{I} = R \cdot \tilde{I}^2 = \tilde{U}^2 / R; \quad \tilde{U} = \sqrt{P \cdot R}; \quad \tilde{I} = \sqrt{P / R}$$

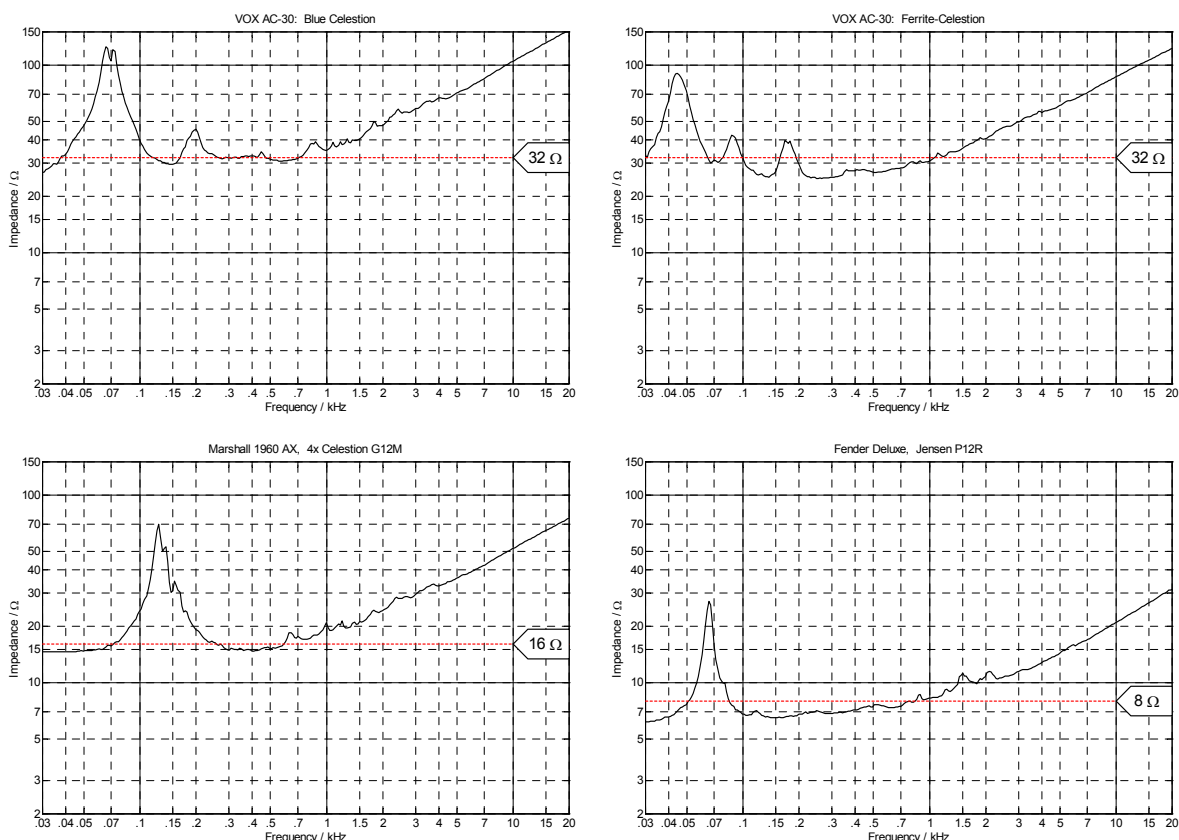
Zu einem Effektivstrom von  $2\ \text{A}$  gehört eine Strom-Amplitude von  $\sqrt{2} \cdot 2\ \text{A}$ , also  $2,8\ \text{A}$ , und entsprechend gehört zu  $16\ \text{V}$  Effektivspannung die Spannungs-Amplitude  $22,6\ \text{V}$ . Wenn man jetzt nicht die Effektivwerte multipliziert, sondern die Amplituden (die Spitzenwerte), erhält man die doppelte Leistung: So wird aus einem  $32\text{-W}$ -Verstärker ein  $64\text{-W}$ -Verstärker. Diese (höhere) Wattangabe ist in der professionellen Audiotechnik aber ungebräuchlich, stattdessen gibt man die aus dem Effektivwert berechnete Nennleistung an, im Beispiel:  $P = 32\ \text{W}$ . Wovon hängt diese Leistung ab? Z.B. von der quadrierten Effektivspannung, und einem mehr oder weniger willkürlich definiertem Nennwiderstand  $R$ , der zunächst den Lautsprecher ersetzt. Dieser Nennwiderstand ist als feste Größe im Datenblatt spezifiziert, die Spannung aber ist variabel. Bei welcher Aussteuerung gibt man die Nennleistung an? Bei HiFi- und Studioanlagen wählt man die größtmögliche Spannung, bei der gerade noch keine Verzerrungen auftreten, bzw. bei der ein (anzugebender) bestimmter Klirrfaktor erreicht wird: Also z.B.  $32\ \text{W}$  an  $8\ \Omega$  bei  $k = 1\%$ . Bei einem Gitarrenverstärker ist eine derartige Klirrfaktorangabe nicht möglich, deshalb wird bei sinusförmiger Ansteuerung die Ausgangsspannung visuell bewertet, und der Wert angegeben, bei dem gerade die Begrenzung (Clipping) beginnt. Aber nochmals: Zur Berechnung darf nicht diese Grenzspannung in die Formel eingesetzt werden, denn das wäre ja die Amplitude (die Spitzenspannung). Vielmehr muss diese Grenzspannung durch  $\sqrt{2}$  geteilt werden. Oder man rechnet mit der Amplitude, und teilt anschließend die so berechnete Leistung durch 2. Als Beispiel: Am  $8\text{-}\Omega$ -Widerstand tritt bei  $40\ \text{V}$  Begrenzung auf. Die daraus errechnete Effektivspannung ist  $28,3\ \text{V}$ , daraus  $P = 100\ \text{W}$ . Oder:  $40^2 / 8 / 2 = 100$ .

Nun reicht es aber nicht, wenn die an einen  $100\text{-W}$ -Verstärker angeschlossene Lautsprecherbox nur  $100\ \text{W}$  aushält. Da Gitarrenverstärker übersteuert werden, geben sie mehr als die oben spezifizierte Nennleistung ab. Würde man die im o.a. Beispiel genannte Grenzspannung ( $40\ \text{V}$ ) als lastunabhängig ansehen, dann ergäbe sich bei rechteckförmiger Übersteuerung die doppelte Ausgangsleistung, also  $200\ \text{W}$ ! Denn Rechteck und Sinus unterscheiden sich bei gleichem Spitzenwert in ihren Effektivwerten um den Faktor  $\sqrt{2}$ .

Völlig lastunabhängig ist aber die Grenzspannung, also der Spannungswert, auf den die Ausgangsspannung begrenzt wird, nicht, weil der Netzteil-Innenwiderstand nicht null ist. Das **Netzteil** stellt die Betriebsspannung der Endstufe zur Verfügung, beim Röhrenverstärker z.B. 450 V. Hierbei handelt es sich um eine Gleichspannung, deren Wert von mehreren Parametern abhängt: Von der Netzspannung, vom Netztransformator, vom Gleichrichter, und von der Belastung. Im unbelasteten Zustand hat die Betriebsspannung ihren maximalen Wert, bei Belastung, d.h. wenn der Verstärker Leistung abgibt, "bricht sie zusammen". Der Grund ist ganz einfach: Der zur Endstufe fließende Strom muss vorher durch den Transformator und den Gleichrichter fließen, und an beiden entsteht ein Spannungsverlust. Die genauen Spannungs- und Stromverläufe sind zwar alles andere als einfach (verkoppelte nichtlineare Systeme), aber so genau muss das an dieser Stelle gar nicht untersucht werden. Bei Belastung bricht die Betriebsspannung zusammen, z.B. von 450 V auf 400 V, oder sogar auf nur 360 V. Mit großem Netztrafo und effizientem Silizium-Gleichrichter bricht die Spannung nur wenig zusammen, mit kleinem Trafo und Röhren-Gleichrichter stärker – auch so ein Genre-Unterschied. Mit dicken 100- $\mu$ F-Elkos erfolgt das Zusammenbrechen (und natürlich auch das anschließende Erholen) langsamer als mit (aus heutiger Sicht) dürftigen 16- $\mu$ F-Elkos. Und hier kann ein Unterschied zwischen Röhren- und Transistor-Watt liegen: Moderne Transistorverstärker haben oft sehr "steife" Netzteile, d.h. Netzteile mit kleinem Innenwiderstand, deren Spannung bei Belastung nur wenig abnimmt. Röhrenverstärker, insbesondere wenn alt (Gleichrichter-Röhre), haben demgegenüber Netzteile mit größerem Innenwiderstand (siehe auch Kap. 10.1.6). Natürlich müsste das eine mit dem anderen nichts zu tun haben: Eine Röhrendstufe könnte auch ein niederohmiges Netzteil haben – die berühmten Verstärkerlegenden haben das aber gerade nicht. Dem nach einer Pause gespielten Gitarrenton steht beim Röhrenverstärker im ersten Moment ein voll geladener Netz-Elko zur Verfügung, die Grenzspannung ist z.B. 40 V, das ergäbe 100 W Nennleistung an 8  $\Omega$ . Innerhalb weniger Zehntelsekunden bricht aber die Elko-Spannung zusammen, und damit reduziert sich auch die Grenzspannung von 40 V auf z.B. 35 V. Da die Spannung quadratisch in die Leistung eingeht, ergibt sich eine Leistungsabnahme von 100 W auf 77 W. Die mit einem Sinus-Dauerton ermittelte Nennleistung ergibt den zweiten Wert, also 77 W. Bei dem mit steifem Netzteil ausgestatteten Transistorverstärker bricht die Grenzspannung z.B. von 37 V auf 35 V zusammen, damit haben beide Verstärker dieselbe Nennleistung. Im Impulsbetrieb, d.h. beim Anschlagen eines Tones, erzeugt der Röhrenverstärker aber eine höhere Leistung, im Beispiel 100 W statt 85 W. Und wenn beim Röhrenverstärker die Grenzspannung nicht nur um 12,5% abnimmt, sondern um 15% oder 20%, werden diese Unterschiede noch wesentlich größer.

Ein Unterschied in der Leistungsabgabe zwischen Röhren- und Transistorverstärker betrifft also das Zeitverhalten: Der "Attack" kommt beim Röhrenverstärker mit größerer Leistung. Im Falle art-typischer Schaltungen – denn natürlich könnte man das auch genau umgekehrt konzipieren. Damit hat selbstverständlich der Theoretiker Recht, wenn er sagt: "Es gibt keinen Unterschied zwischen Röhren-Watt und Transistor-Watt, die Leistungs-Einheit Watt ist allgemeingültig genormt." Und genauso hat der Musiker Recht, der seinen Röhrenverstärker lauter empfindet. Nicht die Maßeinheit ist unterschiedlich, sondern die Messprozedur. Ein zweiter Unterschied findet sich beim Lautsprecher-Widerstand, der nicht konstant, sondern frequenzabhängig und komplex ist. Der Betrag dieses komplexen Widerstandes, **die Impedanz**, kann beim 8- $\Omega$ -Lautsprecher bei bestimmten Frequenzen auch 20  $\Omega$  oder 30  $\Omega$  betragen. Zur Impedanz trägt nämlich nicht nur der Kupferwiderstand der Schwingspule bei, sondern auch die ins Elektrische transformierten bewegten mechanischen Komponenten und die Induktivität der Schwingspule (Kap. 11). Bei Resonanz (z.B. 90 Hz) wird der Lautsprecher hochohmig im Vergleich zum Nennwiderstand, und Gleiches passiert bei hohen Frequenzen.

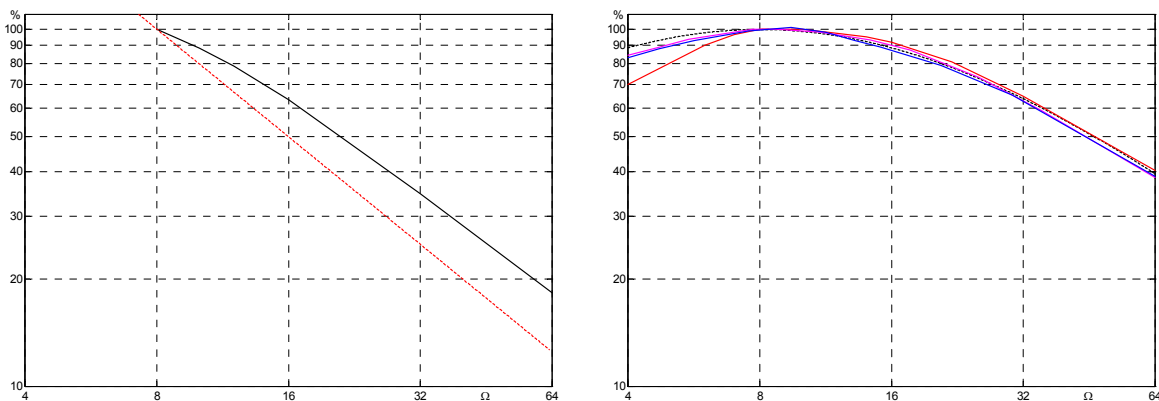
**Abb. 10.9.4** zeigt die Impedanzfrequenzgänge einiger Gitarrenboxen, die Frequenzabhängigkeit ist überdeutlich. Es ist dem Hersteller ziemlich freigestellt, welchen Ohmwert er auf seine Boxen druckt. Zwar gibt es hierüber Normen, aber Musiker und Hersteller vereinbaren ja nicht einen Kaufvertrag auf der Basis spezieller DIN- oder ANSI-Normen. Für die folgenden Überlegungen sei einfach angenommen, ein Lautsprecher habe bei *einer* Frequenz  $8\ \Omega$ , bei einer *anderen* Frequenz  $16\ \Omega$ . Hat der Verstärker ein transistortypisch steifes Netzteil und eine ebenfalls transistortypisch stark gegengekoppelte Endstufe, ist seine Ausgangsspannung nahezu lastunabhängig, also eingepreßt. Er kann an  $16\ \Omega$  nur halb so viel Leistung abgeben wie an  $8\ \Omega$ . Ganz anders beim Röhrenverstärker: Würde man ihn ohne Lautsprecher betreiben, es könnte sogar zu Funkenüberschlägen an der Endröhre kommen, so hoch sind die Spannungen, die dabei entstehen können. Eine perfekte Stromquelle stellt der Röhrenverstärker zwar nicht dar, aber höherohmig als der Transistorverstärker ist er schon, und das hat Auswirkungen auf die Leistungsabgabe. Als Zahlenbeispiel: Ein Verstärker mit  $8\ \Omega$  Innenwiderstand gibt an  $8\ \Omega$  z.B.  $P_1 = 50\ \text{W}$  ab, an  $16\ \Omega$  hingegen  $P_2 = 44\ \text{W}$ . Ein (Transistor-) Verstärker mit  $0\ \Omega$  Innenwiderstand würde hingegen  $50\ \text{W} / 25\ \text{W}$  abgeben. Mit wachsender Lautsprecherimpedanz geht die Leistung am Transistorverstärker also stärker zurück als am Röhrenverstärker. Die genaue Berechnung ist wieder kompliziert, weil lineares Verhalten (Innenwiderstand) und nichtlineares Verhalten (Grenzspannung) interagieren, und auch weil zur Ansteuerung ein reales Gitarrensinal, und kein Sinuston verwendet wird. In der Tendenz aber bleibt die Aussage: Der typische Röhrenverstärker erzeugt trotz gleicher Nennleistung durchschnittlich mehr Leistung als der Transistorverstärker.



**Abb. 10.9.4:** Impedanzfrequenzgänge typischer Gitarrenlautsprecher, in reflektierender Umgebung gemessen.

Als Beispiel soll der Lautsprecherimpedanz-Frequenzgang der Marshall-Box 1960AX genauer untersucht werden. Sie ist mit  $16\ \Omega$  spezifiziert, ihre minimale Impedanz beträgt  $Z = 15\ \Omega$ .

Bei 130 Hz erreicht  $Z$  das Resonanzmaximum ( $70 \Omega$ ). Ein für  $16 \Omega$  spezifizierter Transistor-Verstärker mit (idealisiert) steifem Netzteil gibt an  $70 \Omega$  nur 23% der Leistung ab, die er an  $16 \Omega$  abgeben könnte. In der Realität geht die Leistung zwar nicht ganz so stark zurück, weil mit zunehmender Last-Impedanz die Netzteilspannung weniger zusammenbricht, aber eine Abnahme auf "nur" 30% ist ja auch schon erheblich. Ganz anders der Röhrenverstärker: Ist er ebenfalls für  $16 \Omega$  spezifiziert, könnte man mit  $70 \Omega$  Last immerhin ca. 60% Leistung erwarten, also das Doppelte der Transistorleistung. Am Röhrenverstärker wird die Marshall-Box also den Frequenzbereich um die Resonanz betonen, und die Höhen lauter wiedergeben. Diese Tendenz kann durch Vergrößern der Höhenverstärkung (Aufdrehen des Treble-Reglers) nicht kompensiert werden, weil dies die maximal abgebbare Leistung nicht beeinflusst.



**Abb. 10.9.5:** Maximal abgebbare Leistung in Abhängigkeit vom realen Lastwiderstand. Nennwiderstand:  $8 \Omega$ . Links: Typische Transistorendstufe. Rechts: Typische Röhren-Endstufe. Gestrichelt: Modellrechnung.

In **Abb. 10.9.5** sind für eine typische Transistorendstufe und drei Röhrenendstufen die maximal abgebbaren Leistungen dargestellt. Maximal heißt: Bei totaler Übersteuerung. Die Transistorendstufe ist für  $8 \Omega$  spezifiziert, bei kleineren Lastwiderständen schaltet der Verstärker ab. Die Röhrenendstufen sind ebenfalls für  $8 \Omega$  spezifiziert, sie vertragen sowohl kleinere als auch größere Lastwiderstände. Als idealisiertes **Modell** wurde bei der Transistorendstufe eine lastunabhängige Spannungseinprägung angenommen, bei den Röhrenendstufen ein konstanter **Innenwiderstand** von  $R_i = 8 \Omega$ . Wenn bei einer Endstufe vom Innenwiderstand die Rede ist, muss zwischen linearem und nichtlinearem Verhalten unterschieden werden: Im linearen Betrieb (keine Übersteuerung) hat die typische Transistorendstufe einen sehr kleinen Innenwiderstand (z.B.  $0,1 \Omega$  oder noch weniger). Eine nicht gegengekoppelte Röhrenendstufe wie die des VOX AC30 bringt es hingegen auf z.B.  $80 \Omega$  (hier existieren verschiedene Varianten). Der AC30 betont folglich schon im linearen Betrieb die Frequenzbereiche, in denen der Lautsprecher hochohmig ist. Im nichtlinearen Betrieb ist ein Innenwiderstand nur mit speziellen Modellgesetzen definierbar, die für die Röhrenendstufen eingezeichnete gestrichelte Kurve wurde für  $R_i = 8 \Omega$  berechnet. Auch hierbei werden höherohmige Bereiche betont, allerdings nicht mehr so stark wie im linearen Betrieb.

Ein interessantes Konzept realisiert der **VOX AD60-VT**: Dieser Gitarrenverstärker verwendet eine leistungsschwache Doppeltriode (ECC 83) als Gegentakt-Endstufe, und ergänzt in einem sog. Ausgangswandler die fehlende Leistung mit Transistorunterstützung. Das Besondere: Die Lautsprecherimpedanz beeinflusst die abgebbare Leistung. Dass die verbliebene Röhre nicht nur Alibifunktion hat, beweisen Hörversuch und Leistungs-Messung (Abb. 10.9.6). Was nicht so laut gesagt wird: In der AC-30-Endstufe arbeiten Pentoden (EL84), im AD60-VT hingegen Trioden. Doch wie gesagt: Mit gutem Erfolg.

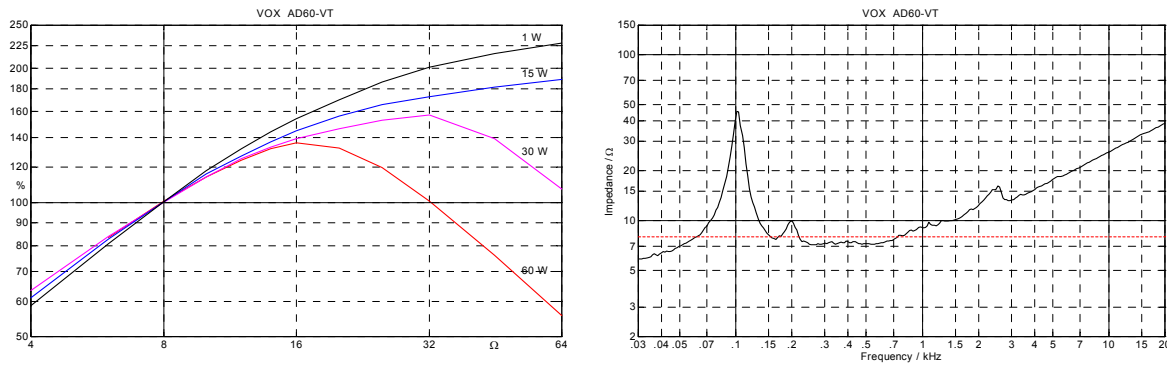


Abb. 10.9.6: VOX AD60-VT: Normierte Maximalleistung (links), Impedanzfrequenzgang (rechts).

In Abb. 10.9.6 ist die abgebbare Maximalleistung in Abhängigkeit vom Lastwiderstand dargestellt, Parameter ist der am Verstärker per Schalter wählbare Leistungsbereich. Die Leistungscharakteristik ist nun keinesfalls identisch mit der eines Röhrenverstärkers, das Ergebnis kann sich trotzdem hören lassen. Gegenüber dem 8-Ω-Bezugspunkt erfolgt in höherohmigen Frequenz-Bereichen eine Anhebung, die noch stärker ist, als beim "echten" Röhrenverstärker. Dass im 60-W-Modus das Leistungsmaximum bei 16 Ω liegt, unterstützt den Betrieb mit einer (in Reihe zu schaltenden) zweiten 8-Ω-Box: Mehr Leistung, die Höhenanhebung kommt dann allerdings zu kurz.

**Zusammengefasst:** Sowohl in der Impulsleistung (auch Musikleistung genannt), als auch im höherohmigen Frequenzbereich des Lautsprechers bringt die typische Röhrenendstufe mehr Leistung als die typische Transistorendstufe – trotz gleicher Nennleistung am (gleichen) Nennwiderstand. Ein für alle Verstärker gültiger Prozentwert kann allerdings nicht angegeben werden, zu unterschiedlich sind die einzelnen Schaltungskonzepte.

Abschließend soll noch kurz auf die **Lautstärke** eingegangen werden, denn nur die interessiert letztlich den Musiker. Verdoppeln der Verstärkerleistung verdoppelt nicht immer die Lautstärke, soviel ist bekannt. Die von der Psychoakustik gelehrte Erkenntnis, dass zur Lautheitsverdoppelung die Leistung verzehnfacht werden muss, gilt allerdings nur für die Wiedergabe eines 1-kHz-Tones. Dass die E-Gitarre demgegenüber einen breitbandigen Klang erzeugt, der mit einem reinen Ton wenig gemein hat, muss natürlich berücksichtigt werden, noch wichtiger ist aber, dass der Musiker die Lautstärke seines Instrumentes meistens danach beurteilt, wie laut es sich gegen andere Instrumente durchsetzen kann. Und dabei geht es nicht um die absolute Lautheit, sondern um eine **gedrosselte Lautheit** (partial masked loudness [12]). Als Beispiel könnte man an einen Keyboarder denken, der einen lauten Akkord spielt, und an einen Gitarristen, der unhörbar bleibt, obwohl sein Gitarrenverstärker 10 W an den Lautsprecher abgibt. Der nicht etwa kaputt ist – sein Schall wird nur zu 100% vom Keyboardschall verdeckt. Vergrößert man nun die Gitarrenleistung auf z.B. 20 W, so beginnt die Gitarre, hörbar zu werden. Solange aber gleichzeitig der Keyboard-Akkord gespielt wird, ist die Gitarre lautheitsgedrosselt, d.h. leiser als eine alleine gespielte Gitarre. Für das Anwachsen der gedrosselten Gitarrenlautheit als Funktion ihrer Schallleistung gilt nicht das einfache 10-dB-pro-Lautheitsverdopplungs-Gesetz, sondern ein kleinerer dB-Wert, z.B. nur 3 dB pro Lautheitsverdopplung. Und damit bekommen relativ kleine Leistungsunterschiede etwas mehr Bedeutung, als man ihnen mit psychoakustischem Basiswissen zugestehen würde. Übertreiben sollte man freilich nicht: Der Unterschied zwischen einem 50-W-Verstärker und einem 55-W-Verstärker bleibt unerheblich. Wo genau die Hörbarkeitsschwelle liegt, kann jedoch nur einzelfallbezogen angegeben werden, weil Drosselungen von der zeitlichen und spektralen Struktur der Schalle abhängen.