



HdK Berlin
Sengpiel

Über das richtige Anpassen von Lautsprechern und Kopfhörern

Von Siegfried Möller

Vielen Praktikern, die sich mit dem Selbstbau von Verstärkern und Lautsprecherboxen für Hi-Fi-Anlagen befassen, bereitet die Anpassung der Lautsprecher an die Verstärker vielfach Schwierigkeiten. Auch bei den erfahrenen Amateuren gibt es hierüber unklare Vorstellungen. In diesem Beitrag werden drei der wichtigsten falschen Behauptungen richtiggestellt.

Hier nun die Beispiele der falschen Behauptungen:

1. Der am Verstärkerausgang angegebene Widerstandswert ist der Innenwiderstand des Verstärkers.
2. 10 % Unteranpassung haben keinen Einfluß auf die Qualität der Wiedergabe.
3. Richtige Anpassung eines Lautsprechers an einen Verstärker ist Leistungsanpassung.

Ist der Lastwiderstand gleich dem Verstärker-Innenwiderstand?

Der am Verstärkerausgang angegebene Widerstandswert ist der günstigste Wert, den der Lastwiderstand (Lautsprecher) aufweisen soll, wenn die gesamte vom Verstärker zur Verfügung gestellte Leistung unter Einhaltung aller im Verstärker-Datenblatt angegebenen Werte, wie Klirrfaktor, Frequenzgang usw., ausgenutzt werden soll. Im folgenden wird der Lastwiderstand R_a genannt. Der Innenwiderstand – im folgenden mit R_i bezeichnet – ist im Gegensatz zum Lastwiderstand R_a kleiner als dieser. Bei qualitativ hochwertigen Verstärkern ist der Innenwiderstand R_i sogar sehr klein. Werte unter $0,1 \Omega$, gemessen am 8- Ω -Ausgang, sind keine Seltenheit. Bei der Angabe des Innenwiderstandes R_i muß der Verstärkerausgang, an dem der Wert für R_i gemessen wurde, ebenfalls angegeben sein. Das muß zumindest dann geschehen, wenn der Verstärker verschiedene Ausgänge besitzt, denn beide Werte gehören zusammen! Da der Wert von R_i großen Einfluß auf die Qualität der Wiedergabe hat, soll hier kurz die einfachste Methode erläutert werden, mit deren Hilfe er sich ermitteln läßt.

Bei Betrieb eines Verstärkers mit Lastwiderstand kann an den Ausgangsklemmen des Verstärkers die Ausgangsspannung gemessen werden. Es ist üblich, für diese Messung eine Meßfrequenz von 1 kHz zu wählen, die einem Nf-Generator entnommen wird (Bild 1). Die Ausgangsspannung des Verstärkers ist so einzustellen, daß der Verstärker auf keinen Fall übersteuert wird. Als Beispiel sollen 10 V Ausgangsspannung am 4- Ω -Ausgang eines 25-W-Verstärkers dienen, der mit einem 4- Ω -Widerstand als Lastwiderstand R_a belastet ist. Dann fließt durch den Lastwiderstand R_a ein Nf-Strom von

$$I = \frac{U}{R}, \text{ also } I = \frac{10 \text{ V}}{4 \Omega} = 2,5 \text{ A}$$

Dieser Strom fließt aber auch durch den R_i des Verstärkers, und das hat hier einen Spannungsabfall zur Folge. Wird nun der Lastwiderstand R_a abgeschaltet, dann fließt auch durch den Innenwiderstand R_i des Verstärkers kein Strom mehr. Der Spannungsabfall am R_i wird dann zu Null, was sich durch eine Erhöhung der Ausgangsspannung bemerkbar macht. Angenommen, die Ausgangsspannung steigt bei Leerlauf (abgeschalteter Lastwiderstand R_a) von 10 V auf 10,5 V an. Die Differenz von 0,5 V entspricht dann dem Spannungsabfall am Innenwiderstand R_i im belasteten Zustand des Verstärkers. Damit können wir den Innenwiderstand R_i berechnen, denn:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ also } R_i = \frac{0,5 \text{ V}}{2,5 \text{ A}} = 0,2 \Omega$$

Für diese Messung soll nach Möglichkeit ein entsprechend belastbarer induktionsfreier Widerstand als Lastwiderstand R_a benutzt werden. Die Verwendung eines Lautsprechers verringert die Genauigkeit der Messung.

Muß der angegebene Wert des Lastwiderstandes eingehalten werden?

Was passiert eigentlich, wenn der als Belastung dienende Widerstand R_a nicht dem am Verstärkerausgang angegebenen Wert entspricht? Zum Beantworten dieser Frage setzen wir aus Vereinfachungsgründen voraus, daß der Innenwiderstand R_i des Verstärkers gleich 0Ω ist. Dann ist die Ausgangsspannung lastunabhängig, also konstant.

Wird der Lastwiderstand R_a unter dieser Voraussetzung größer, dann wird dem Verstärker ein kleinerer Nf-Strom entnommen, denn:

$$I = \frac{U}{R}$$

Wenn man aber dem Verstärker einen kleineren Nf-Strom entnimmt, wird auch die entnommene Nf-Leistung kleiner, denn

$$P = U \cdot I \text{ oder } P = I^2 \cdot R$$

Anders liegen die Verhältnisse, wenn der Lastwiderstand R_a kleiner wird als

der am Verstärkerausgang angegebene günstigste Wert. Hierbei wird nämlich der Verstärker stärker belastet, ihm wird mehr Strom entnommen, die Ausgangsleistung wird größer. Das klingt verlockend, hat aber sehr schnell eine Grenze. Bei Überlastung eines Verstärkers steigt der Klirrfaktor sehr stark an (Bild 2). Eine Erhöhung des Klirrfaktors ist sicher nicht im Sinne der Hi-Fi-Freunde!

Ist Leistungsanpassung des Lautsprechers an den Verstärkerausgang möglich?

Leistungsanpassung ist bei Nf-Leistungsverstärkern nicht üblich, ja nicht einmal möglich! Für Leistungsanpassung muß $R_a = R_i$ gemacht werden.

Dagegen sprechen aber bereits die Ausführungen zu dem eingangs genannten Punkten 1 und 2. Leistungsanpassung würde aber nicht nur eine Erhöhung des Klirrfaktors verursachen, sie würde auch eine Erhöhung des Innenwiderstandes R_i zur Folge haben und – würde man wirklich geeignete Verstärker bauen wollen – unwirtschaftlich sein. „Richtige“ Anpassung eines Laut-

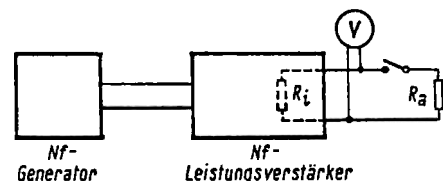


Bild 1. Schaltung zum Messen des Innenwiderstandes eines Nf-Leistungsverstärkers

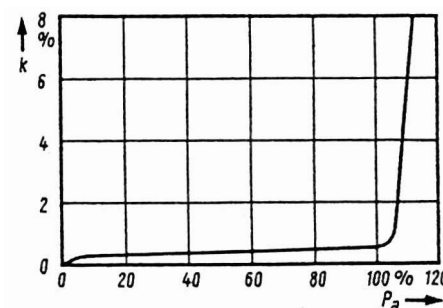


Bild 2. Beispiel für die Abhängigkeit des Klirrfaktors von der Ausgangsleistung bei einem Nf-Leistungsverstärker

sprechers an einen Verstärker zum völligen Ausnutzen der Verstärker-Nennleistung unter Einhalten aller übrigen Verstärkerdaten ist Widerstands-anpassung.

Und nun noch einige Überlegungen zum Innenwiderstand eines Verstärkers. Der bei qualitativ hochwertigen Verstärkern sehr kleine Innenwiderstand R_i hat einen guten Grund. Lautsprecher lassen sich auch als Mikrofon benutzen. Große Lautsprecher sind dazu zwar weniger geeignet, aber grundsätzlich gilt für alle Lautsprecher, daß sie eine Wechselspannung abgeben, wenn ihre Membran in Schwingungen versetzt, also bewegt, wird. Was oder wer diese Membranbewegungen hervorruft, ist dabei gleichgültig, der Lautsprecher wirkt auf alle Fälle als Generator. Weniger bekannt ist dagegen, daß jeder Generator, dessen Ausgangsspannung unmittelbar durch mechanische Energie entsteht, (Drehspulmeßwerk, Mikrofon, Lautsprecher, Kraftwerkgenerator) durch Kurzschluß der Ausgangsklemmen sehr wirkungsvoll abgeregelt werden kann. Dieser Effekt wird sehr anschaulich in einem Vielfachmeßinstrument ausgenutzt, in dem – für Transportzwecke – der Meßbereichschalter in eine besondere Stellung geschaltet werden kann, in der das Meßwerk kurzgeschlossen ist. Dadurch sind die Bewegungen der Drehspule so stark gedämpft, daß kein Schaden entstehen kann. Bei kurzgeschlossenen Meßwerkklammern ist der Zeiger des Meßwerkes durch die stärksten Schüttelversuche nur noch unwesentlich vom Nullpunkt wegzubekommen. Allerdings dürfen dem Meßwerk keine Vorwiderstände vorgeschaltet sein.

Und nun zurück zum Thema. In den einschlägigen Erklärungen über die Wirkungsweise eines Lautsprechers heißt es üblicherweise, daß sich die Membran des Lautsprechers entsprechend der Frequenz der ihm zugeführten Wechselspannung bewegt. Nun, das wäre zu schön, um in der Praxis tatsächlich so einfach der Fall zu sein. Machen wir also einen Versuch. An einem Stück Bindfaden hängen wir einen Gegenstand (z. B. Schlüssel) auf. Solange wir dieses „Pendel“ nicht berühren, hängt es ganz ruhig senkrecht nach unten. Ziehen wir es aber etwas zur Seite und lassen dann los, dann schwingt das Pendel über den Ruhepunkt hinaus hin und her. Erst nach geraumer Zeit wird es wieder still hängen.

Das gleiche Prinzip gilt auch für die Lautsprechermembran. Wenn die Klemmen des Lautsprechers nicht kurzgeschlossen sind, schwingt die Membran nach einem Impuls (z. B. ein Paukenschlag) auch noch eine geraume Zeit, bis sie wieder zur Ruhe kommt. Und jede Schwingung, die sie macht, hören wir, obwohl wir eigentlich nur den Paukenschlag hören wollten. Was ist dagegen zu tun? Die Klemmen des Lautsprechers lassen sich kaum kurzschließen, denn dann ist gar nichts zu hören. Wenn wir aber unseren Verstärker so konstruieren,

daß er einen sehr kleinen Innenwiderstand hat ($R_i = 0 \Omega$ wäre ideal), dann brauchen wir keine Klemmen kurzzuschließen. Der Effekt ist dann der gleiche, wie bei dem vorhin beschriebenen Meßinstrument. Und dann ist auch zu erwarten, daß die Membran fast nur noch die Bewegung macht, die dem Paukenschlag entspricht. Dann erst ist's Hi-Fi! Vorher nicht! Das ist zwar nur ein Grund, weshalb Verstärker mit sehr kleinem Innenwiderstand R_i gebaut werden, aber der wichtigste.

Einfach ist es allerdings nicht, Verstärker mit kleinem Innenwiderstand R_i zu konstruieren, denn der Innenwiderstand soll möglichst frequenzunabhängig sein. Das kostet materiellen Aufwand und das „Gewußt wie“, und das lassen sich die Hersteller qualitativ hochwertiger Geräte bezahlen.

Wenn nun aber ein Nf-Leistungsverstärker einen sehr kleinen Innenwiderstand R_i hat, dann ist auch das Anpassungsproblem erheblich einfacher und übersichtlicher. Statt Widerstands-anpassung ist dann nur noch Spannungs-anpassung erforderlich. Dann kann ein 1-W-Lautsprecher oder auch nur ein 200-mW-Kopfhörer an einen 100-W-Verstärker angeschlossen werden, ohne daß es raucht. Es muß dann nur dafür gesorgt werden, eventuell mit einem Transformator, daß der Lautsprecher oder der Kopfhörer die Spannung erhält, die er verträgt. Genau, wie beim Anschluß einer 8-Volt-Haustürklingel an die 220-V-Steckdose ein Transformator erforderlich ist, muß dann auch für einen 2-V-Lautsprecher ein Transformator benutzt werden, wenn er an den 40-V-Ausgang eines Verstärkers angeschlossen werden soll und ein 800- Ω -Kopfhörer kann dann ohne weiteres an den 4- Ω -Ausgang eines 40-W-Verstärkers angeschlossen werden, also ohne Transformator. Am 4- Ω -Ausgang liefert ein 40-W-Verstärker nämlich eine Spannung von rund 12,6 V, und der 200-mW-Kopfhörer verträgt 12,6 V. Das läßt sich durch Umstellen der Formel

$$P = \frac{U^2}{R}$$

einfach überprüfen. Nehmen wir als Beispiel die Werte des letzten Absatzes, dann ist

1. der 40-V-Ausgang des 100-W-Verstärkers ein 16- Ω -Ausgang, denn:

$$R = \frac{U^2}{P}, \text{ also } R = \frac{(40 \text{ V})^2}{100 \text{ W}} = 16 \Omega$$

2. der 2-V-Lautsprecher mit einer angenommenen Impedanz von $Z = 4 \Omega$ ein 1-W-Lautsprecher, denn:

$$P = \frac{U^2}{R}, \text{ also } P = \frac{(2 \text{ V})^2}{4 \Omega} = 1 \text{ W}$$

3. der 800- Ω -Kopfhörer mit einer Nennleistung von 200 mW (= 0,2 W) ein 12,6-V-Kopfhörer, denn

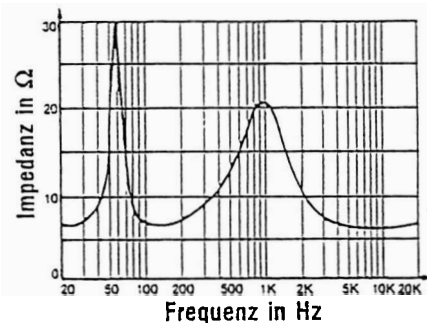
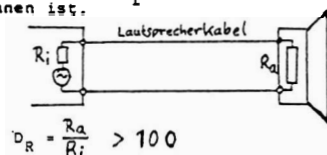
$$U = \sqrt{P \cdot R}, \text{ also } U = \sqrt{0,2 \text{ W} \cdot 800 \Omega} =$$

$$U = 12,6 \text{ V}$$

Jetzt wird mancher Leser einwenden, daß an Lautsprechern und Kopfhörern ja niemals die Spannung und nur selten die Leistung angegeben ist, während an Verstärkern allenfalls ein 100-V-Ausgang zu finden ist. Das stimmt, und man muß sich wirklich fragen: Warum steht's eigentlich nicht dran?

Der Dämpfungsfaktor

Der Dämpfungsfaktor D_R gibt das Verhältnis der Nennleistungsimpedanz R_a zum wirklichen Ausgangswiderstand R_i des Leistungsverstärkers. Dadurch kann der Verstärker die Bewegung der Lautsprechermembran regeln, wenn ein Signal aufhört. Ein Verstärker mit einem hohen Dämpfungsfaktor wirkt auf den Lautsprecher wie ein „Kurzschluß“, der die Schwingung bremst, wenn das Signal ausklingt. Der Lautsprecher wirkt nämlich wie ein elektrischer Generator, wenn sich die Schwingspule bewegt und der niedrige Innenwiderstand des Verstärkers absorbiert die Energie des erzeugten Signals und dämpft die Schwingung der Membran. Dämpfungsfaktoren über 100 wirken nicht wesentlich verbessernd, weil der Widerstand des Lautsprecherkabels dem Ausgangswiderstand R_i des Verstärkers hinzuzurechnen ist.



Änderung der Lautsprecherimpedanz mit der Frequenz