Technischer

Bericht

B 201/2010 | Begrenzung des Abhörpegels bei Kopfhörern

Roman Stumpner, Sebastian Goossens - Produktionssysteme Audio

Institut für Rundfunktechnik

Bericht
Nr. B 201/2010

Begrenzung des Abhörpegels bei Kopfhörern

Inhaltsangabe

Einige Gehörschädigungen von Mitarbeitern im Hörfunk-Produktionsbetrieb durch kurzzeitig zu hohe Kopfhörerpegel machen technische Vorkehrungen zur Begrenzung der Pegel (z.B. bei Fehlschaltungen der Signalquelle) erforderlich. Die technischen Lösungen und die festgelegten Grenzwerte sollen sowohl den Gesundheitsschutz sicherstellen, als auch den praktischen Produktionsbetrieb unter der Verwendung von pegelbegrenzten Kopfhörern ermöglichen.

Dazu werden verschiedene Verfahren zur Kopfhörerpegelbegrenzung untersucht und in Ihren Eigenschaften gegenübergestellt. Zwei Verfahren, die sehr einfache Spitzenwertbegrenzung und die etwas aufwendigere Mittelwertbegrenzung, kommen ohne Stromversorgung aus und können direkt im Kopfhörer integriert werden. Auf der Grundlage bestehender Vorschriften zum Gehörschutz werden sinnvolle Begrenzungspegel, das Messverfahren und die Messanordnung festgelegt.

Als Maximalpegel werden im Fall der Spitzenwertbegrenzung 107 dB(A) und im Fall der Mittelwertbegrenzung 93 dB(A) zugelassen. Mit diesen Grenzwerten kann ein typisches Musiksignal mit beiden Begrenzungsverfahren einen Pegel bis zu 93 dB(A) erreichen und dennoch wird die Schädigung des Gehörs durch kurze zu hohe Schallpegel vermieden.

Die Grenzwerte sind allerdings so hoch ausgelegt, dass die maximale Hörzeit bei dauerhaft hohem Pegel (z.B. 1,5 Stunden bei 93 dB(A)) eigenverantwortlich kontrolliert werden muss.

Gegenüber aktuell lieferbaren Kopfhörern mit Spitzenwertbegrenzung auf 98 dB(A) dürfte die vorgeschlagene Erhöhung des Begrenzungswertes auf 107 dB(A) die Akzeptanz der Pegelbegrenzung in manchen Produktionsbereichen deutlich verbessern.

München, Februar 2010

Urheberrechtsvermerk

Dieses Dokument und alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigung, Übersetzung, Verteilung, Mikroverfilmung, Übertragung, Darstellen, Veröffentlichung sowie Einspeicherung in und/oder Verarbeitung auf elektronischen Systemen darf nur mit vorheriger schriftlicher Erlaubnis des Instituts für Rundfunktechnik erfolgen. Urheberrecht, Warenzeichen oder andere Hinweise dürfen weder verändert noch entfernt werden.

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1 Wann ist Schall gesundheitsschädlich? 1
2 Typen der Pegelbegrenzung 1
3 Zur Problematik der Pegelbegrenzung 2
4 Welche Pegelbegrenzung? 3
5 Messungen an am Markt verfügbaren Produkten 4
6 Untersuchung an passiven Schaltungen zur Pegelbegrenzung 6
7 Literatur 8

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

1 Wann ist Schall gesundheitsschädlich?

Die Begrenzung des Abhörpegels bei Kopfhörern zur Vermeidung von Gehörschäden ist zunächst mit der Frage verbunden, wie Schall die Gesundheit gefährdet. Die physikalisch maßgebliche Größe ist die Schallenergie, die auf das Gehör einwirkt. Die Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung (siehe [1], auch [2]) erlaubt eine tägliche Schallbelastung von 85 dB(A) über 8 Stunden (Tages-Lärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$). Es wird davon ausgegangen, dass sich das Gehör in der verbleibenden Tageszeit bei einem Schallpegel von unter 70 dB erholen kann. Bei einer höheren Schallbelastung ist mit Gehörschäden zu rechnen. Eine Verdopplung der Schallintensität (+3 dB) halbiert die zulässige Einwirkungszeit. Ein dauernder Schallpegel von 88 dB(A) reduziert die Zeit bereits auf 4 Stunden pro Tag, 91 dB(A) auf 2 Stunden und bei 97 dB(A) ist die gleiche Belastung bereits nach 30 Min. erreicht und bei 105 dB(A) nach 4,8 Minuten. Bei ca. 140 dB treten bereits bei sehr kurzen einmaligen Schallereignissen irreparable Schäden am Gehör ein. (Weitere Infos siehe auch [3]).

Die LärmVibrationsArbSchV [1] schreibt zwei so genannte Auslösewerte vor. Den unteren Auslösewert von $L_{EX,8h}$ = 80 dB(A) bzw. einen Spitzenpegel L_{peak} = 135 dB(C) und den oberen Auslösewert von $L_{EX,8h}$ = 85 dB(A) bzw. einen Spitzenpegel L_{peak} = 137 dB(C). Mit Erreichen dieser Auslösewerte ist der Arbeitgeber zu gewissen Maßnahmen verpflichtet. So sind mit Erreichen des unteren Wertes Gehörschützer zur Verfügung zu stellen. Der obere Wert verpflichtet den Arbeitnehmer diese zu tragen, wenn der Lärmpegel am Arbeitsplatz nicht gesenkt werden kann.

Diese Richtlinien sind für Kopfhörer nicht direkt übertragbar. Die höchstzulässigen Schallbelastungen sollten jedoch auch Grundlage für pegelbegrenzte Kopfhörer sein. Eine maximale Schallbelastung von 85 dB(A) über 8 Stunden entsprechend dem Zusammenhang in **Bild 1** wird deshalb auch als Grundlage für die Begrenzung des Abhörpegels bei Kopfhörern als sinnvoll angesehen.

2 Typen der Pegelbegrenzung

Der Schutz gegen zu hohe Schallpegel bei Kopfhörern konkurriert natürlich auch mit anderen Forderungen wie Handhabung und Kosten. Es wurden deshalb drei grundlegende Ansätze erarbeitet, die man bezogen auf den gesundheitlichen Aspekt als „Minimallösung, Kompromisslösung und Optimallösung“ bezeichnen könnte.

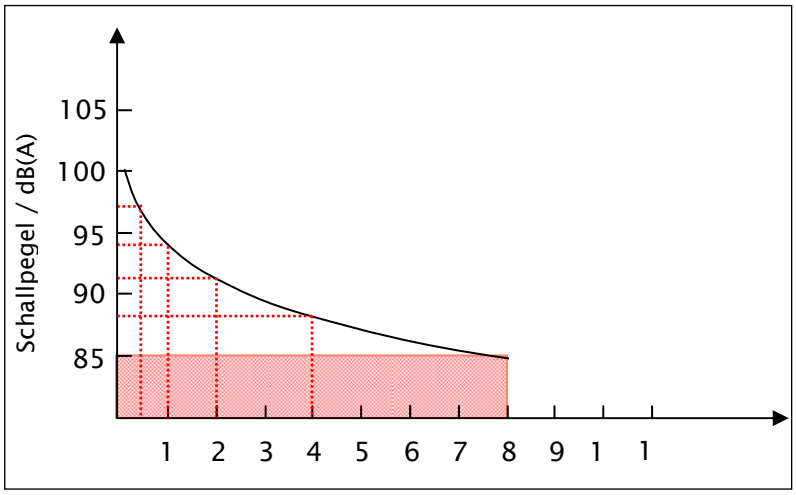


Bild 1: Maximale tägliche Schallbelastung (85 dB / 8Std.)

Typ 1

Die Begrenzung auf höchstzulässigen Spitzenschallpegel (Minimallösung).

Die Philosophie, die hier zugrunde liegt, ist die Vermeidung einer Unfallsituation. Dem Hörer wird eigenverantwortlich überlassen, welchen Schallpegel er seinen Ohren wie lange zumutet. Wenn aber versehentlich ein sehr hoher Signalpegel auf den Kopfhörer gelangt, der bereits nach kurzer Zeit zur Gehörschädigung führen kann, soll auf einen Höchstpegel begrenzt werden, der unmittelbare Gehörschäden verhindert, wenn der Pegel in kurzer Zeit reduziert oder der Kopfhörer abgenommen wird.

Vorteil: Sehr einfache technische Lösungen, auch ohne Stromversorgung, sehr kostengünstig.

Nachteil: Es sind Pegel möglich, die nach kurzer Zeit die zulässige tägliche Schallbelastung überschreiten, Gehörschäden durch zu hohen Dauerschallpegel sind deshalb möglich.

Typ 2

Die Begrenzung auf höchstzulässigen Dauerschallpegel (Kompromisslösung).

Von einer bestimmten Hördauer ausgehend, wird auf einen entsprechenden Schallpegel begrenzt, der für diese Dauer noch keine gesundheitlichen Schäden erwarten lässt. Die Vermeidung der Unfallsituation ist mit eingeschlossen.

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Vorteil: Einfache technische Lösungen, auch ohne Stromversorgung, Vermeidung von Gehörschäden durch zu hohen Dauerschallpegel ist möglich.

Nachteil: Hörzeit muss eigenverantwortlich kontrolliert werden, kurzes sehr lautes Abhören ist nicht möglich.

Typ 3
Die Kontrolle der höchstzulässigen täglichen Schallbelastung (Optimallösung).

Der Hörer bestimmt mit welchem Schalldruck er abhört. Entweder laut und kurz oder leise und lange. Gemessen wird das Produkt aus Schalldruckquadrat und Zeit. Bei Überschreitung wird ein unschädlicher Dauerschallpegel eingestellt (oder ein entsprechender Hinweis gegeben, dass die tägliche Schallbelastung überschritten ist). Die Richtlinien zur Vermeidung von Gehörschäden werden also direkt umgesetzt.

Vorteil: tägliche Schallbelastung wird automatisch kontrolliert.

Nachteil: Komplizierte technische Lösungen, Geräte nur mit Stromversorgung, teuerste Lösung, personenbezogen wegen Pegel-Zeitmessung.

3 Zur Problematik der Pegelbegrenzung

Die Begrenzung von Schalldruckpegeln bei Kopfhörern ist mit einer Reihe von Problemen verbunden, auf die im Folgenden kurz hingewiesen werden soll.

Ort der Pegelmessung:
Der Begrenzung eines Signals geht zunächst dessen Messung voraus. Im vorliegenden Problem ist die interessierende Größe der Schalldruck. Dieser müsste eigentlich im Ohrkanal oder zumindest am Ohr mit Hilfe eines Mikrofons stattfinden, was kaum praxisgerecht ist. Die alternative Messung des elektrischen Signalpegels erfordert deshalb die Kalibrierung über ein künstliches Ohr, um auf diese Weise das elektroakustische Übertragungsmaß zu berücksichtigen, das bei verschiedenen Kopfhörertypen sehr unterschiedlich sein kann. Eine entsprechende Schaltung zur Pegelbegrenzung muss also für jeden Kopfhörertyp speziell angepasst werden. Das elektroakustische Übertragungsmaß zum Trommelfell zeigt einen nicht linear verlaufenden Frequenzgang. Je nach Art der Pegelmessung und anschließender Signalbegrenzung kann es bei der Begrenzung des elektrischen Signals deshalb zu frequenzabhängigen Überschreitungen der Schalldrücke im Kopfhörer kommen. Die Pegelbegrenzung kann also vom spektralen Inhalt des Signals abhängig sein.

Methode der Pegelmessung:
Die für die Gefährdung des Gehörs maßgebliche Größe ist – abgesehen von sehr hohen Spitzenpegeln - die Schallenergie. Ihre Messung erfordert korrekterweise die Erfassung des Effektivwertes. Schallpegelmesser zeigen immer einen Effektivwert an, bei dem die Integration von genormten Zeitkonstanten abhängt. Diese relativ aufwendige Pegelmessung wäre entsprechend auch bei einer Pegelbegrenzung für Kopfhörer notwendig. Eine entsprechende Begrenzerschaltung würde dann das Signal bei Überschreitung auf eben diesen gemessenen Wert herunterregeln oder begrenzen. Die Effektivwertmessung setzt aber ein höheres Niveau an Signalverarbeitung und damit an schaltungstechnischem Aufwand voraus. In der Praxis bedeutet das aktive Schaltungen mit Stromversorgung. Für einfachere preisgünstige Lösungen wie passive Schaltungen ohne Stromversorgung dürfte eine solche Pegelmessung kaum realisierbar sein (und ist auf dem Markt auch nicht zu haben). Hier kommt beispielsweise die wesentlich einfachere Spitzenwertmessung und entsprechende Begrenzung in Frage (bei einfachen Diodenschaltungen finden Messung und Begrenzung in einem Vorgang statt). Diese hat jedoch den Nachteil, dass Signale mit unterschiedlichem Crest-Faktor (Scheitelfaktor CF) unterschiedlich aussteuerbar sind. Erlaubt man beispielsweise für ein Musiksignal mit Crestfaktor entsprechend 15 dB (normale Musiksignale liegen zwischen 12 dB und 18 dB) einen maximalen Abhörpegel von 85 dB, dann darf die Begrenzung des Spitzenwertes erst bei 100 dB einsetzen. Ein Sinus-Signal käme unverzerrt auf 97 dB. Bei vollständiger Übersteuerung würden bei beiden Signalen 100 dB erreicht werden. Bei nicht ideal steiler Begrenzungskennlinie steigt der Wert weiter an. Realistisch sind mindestens 2 dB. Das Ergebnis beträgt dann 102 dB Maximalpegel. Weiter ist zu bedenken, dass die Spitzenwertbegrenzung für alle Frequenzen gleichermaßen gilt. Findet die Kalibrierung bei 1 kHz statt, können je nach elektroakustischem Übertragungsmaß bei anderen Frequenzen deutlich höhere Schallpegel auftreten. Je nach Signalspektrum und Übertragungsmaß sind dann die 102 dB weiter überschreitbar.
Lässt man aufgrund des CF-Problems außerdem ein „gelegentliches lauteres“ (verzerrungsfreies) Abhören zu, beispielsweise um 10 dB, dann kann der Kopfhörer Schalldruckpegel von über 112 dB liefern.
Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Spitzenwertbegrenzung nicht

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

geeignet zur Begrenzung eines zu hohen Dauerschallpegels und damit zur Vermeidung von Gehörschäden durch zu langes lautes Abhören. Sie erfüllt ausschließlich die Forderung nach Vermeidung von Unfällen (Typ 1) durch unerwartet hohe Schallpegel.

Die Begrenzung auf einen Dauerschallpegel nach obiger Einteilung Typ 2 erfordert mindestens die Messung eines einfachen Mittelwertes (beispielsweise Gleichrichter mit RC-Glied). Die Begrenzung muss also derart erfolgen, dass alle Signale eines bestimmten Mittelwertes verzerrungsfrei wiedergegeben werden. Diese Lösung ist bezüglich des Crestfaktor-Problems erheblich günstiger, da eine entsprechende Aussteuerungsreserve entfällt. Die zusätzlichen Oberschwingungen gehen ebenfalls in die Mittelwertmessung ein. Damit können mit dieser Methode erheblich niedrigere Begrenzungspegel angesetzt werden als bei der Spitzenwertbegrenzung. Die Begrenzung kann beispielsweise über einen Regelkreis ähnlich einem Kompressor erfolgen.

Einfügedämpfung:
Je nach schaltungstechnischer Ausführung kann ein Kopfhörer mit Pegelbegrenzung unempfindlicher sein (z.B. 14 dB) als der entsprechende Kopfhörer ohne Begrenzerschaltung. Dies gilt insbesondere für passive Schaltungen, die fest im Kopfhörer integriert sind und keine Stromversorgung benötigen. Diese Problematik hat zum einen mit Vorwiderständen zu tun, die in Serie zur Kopfhörerimpedanz liegen, um im Begrenzungsfall Kurzschlüsse an Verstärkerausgängen zu vermeiden. Andere Gründe können in der Erzeugung von Regelspannungen liegen, die höher sein müssen als die Kopfhörerspannung. Durch starkes Absenken der Kopfhörerspannung gegenüber dem Signal des Verstärkers kann eine beliebige „Relativverstärkung“ erzeugt werden (andernfalls währen passive Spannungsvervielfacher notwendig).

4 Welche Pegelbegrenzung?

Die verschiedenen Typen der Pegelbegrenzung bei Kopfhörern unterscheiden sich deutlich sowohl hinsichtlich des gesundheitlichen Aspekts als auch ihrer Auswirkungen auf die Nutzung und Kosten von Kopfhörern. Für welche man sich entscheidet ist letztlich eine Frage wie die Gefahr von Gehörschäden und deren Folgen eingeschätzt wird. Die Frage nach der Begrenzung des Maximalpegels sollte sich jedoch bei allen Typen nur an den derzeit geltenden Richtlinien zur Vermeidung von Gehörschäden orientieren. Die Pegelbegrenzung nach Typ 3 setzt diese Richtlinien direkt um, sie braucht deshalb nicht weiter beschrieben zu werden. Die anderen beiden Typen setzen gewisse Annahmen bezüglich Hördauer und Abhörpegel voraus.

Vorschlag für maximale Schallpegel:

Es kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass ein Kopfhörer nicht 8 Stunden am Tag ununterbrochen mit Maximalpegel genutzt wird. Sinnvoller erscheinen Zeiten zwischen ein und zwei Stunden. Damit ergeben sich maximale Pegel von 91 dB(A) – 94 dB(A). Vorgeschlagen wird ein Wert von 93 dB(A) und damit verbunden eine ununterbrochene Hörzeit von 1,5 Stunden.

Davon ausgehend ergeben sich unterschiedliche Maximalpegel für die unterschiedlichen Begrenzungstypen:

Die Pegelbegrenzung nach Typ 1 dürfte in der Regel eine einfache Spitzenwertbegrenzung sein, dem Pegel von 93 dB muss deshalb ein Signal mit einem bestimmten Crestfaktor zugeordnet werden. Für komprimierte und unkomprimierte Musiksignale liegt dieser im Bereich von ca. 9-18 dB. Ausgehend von einem mittleren Wert von CF=14 dB wird deshalb ein Spitzenschalldruck von maximal 107 dB(A) vorgeschlagen. Dieser Wert bedeutet folgendes: Gelangt ein Signal auf den pegelbegrenzten Kopfhörer, das zu einer völligen Übersteuerung der Begrenzerschaltung führt, darf der Schalldruckpegel nicht weiter anwachsen als der Maximalpegel von 107 dB. Ist der Hörer diesem Pegel 10 s ausgesetzt verbraucht er 5% der höchstzulässigen täglichen Schallbelastung.

Die Pegelbegrenzung nach Typ 2 setzt dagegen mindestens die Erfassung eines Signalmittelwertes voraus und ist deshalb weniger vom Crestfaktor abhängig. Der maximale Pegel soll hier also 93 dB(A) betragen.

Weitere Anforderungen:
Jede Schaltung zur Pegelbegrenzung kann nur eine maximale elektrische Signalspannung verkraften. Bei Überschreiten dieser Spannung und der damit verbundenen Zerstörung der Pegelbegrenzung muss eine Unterbrechung zu den elektroakustischen Wandlern des Kopfhörers erfolgen. Auf keinen Fall darf dabei die hohe Signalspannung auf die Wandler geraten.

Messbedingungen:
Der Maximalpegel darf durch kein Signal überschritten werden können. Es reicht deshalb nicht aus, diesen Pegel mit einem Sinuston einer bestimmten Frequenz zu ermitteln. Vorgeschlagen wird deshalb als Testsignal Rosa Rau-

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

schen zu verwenden. Das Testsignal muss dabei im Pegel derart erhöht werden, dass es den gesamten zulässigen Spannungsbereich der Pegelbegrenzung abdeckt.

Der Maximalpegel sollte als A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel mit Zeitkonstante „Fast“ bestimmt werden. Die Mittelungsdauer sollte mindestens 30 s betragen.

Die Messung sollte in Verbindung mit einem künstlichen Ohr erfolgen, dessen akustische Impedanz der des menschlichen Ohrs entspricht (IEC R318).

Bemerkung:
Die Norm DIN EN 50332 „Elektroakustische Geräte: Kopfhörer und Ohrhörer in Verbindung mit tragbaren Audiogeräten – Verfahren zur Messung des maximalen Schalldruckpegels und Angaben zu Grenzwerten“ schreibt vor, das programm-simulierende Rauschen nach IEC 60268-1 zu verwenden.
Dieses Rauschsignal besitzt eine spektrale Leistungsdichte, die dem Durchschnitt einer Vielzahl von Programmquellen (darunter auch Musik und Sprache) entspricht. Dies macht Sinn, wenn Kopfhörer in Verbindung mit ganz bestimmten Abspielgeräten gesehen werden können.
Im Studiobereich kann er aber Bestandteil einer beliebig vernetzten Signalkette sein, bei der es auch zu unerwarteten Rückkopplungen mit sehr hohen Pegeln und unbekannter Frequenz kommen kann.
Programm-simulierendes Rauschen mit einem Abfall zu hohen Frequenzen könnte solche selektiven Signale höherer Frequenz möglicherweise zu stark unterbewerten, deshalb wird hier Rosa-Rauschen als Testsignal vorgeschlagen.

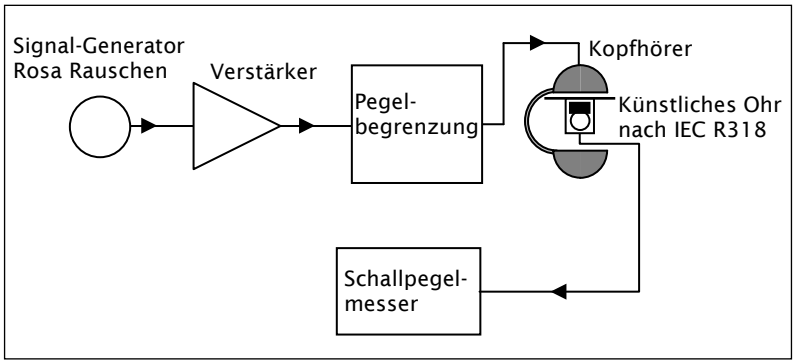


Bild 2: Messaufbau

Zusammenfassung:
Messung: A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel, Zeitkonstante Fast, Mittelung 30 s, Mess-Signal: Rosa Rauschen

Pegelbegrenzung	Maximalpegel
Typ 1 mit Spitzenwertbegrenzung	107 dB(A)
Typ 2 mit Mittelwertbegrenzung	93 dB(A)

Für unterschiedliche Signale ergeben sich für die Pegelbegrenzungstypen folgende Abhörpegel:

Typ Pegelbegrenzung Crest Faktor (CF)	Musik 18 dB	Musik 14 dB	Musik 9 dB	Sinus 3 dB	Max.Pegel
Typ1 mit Spitzenwertbegr.	89 dB	**93 dB**	98 dB	104 dB	107 dB
Typ2 mit Mittelwertbegr.	93 dB	**93 dB**	93 dB	93 dB	93 dB

Diese Werte sind Richtwerte, sie können je nach Eigenschaften der Kopfhörer und Begrenzungsschaltungen davon abweichen (z.B. Art der Kennlinien, Art der Mittelwertbildung).

5 Messungen an am Markt verfügbaren Produkten

Auf dem Markt existieren derzeit noch wenige Lösungen, die speziell für die Pegelbegrenzung von Kopfhörersignalen vorgesehen sind. Nicht dazugezählt werden Kompressoren oder Limiter für allgemeine Anwendungen, die dafür natürlich ebenso eingesetzt werden könnten.

Produkte der Firma A

Es handelt sich um passive Schaltungen ohne Stromversorgung. Die Pegelbegrenzer werden nicht einzeln verkauft (nur im Falle einer Reparatur). Die Kopfhörer werden von Firma A mit einem passenden Limiter versehen (fest ins Kabel eingelötet) und kalibriert. Je nach Kopfhörerimpedanz kommen dabei drei verschiedenen Limitertypen zum Einsatz, die drei Impedanzbereiche abdecken. Der Begrenzungspegel deckt einen Bereich von 85-110 dB(A) +/-2 dB ab.

Firma A liefert außerdem Kopfhörer mit bereits eingebauten Pegelbegrenzungen. Darunter auch Kopfhörer von anderen Herstel-

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

lern. Der Kopfhörer A wurde getestet. Es wird im Folgenden darüber berichtet.

Test Kopfhörer A mit Pegelbegrenzung von Firma A (Bild 3)

Der Kopfhörer wird mit einer Pegelbegrenzung von 93 dB(A) geliefert. Die Schaltung ist in der Kopfhörerkapsel integriert und von außen nicht erkennbar. Er ist jedoch beidseitig mit dem Hinweis „Level Limited“ versehen. Die Pegelbegrenzung entspricht dem hier definierten Typ 2.

Ein subjektiver Hörtest hat folgenden Eindruck ergeben:
Die Klangeigenschaften zeigen gegenüber dem Kopfhörer ohne Pegelbegrenzung keine hörbaren Beeinträchtigungen. Der Klirrfaktor steigt erst mit dem Begrenzungseinsatz an. Es sind dann deutliche Verzerrungen wahrnehmbar.
Bei gleichem Signalpegel am Verstärkerausgang ist der Kopfhörer deutlich leiser als der gleiche Kopfhörer ohne Pegelbegrenzung.

Messungen haben folgendes ergeben:

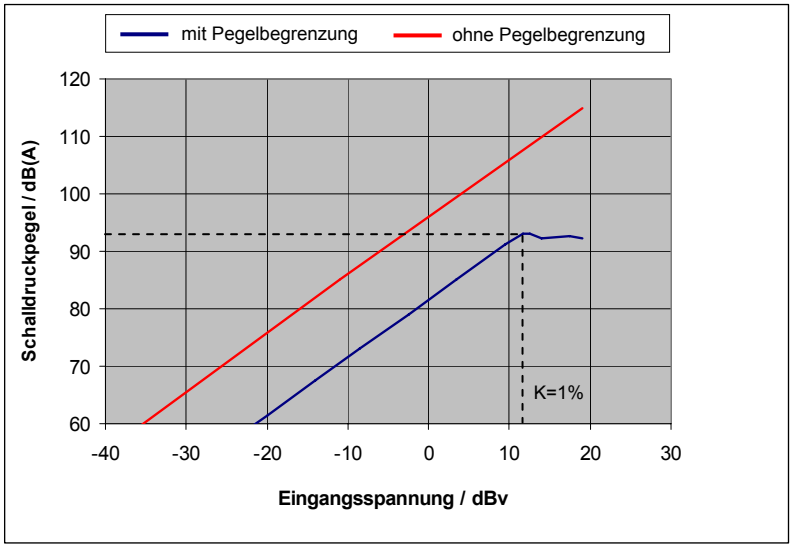


Bild 3: Kopfhörer Firma A - Übertragungskennlinie (bei 1kHz)

1) Für die Pegelbegrenzung wurden folgende Werte gemessen:
Sinus 1kHz: 93 dB(A)
Rechteck 1kHz: 93.6 dB(A)
Rosa Rauschen 93 dB(A)

2) Klirrfaktor von ca. 1% (alle Oberschwingungen mindestens 40 dB gedämpft) wird bei 1 kHz an der Begrenzungsschwelle von 93 dB(A) erreicht.

3) Im linearen Übertragungsbereich zeigt der Frequenzgang keine Unterschiede zum Kopfhörer ohne Pegelbegrenzung.

4) Die Einfügungsdämpfung der Pegelbegrenzung beträgt ca. 14 dB (Grund hierfür ist die Erzeugung der Regelspannung, siehe passive Schaltungen weiter unten.)

5) Die Pegelbegrenzung erfolgt über eine Signal-Mittelwertbildung und Regelschaltung.

Bemerkung:
Die Art der Pegelbegrenzung erlaubt es, den Kopfhörer für alle Signalformen bis nahe 93 dB(A) zu nutzen.

Produkte der Firma B (Bild 4)

Die Firma B liefert Kopfhörer mit eingebauter Pegelbegrenzung (Typ 1). Außerdem können Kopfhörer nachgerüstet werden.

Der Kopfhörer B wurde getestet:

1) Für die Pegelbegrenzung wurden folgende Werte gemessen:
Sinus 1kHz: 95 dB(A)
Rechteck 1kHz: 98 dB(A)
Rosa Rauschen: 98 dB(A)

2) Klirrfaktor von ca. 1% (alle Oberschwingungen mindestens 40 dB gedämpft) wird bei 1 kHz bei etwa 93 dB(A) erreicht.

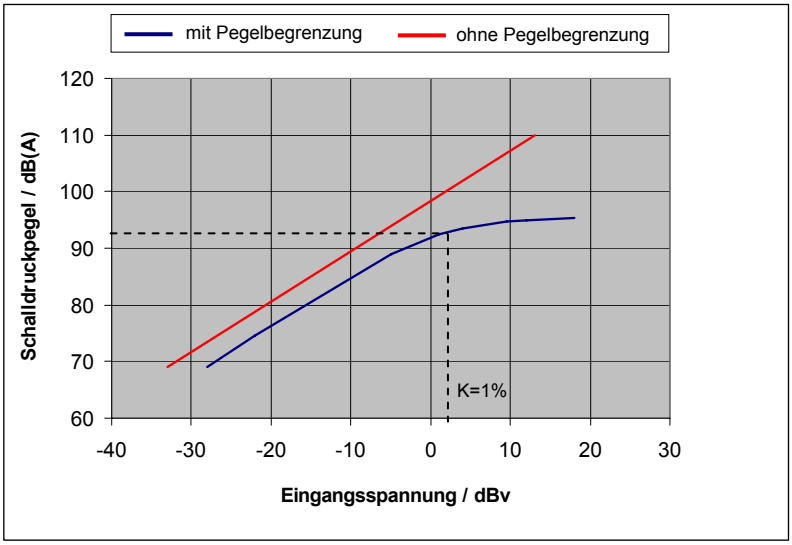


Bild 4: Kopfhörer Firma B - Übertragungskennlinie (bei 1kHz)

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

3) Die Einfügungsdämpfung der Pegelbegrenzung beträgt ca. 5 dB (Grund: Vorwiderstand)

4) Pegelbegrenzung erfolgt durch Spitzenwertbegrenzung

Bemerkung:
Die Art der Pegelbegrenzung erlaubt es nicht, alle Signalformen verzerrungsfrei mit der gleichen Lautstärke abzuhören. Musik und Sprachsignale (CF=15 dB) dürften bis ca. 81 dB(A) verzerrungsfrei zu hören sein, ein Sinussignal mit 1 kHz dagegen bis 93 dB(A). Eine Abstimmung auf den höheren Grenzpegel von 107 dB(A) statt 98 dB(A) (Rosa Rauschen) erscheint nach den vorherigen Ausführungen vertretbar.

6 Untersuchung an passiven Schaltungen zur Pegelbegrenzung

Die Möglichkeiten passiver Schaltungen beschränken sich im Wesentlichen auf zwei prinzipielle Verfahren, für die es unterschiedliche schaltungstechnische Lösungen gibt.

Im **Verfahren 1** wird ein Widerstand R_B parallel zur Kopfhörerimpedanz R_K geschaltet, der mit zunehmendem Strom seinen Widerstand verkleinert und so die Spannung am Kopfhörer begrenzt. Ein Vorwiderstand R_V begrenzt dabei den maximalen Strom.

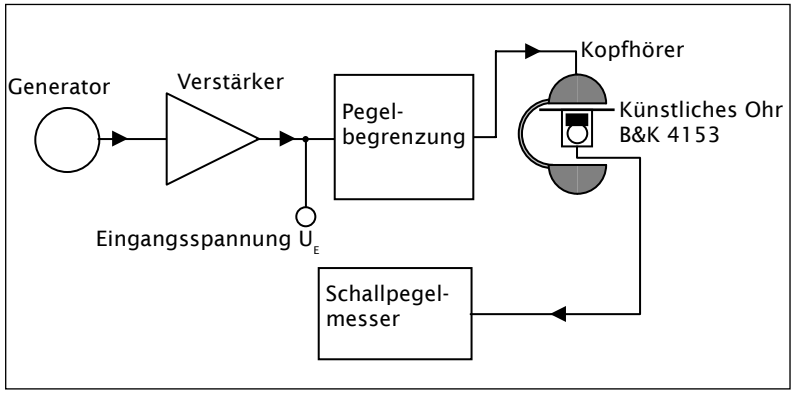


Bild 6: Messaufbau (gemessen bei 1kHz)

Im **Verfahren 2** wird ein Widerstand R_B in Serie zur Kopfhörerimpedanz geschaltet, der mit zunehmendem Strom seinen Widerstand vergrößert und so die Spannung am Kopfhörer begrenzt.
Für die strom- und spannungsbegrenzenden Widerstände kommen in erster Linie Dioden und Transistoren in Frage, wobei Dioden nur für Verfahren 1 verwendbar sind. Transistoren stellen dagegen in beiden Verfahren mögliche Lösungen dar und erlauben aufgrund ihres Steuereingangs die Realisierung von Regelkreisen zur Spannungsbegrenzung.
Es wurden vier Schaltungen nach den Verfahren 1 bzw. 2 getestet. Gemessen wurden dabei die Übertragungskennlinien für einen Sinuston 1 kHz in einem Messaufbau nach **Bild 6**.

Der Bereich der Eingangsspannung entspricht bei dem hier verwendeten Kopfhörer einem Schalldruckpegel bis 117 dB(A). Außerdem wurde der für ein Sinussignal nutzbare Arbeitsbereich bestimmt, für den die stärkste Harmonische mindesten 40 dB gegenüber dem Nutzsignal gedämpft war (Klirrfaktor ca. 1%).

Die **Schaltung 1** ist ein reiner Spitzenwertbegrenzer, der auch jenseits der 1%-Klirrfaktor-Grenze einen relativ starken Anstieg des Ausgangssignals erkennen lässt (endliche Steilheit der Diodenkennlinie und Erhöhung des Effektivwertes durch zusätzliche Harmonische). Die Schaltung benötigt einen Vorwiderstand zur Strombegrenzung. Der Kopfhörer wird dadurch unempfindlicher.

Die **Schaltung 2** ist ein reiner Spitzenwertbegrenzer, der jenseits der 1%-Klirrfaktor-Grenze den Anstieg des Ausgangssignals schneller begrenzt als die Diodenschaltung.

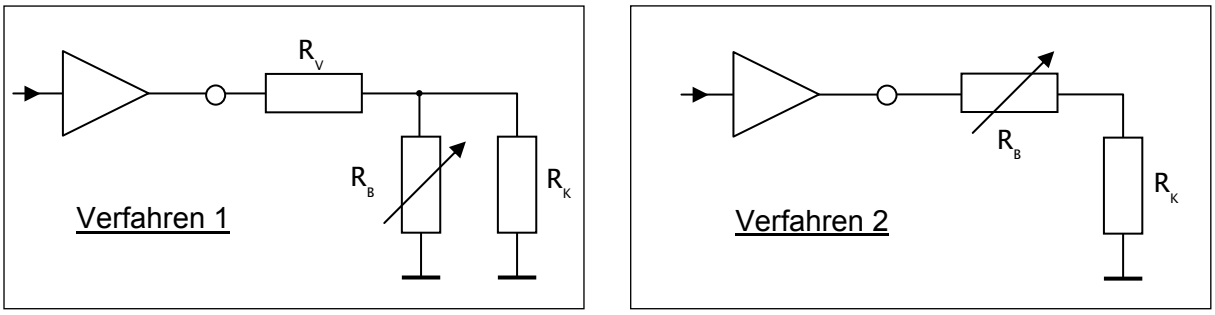
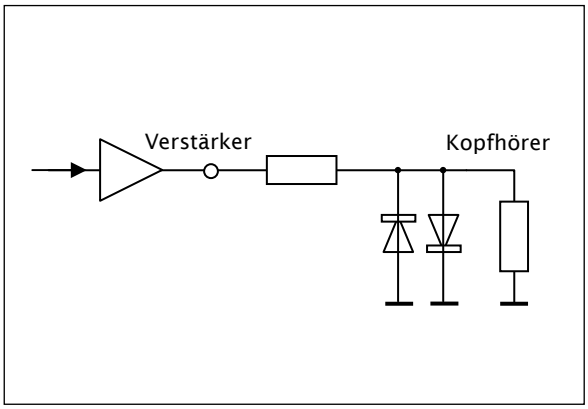


Bild 5: Prinzipien passiver Pegelbegrenzungen

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.



Schaltung 1: Antiparallele Dioden nach Verfahren 1

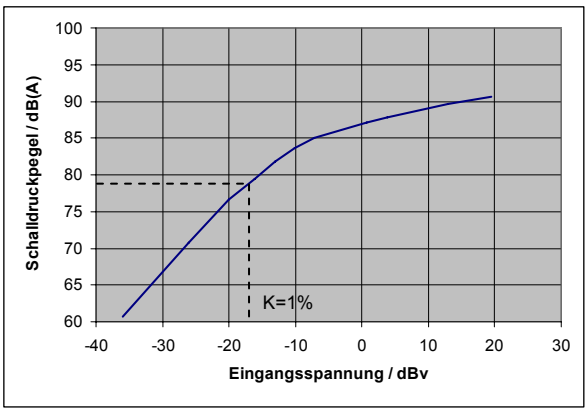
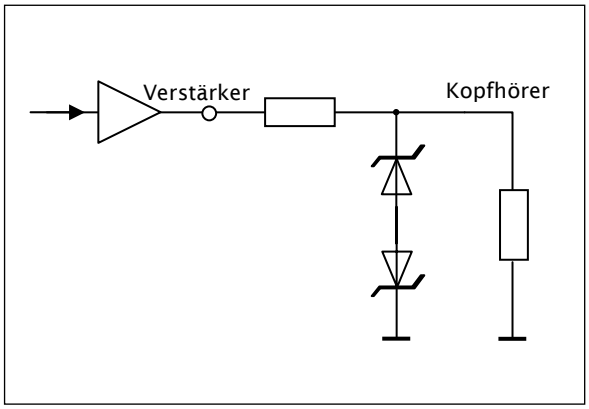


Bild 7: Übertragungskennlinie Schaltung 1



Schaltung 2: Antiserielle Z-Dioden nach Verfahren 1

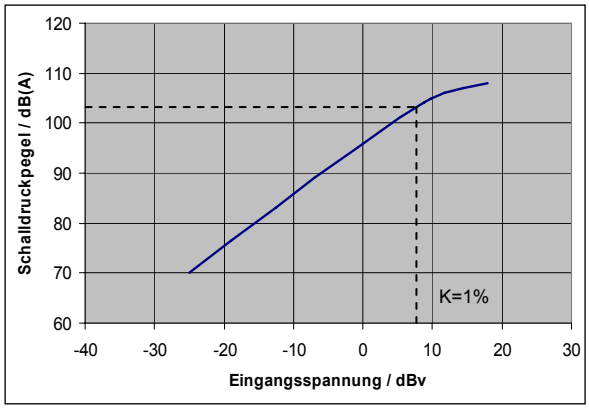
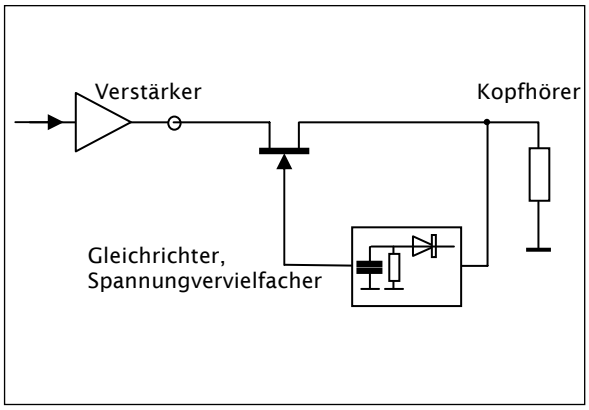


Bild 8: Übertragungskennlinie Schaltung 2



Schaltung 3: Mit JFET nach Verfahren 2

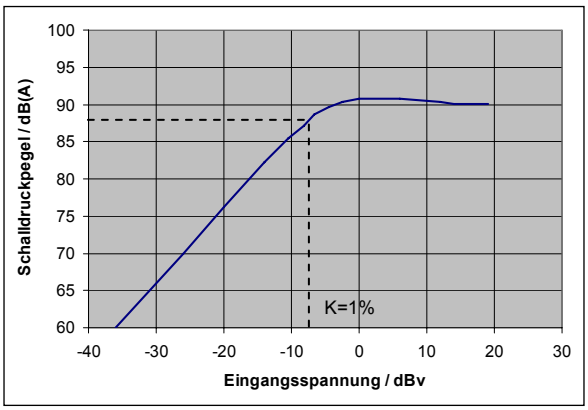
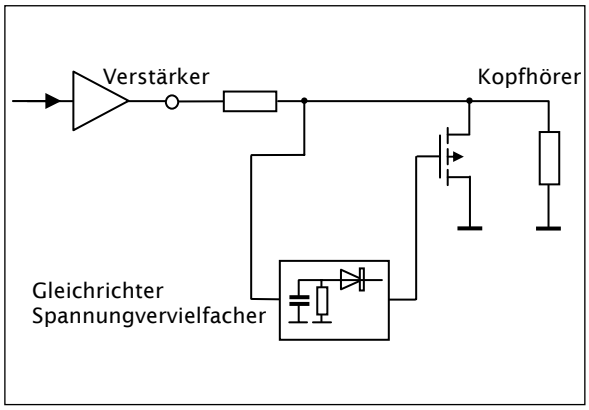


Bild 9: Übertragungskennlinie Schaltung 3



Schaltung 4: Mit MOSFET nach Verfahren 1

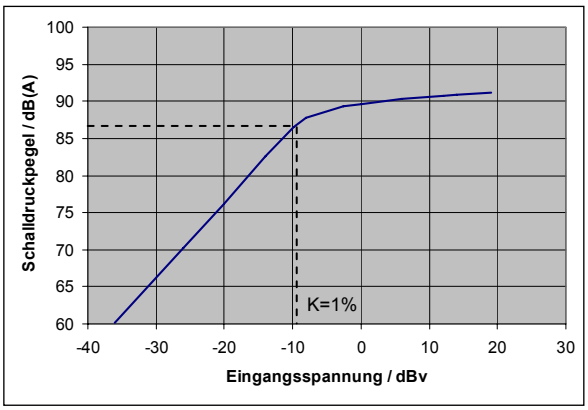


Bild 10: Übertragungskennlinie Schaltung 4

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Der Grund ist die größere Steilheit der Diodenkennlinien im Sperrbereich. Die Schaltung benötigt einen Vorwiderstand zur Strombegrenzung. Der Kopfhörer wird dadurch unempfindlicher.

Bei der **Schaltung 3** ist die lineare Aussteuerung wesentlich höher als bei der Diodenschaltung. Die Begrenzung erfolgt bei nur 3 dB jenseits der linearen Aussteuerungsgrenze und behält den Maximalwert ohne weiter anzusteigen bei.
Die Begrenzung erfolgt über einen Regelkreis. Die Regelspannung am Ausgang des Gleichrichters entspricht einem Mittelwert, deshalb ist die Aussteuerung bei Signalen mit hohem Crest-Faktor günstiger als bei Schaltung 1 und 2. Wird auf den Spannungsvervielfacher verzichtet, muss der Kopfhörer durch Vorwiderstand unempfindlicher gemacht werden, um die aus dem Signal gewonnene Regelspannung dem gewünschten Schalldruck anzupassen.

In **Schaltung 4** gleiches Begrenzungsprinzip mit Regelkreis, jedoch mit kurzschließendem Widerstand (MOSFET-Transistor). MOSFET (n-Kanal, selbstsperrend) besitzen einen nicht unterschreitbaren minimalen Durchgangswiderstand, deshalb steigt der Pegel nach Erreichen dieses Widerstandes (fester Spannungsteiler) leicht an.

7 Literatur

[1] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen
(Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV)

[2] Richtlinie 2003/10/EG des Europäischen Parlaments

[3] Gesundheitsschutz 4 Lärmwirkungen: Gehör, Gesundheit, Leistung
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

© 2009 Institut für Rundfunktechnik GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

Institut für Rundfunktechnik
Floriansmühlstraße 60
80939 München
www.irt.de
Tel. +49 (0) 89 | 323 99 - 0
Fax +49 (0) 89 | 323 99 - 351
presse@irt.de

Registergericht München Eintrag Abteilung
B Band 65 Nr. 5191