

# Background Story

## CORE Signalverarbeitung

Dual-Path Kompression liefert beste Klarheit, Annehmlichkeit und Klangqualität

### Einleitung

Seit vielen Jahren weiß man, dass Verstärkung allein nicht ausreicht, um für Menschen mit Hörverlust alle Klänge wieder deutlich hörbar und zudem möglichst natürlich wiederzugeben. Das menschliche Hörvermögen hat einen bestimmten Dynamikbereich innerhalb dessen Signale erkennbar sind und angenehm bleiben. Dieser Dynamikbereich ist bei Menschen mit Hörverlust eingeengt. Sie haben dadurch eine veränderte Lautheitswahrnehmung. Einfache (lineare) Verstärkung eines Schallsignals führt dazu, dass manche Signale zu schwach sein können, unter der Hörschwelle bleiben und somit nicht gehört werden. Andere dagegen werden eventuell zu viel verstärkt und damit als unbehaglich oder gar schmerzhaft empfunden. Viele Signale werden zwar durchaus im Resthörbereich des Schwerhörigen abgebildet, werden aber doch wegen der veränderten Hördynamik weder richtig erkannt noch klingen sie natürlich. Um dieses Problem zu lösen verwenden moderne digitale Hörsysteme komplexe Kompressionssysteme. Diese verändern die Eingangssignale so, dass der Hörgeräteträger die Klänge angenehm und möglichst natürlich wahrnehmen kann. Die Kompressionssysteme, die in Phonak Hörsystemen zum Einsatz kommen, werden stetig weiterentwickelt und verbessert. Alle Produkte, die auf der CORE Plattform basieren, verwenden das derzeit fortschrittlichste, adaptive Dual-Path-Kompressionsystem der Industrie, um Hörbarkeit, Verständlichkeit und natürliche Klangqualität sicherzustellen.

### Warum Kompression

Das menschliche Gehör hat einen ganz bestimmten Dynamikbereich, innerhalb dessen es in der Lage ist, Töne wahrzunehmen und zu verarbeiten. Dieser Dynamikbereich reicht von der tiefsten wahrnehmbaren Frequenz bis zur höchsten hörbaren und vom leisesten, gerade noch hörbaren Eingangssignal bis zur Unbehaglichkeitsschwelle (Abbildung 1). Er kann von Mensch zu Mensch innerhalb eines gewissen Rahmens durchaus stark schwanken. Üblicherweise wird er in der wissenschaftlichen Literatur als Feld dargestellt, welches in der Frequenz von 20 Hz bis 20 kHz und im Pegel von 0 dB

bis 120 dB reicht. Innerhalb dieses Dynamikfeldes liegt die menschliche Sprache mit ihren Lauten.

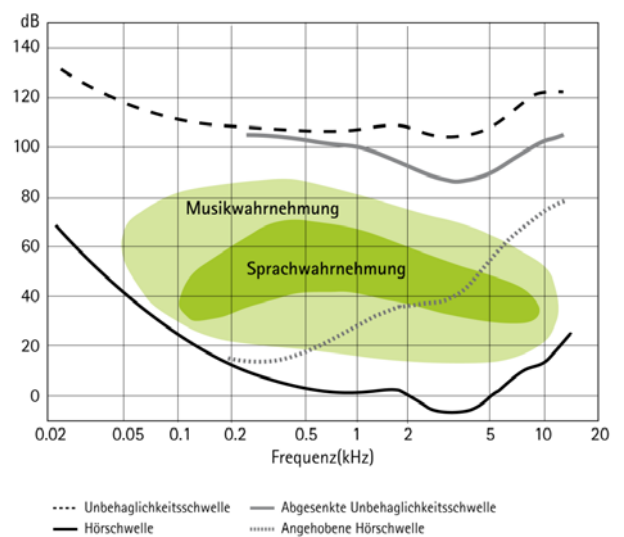


Abb. 1: Darstellung des normalen menschlichen Hörbereichs und eines durch Hörminderung eingeengten Dynamikbereichs

Abbildung 1 zeigt auch, wie durch eine Hörminderung der Dynamikbereich infolge angestiegener Hörschwelle und oftmals abgesenkter Unbehaglichkeitsschwelle eingeschränkt ist. Zudem unterscheidet sich die Art des Anstieges der Lautheitsempfindung bei einem Hörverlust von der bei Normalhörenden (Abb. 2).

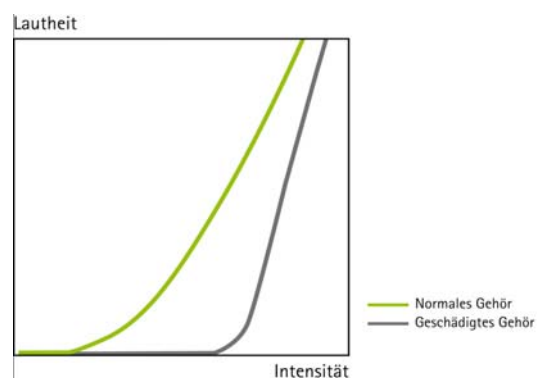


Abb. 2: Schematischer Anstieg der Lautheitsempfindung für ein normalhörendes und ein hörgeschädigtes Ohr

Mit einer linearen Verstärkungsstrategie ist es darum lediglich möglich einige wenige Signale gehörlich in den eingeschränkten Resthörbereich eines Schwerhörigen zu verstärken. Alle anderen Signale sind dagegen entweder zu laut oder zu leise. Sie werden eventuell gar nicht gehört, sind maskiert oder werden gar als unangenehm empfunden. Ein modernes Hörgerät braucht deshalb ein geeignetes Amplituden-Kompressionssystem, welches möglichst alle Signale im Restdynamik-Hörfeld des Schwerhörigen abbildet.

### Die Entwicklungsgeschichte der Kompression in Hörgeräten

Bereits seit mehr als 50 Jahren gibt es Systeme zur Veränderung der Dynamik in Hörgeräten. Die ersten Geräte dieser Art waren mit einfachen Begrenzern ausgerüstet, mit denen lediglich der maximale Ausgangspegel begrenzt werden konnte. Weil sie einfach nur die Signalkomponenten abschnitten, die die festgelegte Pegelgrenze überschritten, wurden sie "PC" (von engl. Peak Clipping) genannt. Das bloße Abschneiden der Spitzen führte aber zu einer starken Signalveränderung und erzeugte ein hohes Mass an Verzerrungen, welche auch vom Hörgeräteträger wahrgenommen wurden.

Eine gewisse Verbesserung brachten die ersten echten Amplituden-Kompressionsschaltungen. Sie kontrollieren die Verstärkung abhängig vom Pegel des Eingangssignals und passen diese kontinuierlich so an, dass große Teile des Eingangssignals in den Resthörbereich fallen. Je nachdem, ob die Kompression des Signals vor oder hinter dem Lautstärksteller geregelt wird, spricht man von einer Eingangspegelabhängigen (AGCi) oder einer Ausgangspegelabhängigen automatischen Verstärkungsregelung (AGCo). Jede dieser Regelungsarten hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile, was zum Teil auf die Kniepunkte der Regelschwellen zurückzuführen ist, die damals allgemein sehr hoch lagen (60 dB und höher). Mit der AGCi kann sich der Schwerhörige über den Lautstärksteller sein angenehmstes Klangbild leicht selbst einstellen, während er bei der AGCo über den Lautstärksteller in bestimmten Situationen den Signal-Rausch-Abstand verbessern kann.

Da die unterschiedlichen Hörgerätehersteller oftmals ganz verschiedene audiologische Modelle mit anderen Zielen zur Versorgung von Hörschäden verfolgten, führte dies dazu, dass manche Hersteller entsprechend ihrer Philosophie nur AGCi - Modelle und andere nur AGCo-Modelle in ihren Programmen hatten. Die grundlegende Funktionsweise von AGCi und AGCo zeigen die Abbildungen 3 und 4.

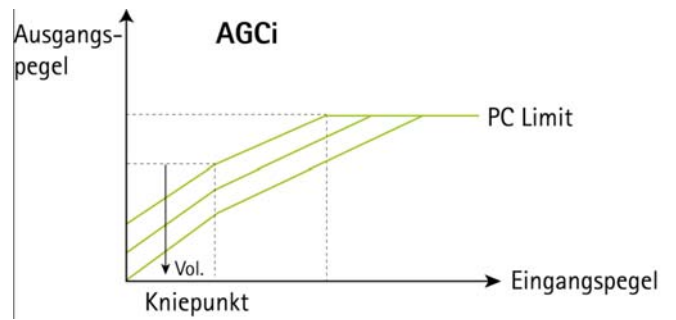


Abb. 3: Schematische Funktionsweise einer Eingangspegelabhängigen Kompression (AGCi). Bei AGCi-Schaltungen liegen die typischen Kompressionsverhältnisse bei 2:1 oder 3:1 und der maximale Ausgangspegel wird durch Peak Clipping oder eine AGCo begrenzt.

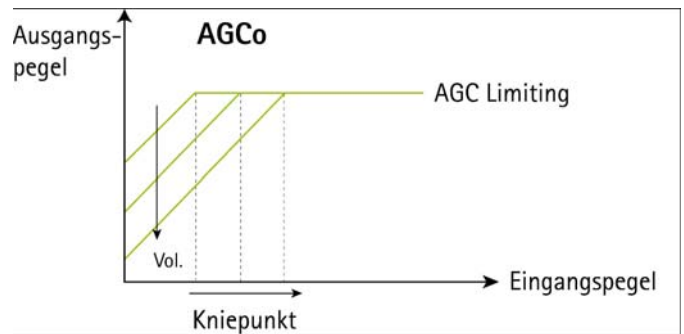


Abb. 4: Schematische Funktionsweise einer Ausgangspegelabhängigen Kompression (AGCo). Eine AGCo-Schaltung hat ein typisches Kompressionsverhältnis von 10:1 und wird größtenteils zur Ausgangsbegrenzung verwendet.

Frühe Systeme verwendeten, wie schon erwähnt, ziemlich hohe Kniepunkte, üblicherweise um 60 dB. Um die Hörbarkeit sehr leiser Klänge weiter zu verbessern brachte man Systeme mit sehr niedrigen Kniepunkten auf den Markt. Dieser Ansatz wird oft als Wide Dynamic Range Compression (WDRC) bezeichnet. Oft benutzt in Fällen, in denen der verbleibende Dynamikbereich stark eingeschränkt ist, war die WDRC bei vielen Herstellern weit verbreitet. Die ersten Geräte mit WDRC teilten die tiefen und die hohen Frequenzen in zwei Frequenzkanäle auf. Moderne Hörsysteme arbeiten heutzutage mit vielen unterschiedlichen Frequenzkanälen von denen jeder einzelne seinen eigenen Kompressor besitzt. Wenn aber jeder dieser einzelnen Kompressoren unabhängig arbeiten würde, so würde die Klangqualität infolge von Verzerrungen und spektralen Artefakten beeinträchtigt. Um diese unerwünschten Verzerrungen zu vermeiden und um sicher zu stellen, dass der spektrale Kontrast der Signale nicht durch die Kompression verschmiert wird, verkoppeln die meisten Systeme die individuellen Frequenzkanäle auf bestimmte Weise miteinander.

### Im Laufe der Zeit ist das einzig Beständige der Wandel

Leider reicht es für eine gehörliche Kompression nicht, allein die Verstärkung kontinuierlich zu verändern. Schuld daran ist die Tatsache, dass bei allen Signalen und auch beim menschlichen Gehör gewöhnlich der Faktor Zeit eine wichtige Rolle spielt. Würde das System beispielsweise die Kompression für ein ankommendes Signal in Echtzeit anpassen, so würde

das zu einer Veränderung des Signals führen und starke Harmonische Verzerrungen erzeugen. Deshalb besitzen bis heute alle Regelsysteme,, bestimmte Regelzeiten, innerhalb denen sie reagieren. Diese Regelzeiten verhindern, dass größere Verzerrungen auftreten und sollen auch für ein ruhiges Klangbild ohne starke Schwankungen der Lautstärke sorgen.

In frühen Kompressionssystemen wurden die Zeitkonstanten nach den damals bekannten Reaktionszeiten des Gehörs festgelegt. Die Einschwingzeit des Kompressionssystems wurde aus der Zeit abgeleitet, die das Gehirn benötigt um Veränderungen im Reizsignal vollständig wahrzunehmen. Weil diese Zeit damals zu etwa 20 ms bestimmt wurde, lagen die Einschwingzeiten nahe bei 20 ms oder etwas darunter. Die Ausschwingzeit des Systems lag bei etwa 200 ms und ergab sich aus der Tatsache, dass die Hörschwelle bei kürzer dargebotenen Signalen nicht stabil ist und dazu neigt anzusteigen. Das Gehör fasst einzelne kurze Reize, von etwa 200ms, zu einer Gesamtempfindung zusammen (Zwicker, 1974). In den frühen Tagen der Kompressionssysteme wurde dies als die beste Lösung angesehen.

Zahlreiche Forschungsarbeiten führten dazu, dass die Erkenntnisse über das zeitliche Verhalten des hörgeschädigten Ohres ständig wuchsen. Somit entstanden auch immer mehr Modelle zur Optimierung der Zeitkonstanten bei Kompressionssystemen. Durch die Einführung digitaler Hörgeräte setzten sich fortschrittliche Kompressionssysteme auf dem Markt rasch durch.

### Verschiedene Zeitstrategien bei Kompressionssystemen

Eine verbreitete Strategie ist es, mit relativ kurzen Einschwingzeiten um 5 ms und langen Ausschwingzeiten von 200 ms oder noch länger zu arbeiten. Man hat dabei den Vorteil, dass die kurze Einschwingzeit auch plötzlich auftretende laute Signale einigermaßen sicher herunterregeln kann und andererseits die langen Ausschwingzeiten für ein ruhiges, angenehmes Klangbild ohne Verzerrungen sorgen. Damit können die Kompressionsknipunkte bis auf 30 dB und weniger abgesenkt werden, ohne den Hörgerätebenutzer zu stören.

Eine andere Strategie arbeitet mit sehr kurzen Ein- und Ausschwingzeiten, die deutlich unter 50 ms liegen. Durch die kurzen Regelzeiten können bereits Pegelschwankungen verarbeitet werden, die innerhalb einer Silbe auftreten, darum wird diese Art der Kompression auch als Silbenkompression bezeichnet. Sie hat den Vorteil, dass die Gesamtdynamik des Signals deutlich reduziert wird und in den ebenfalls reduzierten Restdynamikbereich des Schwerhörigen abgebildet werden kann, was im Allgemeinen mit einem langsamer arbeitenden System nicht möglich ist. Allerdings werden durch die schnelle Regelung auch Verzerrungen erzeugt, durch die der Klang deutlich verändert werden kann. Im Vergleich zu

langsameren Systemen ist zudem der Pegel von Hintergrundgeräuschen während Sprachpausen höher.

Ein weiter entwickelter Ansatz arbeitet mit frequenzabhängig unterschiedlichen Regelzeiten, wobei wegen der Gefahr auftretender Verzerrungen, für tief frequente Signale längere Regelzeiten genutzt werden, als für hohe Frequenzen.

Manche Schwerhörige bevorzugen langsame Regelzeiten, während andere schnelle bevorzugen. Es gibt zwar eine Tendenz, dass Menschen mit stärkerem Hörverlust langsamere Zeitkonstanten bevorzugen, aber es gibt keine eindeutige Beziehung zwischen Stärke der Schwerhörigkeit und Präferenz einer Regelzeit. Es ist auch nicht unbedingt so, dass z.B. jüngere Schwerhörige gerne eine schnelle Regelung bevorzugen und ältere Schwerhörige lieber eine langsame, wie verschiedentlich behauptet oder vermutet wird (Gatehouse et al, 2006). Forschungsarbeiten deuten darauf hin, dass die kognitive Fähigkeit ebenfalls ein wichtiger Faktor bezüglich der Wahl der Zeitkonstante ist (Pichora-Fuller, 2006). So hat zum Beispiel eine schnellere Kompression Vorteile für Menschen mit intakten kognitiven Verarbeitungsfähigkeiten, während solche mit verminderten kognitiven Fähigkeiten, bessere Ergebnisse mit langsamer Kompression erzielen (Lunner, 2003).

Da also jede Art der Regelung ihre Vor- und Nachteile hat ist es nicht verwunderlich, dass einige hochentwickelte Hörsysteme heute mit einer **dualen** Kompression arbeiten. Je nach Situation wird automatisch eine langsame oder schnelle Kompressionsstrategie angewendet. Die Regelzeiten können dabei stark variieren. In den fortschrittlichsten Hörgeräten kommen adaptive Kompressionssysteme zum Einsatz, die nicht nur den Pegel des Signals, sondern zusätzlich andere Signaleigenschaften als Parameter nutzen, um die Gesamtverstärkung zu kontrollieren.

### Die (R)Evolution der Signalverarbeitung bei Phonak

Schon bei der Entwicklung des ersten digitalen Hörsystems von Phonak stand die Cochlea insbesondere bei der Entwicklung, der Kompressionssysteme im Mittelpunkt. Claro war das erste volldigitale Hörsystem von Phonak, welches bei der Signalverarbeitung die psychoakustischen und auditorischen Prozesse des Innenohres mit berücksichtigte. Das „Digital Perception Processing“ (DPP) in Claro bewertete kontinuierlich die Lautheit der ankommenden Signale und nutzte diese Information zur Wahl der richtigen Verstärkung. Das Kompressionssystem berücksichtigte daneben auch die dynamischen Eigenschaften von Klängen sowie spektrale Maskierungseffekte und die Bandbreite der Kanäle.



Natürlich war die Kompression ein wesentliches Element dieses Verarbeitungssystems und es wurden zwei verschiedene adaptive Strategien angeboten. Der Akustiker konnte auswählen, welche Strategie der Kunde brauchte oder

bevorzugte. Eine Strategie nutzte kurze Regelzeiten (Fast Adaptive DPP) und eine lange Regelzeiten (Slow Adaptive DPP). Die Regelzeiten waren dabei symmetrisch, d.h., Ein- und Ausschwingzeit waren jeweils gleich. Um sicher zu stellen, dass das interne Mikrofonrauschen bei ganz leisen Eingangssignalen nicht gehört werden konnte, wurde eine zusätzlich Expansion (Soft Squelch) angewendet. In Abhängigkeit von der Frequenz steuert die Expansion die Verstärkung unterhalb des Einsatzpunktes und erhält somit das Gleichgewicht zwischen ausreichender Verstärkung leiser Signale und Unterdrückung von internem Rauschen.



In Perseo wurde die weiterentwickelte Signalverarbeitungsstrategie DPP<sup>2</sup> verwendet, die mit einem verbesserten Kompressionssystem mit unterschiedlichen Ein- und Ausschwingzeiten arbeitete. Die Einschwingzeit betrug 10 ms und die Ausschwingzeit lag bei 80 ms. Die relativ schnelle Einschwingzeit bot guten Schutz bei plötzlichen, lauten Signalen, während die langsamere Ausschwingzeit für ein gleichmässiges Klangbild ohne Lautstärkeschwankungen und Pumpeffekte sorgte. Die natürliche Amplitudenschwankung des ursprünglichen Signals wurde so beibehalten, was ein Verwischen der Silben verhinderte. Zusammen mit der noch genaueren DPP<sup>2</sup> Anpassungsvorbereitung wurde durch die Änderung der Zeitkonstanten der Nutzen der effektiven Kompression für den Hörgeräteträger verbessert. Auch die Kniepunkte der Kompression wurden bei Perseo verbessert, sie wurden tiefer angesetzt und zudem Frequenz- und Signalabhängig gemacht. Für schmalbandige Signale lagen die Kniepunkte im Bereich zwischen 30–35 dB und für breitbandige Signale zwischen 45–50 dB. Der Einsatz der Expansion wurde bei Perseo ebenfalls verbessert. Durch einen weichen Übergang zwischen Expansion und Kompression konnten für den Benutzer hörbare unangenehme Klangartefakte eliminiert werden.



Weitere Erkenntnisse, wie man die komplexen Vorgänge in der Cochlea besser einbeziehen kann, fanden in der nächsten Hörgerätegeneration, als „Bionic Perception Processing“ (BPP), Anwendung. Erstmals in Savia angewendet optimierte BPP die Zeitkonstanten und glich die Frequenz-Filterbänke ab um feine Artefakte weiter zu minimieren, welche bei früheren Systemen immer noch möglich waren. Zusätzlich wurde ein neues spektrales Ausgangsbegrenzungssystem eingebaut. Dieses ermöglichte eine optimale Verknüpfung der Steuerung lauter Eingangssignale, um den Hörkomfort zu erhalten, und der genauen Wiedergabe von Amplitudenschwankungen, die zur Sicherstellung der Sprachverständlichkeit benötigt werden. Dies ist besonders in Lärmsituationen nützlich, in denen sowohl laute Klänge als auch Sprache effektiv verarbeitet werden müssen.

## CORE Signalverarbeitung mit dem höchstentwickelten Dual Path Kompressionssystem, welches zur Zeit erhältlich ist



Moderne digitale Signalprozessoren in Hörgeräten verwalten und steuern hunderte von Parametern. Vielfach beeinflussen diese sich gegenseitig, oft negativ. Was einen guten Signalprozessor ausmacht ist die Kunst, alle diese unterschiedlichen Parameter so abzustimmen, dass möglichst wenig Artefakte und interne Störsignale entstehen. Die Notwendigkeit, auf unterschiedliche Eingangssituationen rasch und richtig zu reagieren hat dazu geführt, dass Kompressionssysteme zunehmend dual-path Kompressionsstrategien nutzen. Diese Systeme verwenden sowohl schnelle als auch langsame Regelzeiten parallel. Allerdings kann, wie weiter oben beschrieben, der schnell regelnde Pfad mit seinen kurzen Regelzeiten die Amplitudenschwankungen des Originalsignals verwischen und der langsam arbeitende Pfad kann internes Rauschen hörbar machen.

Derzeit erhältliche Systeme von Mitbewerbern (und sogar Systeme die jetzt neu eingeführt werden) nutzen dabei ein Verfahren, bei dem der Mittelwert des Eingangssignals über die Zeit zur Steuerung beider Kanäle genutzt wird. Weil ein Eingangsmittelwert benutzt wird um die Einstellung der Kompression zu bestimmen ist zu erwarten, dass abhängig von der Situation, diese nicht ideal sein wird. Ein Beispiel zeigt einige Nachteile von Verstärkungssteuerung über den Mittelwert des Eingangssignals. Dazu betrachten wir eine Situation, in welcher ein plötzlicher Wechsel der Signalumgebung auftritt, zum Beispiel der Beginn einer Unterhaltung in einem zuvor ruhigen Raum. In diesem Szenario würde ein durch die Mittelwertbildung des Eingangssignals gesteuertes System zuerst die Verstärkung erhöhen, was ein wesentliches Überschießen hervorrufen würde, bevor schließlich die angemessene Kompression erreicht ist. Abbildung 5 zeigt das Verhalten für dieses Beispiel.

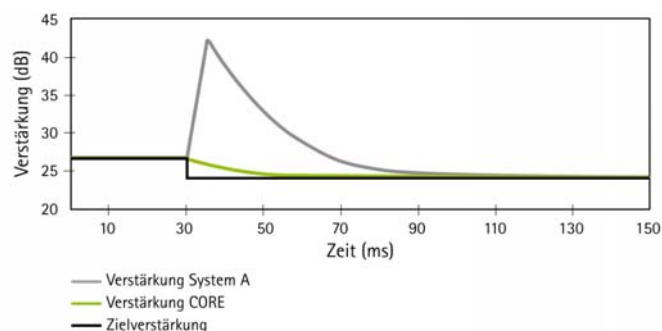


Abb. 5: Dieses Beispiel zeigt den Verlauf der Verstärkung mit der Zeit als Antwort auf einen plötzlichen Anstieg der Signallautstärke (20 dB auf 70 dB, auftretend bei etwa 30 ms) bei einem Steuerungssystem, das mit Mittelwertbildung des Eingangssignals arbeitet (graue Kurve), welches die Zielverstärkungskurve überschießt und der CORE-Verarbeitung (grüne Kurve), welche die Zielkurve schnell, weich und ohne Überschießen erreicht.

Der CORE (Communication Optimized Real-audio Engine) Audioprozessor, der in allen neuen Phonak-Produkten seit

Exélia erhältlich ist vermeidet diese Fallstricke, die andere Systeme plagen, weil die Eingangspegelermittlung klar von der Berechnung der momentan nötigen spektralen Verstärkung getrennt ist. Durch die Neuberechnung dieser Parameter mehrere hundert Mal pro Sekunde für beide Kompressionsysteme werden die spektralen Hinweise genauer nachgebildet, damit sie mit der fortwährenden Veränderung der Signalumgebung einhergehen. Auf diese Weise wird im gleichen Beispiel von weiter oben der richtige Kompressionsgrad sofort und ohne Überschießen der Verstärkung erreicht. Abbildung 5 zeigt ebenfalls dieses wünschenswerte Verhalten.

Darüber hinaus ist diese einzigartige adaptive CORE Dual-Path Kompression in die Signalklassen sensitive SoundFlow Automatik integriert. Damit ist die Verstärkungssteuerung sowohl zeit- als auch situationsempfindlich. Die Zeitkonstanten mit der besten Signalübertragung und der geringsten Verzerrung, die am besten der Situation angemessen sind, werden automatisch gewählt. Dies führt zu nahezu augenblicklichen und doch weichen automatischen Einstellungen, so dass auch die schlagartigsten Veränderungen in der Klangumgebung ohne Verzerrung und Artefakte bewältigt werden.

Schlussendlich erreicht die CORE Signalverarbeitung mit dem industriell höchstentwickelten Dual-Path Kompressionssystem die wesentlichen Ziele der Verstärkung besser als je zuvor – Klarheit, Komfort und natürliche Klangqualität.

## Literatur

Gatehouse S, Naylor G and Elberling C (2006) Linear and nonlinear hearing aid fittings – patterns of candidature. *Int J Audiol* 45(3): 153-171.

Lunner T. (2003) Cognitive function in relation to hearing aid use. *Int J Audiol* 42(Suppl 1): 49-58.

Pichora-Fuller M and Singh G, (2006) Effects of age on auditory and cognitive processing: Implications for hearing aid fitting and audiologic rehabilitation. *Tr in Ampl* 10(1):29-59.

Zwicker E, (1974) Die Zeitkonstanten des Gehörs. *Zeitschrift für Hörgeräte-Akustik* 12(3): 82-102.