

Binaural Messen, Auswerten und Wiedergeben

Einleitung	1
Schallquellenlokalisierung	1
Richtungsabhängige und richtungsunabhängige Veränderungen des Schallfeldes	2
Aufnahmen mit einem Kunstkopfmesssystem	3
Entzerrung einer Kunstkopfaufnahme	4
Entzerrungsschnittstelle	5
Binaurale Aufnahmen mit anderen Aufnahmeegeräten	7
Analyse einer Kunstkopfaufnahme	9
Wiedergabe binauraler Aufnahmen mit der ArtemiS SUITE	9
Auswahl der Wiedergabe-Entzerrung	10
Auswahl des Wiedergabepegels für Kunstkopfaufnahmen	10
Auswahl des Wiedergabepegels für BHM-Aufnahmen	12
Wiedergabe binauraler Aufnahmen mit BHS II und SQuadriga II oder SQobold	12
Anwendungsbeispiel	13
BHM-Aufnahme in Fahrzeuginnenraum	13
Analyse der BHM-Aufnahme	13
Wiedergabe der BHM-Aufnahme	14

Einleitung

Schallquellenlokalisierung

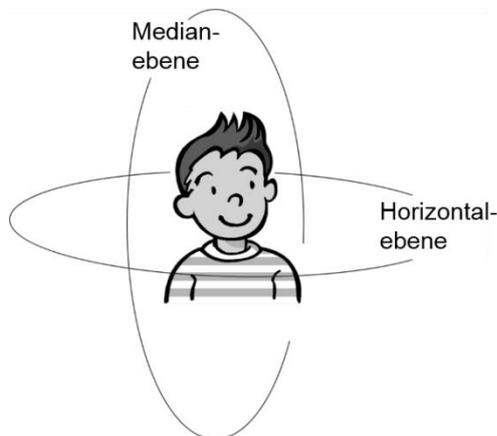


Abbildung 1: Median- und Horizontalebene

Der Mensch ist mithilfe seines binauralen Gehörs in der Lage, den Ort einer Schallquelle zu bestimmen. Diese Schallquellenlokalisierung ist sowohl in der Horizontal- als auch in der Medianebene möglich. In der Horizontalebene basiert die Lokalisation auf der Auswertung interauraler Unterschiede. Sobald sich die Schallquelle nicht mehr direkt vor dem Kopf befindet, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Weglängen, die der Schall zu den Ohren zurücklegen muss, zu interauralen Laufzeitunterschieden. Obwohl diese Unterschiede sehr gering sind (zwischen 20 μ s und 1 ms) und nicht bewusst wahrgenommen werden, kann das Gehirn diese Unterschiede interpretieren und eine Richtung ableiten. Diese Laufzeitunterschiede sind dann am größten, wenn sich die Schallquelle links oder rechts neben dem Hörer befindet. Die interauralen Laufzeitunterschiede werden als wichtigste

Grundlage für die Schallquellenlokalisierung betrachtet. Zusätzlich kommt es durch Abschattung zu interauralen Differenzen des Schalldrucks. Eine Geräuschquelle, die sich vor dem rechten Ohr befindet, erzeugt am rechten Ohr einen höheren Schalldruckpegel als am linken, weil der Kopf die Schallausbreitung beeinflusst. Auch diese Pegelunterschiede werden vom Gehirn interpretiert und dienen der Lokalisation. Zur räumlichen Orientierung werden immer beide Effekte ausgenutzt. Untersuchungen mit künstlichen Signalen haben aber gezeigt, dass die Effekte auch isoliert eine Lokalisation ermöglichen.

Die Lokalisation in der Medianebene basiert auf einem anderen Phänomen. Bewegt sich die Schallquelle entlang der Medianebene, werden keine wesentlichen interauralen Unterschiede erzeugt. Trotzdem ist das Gehirn in der Lage, auch in dieser Ebene eine Schallquellenlokalisierung durchzuführen. Dies geschieht durch die richtungsabhängigen Filterungen des Schalls, die durch die geometrischen bzw. anatomischen Formen der Ohrmuscheln, des Kopfes, der Schultern und des Rumpfes

hervorgerufen werden. Je nach Einfallsrichtung ist das Spektrum des an den Ohren eintreffenden Signals verzerrt. Diese spektralen Unterschiede können vom Gehirn als Richtung interpretiert werden, indem spezifische Verzerrungen bestimmten Richtungen zugeordnet werden. Im Gegensatz zu der Lokalisation in der Horizontalebene ist die Lokalisation in der Medianebene weniger genau aufgelöst. Mithilfe des binauralen Hörens können außerdem eine Schallquellenseparierung, eine Störgeräuschunterdrückung und eine Selektion beim Hören stattfinden. Dies lässt sich am einfachsten am Beispiel des Cocktail-Party-Effekts erklären: Auf einer Party mit vielen Gästen, die sich in kleinen Gruppen unterhalten und zusammen einen relativ hohen Geräuschpegel erzeugen, ist es trotzdem möglich, sich auf einen Sprecher zu konzentrieren und die restlichen Sprecher bis zu einem gewissen Grad auszublenden. Diese Fähigkeit basiert auf der räumlichen Trennung der Geräuschquellen, die wiederum nur möglich ist, weil das Gehör die einzelnen Orte der Quellen lokalisieren kann.

Richtungsabhängige und richtungsunabhängige Veränderungen des Schallfeldes

Für die Schallquellenlokalisierung benötigt das Gehör wie oben beschrieben nicht nur die interauralen Differenzen, sondern auch die richtungsabhängigen Veränderungen des Schallsignals, die durch die Anwesenheit der Person im Schallfeld verursacht werden. Die richtungsabhängigen Veränderungen werden hauptsächlich durch die Ohrmuschel, den Kopf und die Schultern hervorgerufen. Zusätzlich zu diesen richtungsabhängigen Veränderungen verursachen die Ohrmuschelhöhle (Cavum conchae) und der Ohrkanalveränderungen, die von der Schalleinfallsrichtung unabhängig sind. Im Gegensatz zu den richtungsabhängigen Veränderungen, die auf Beugung und Reflexion basieren, werden die richtungsunabhängigen Veränderungen durch Resonanzen hervorgerufen. In Abbildung 2 sind diese unterschiedlichen Signalveränderungen und ihre Hauptursachen getrennt dargestellt.

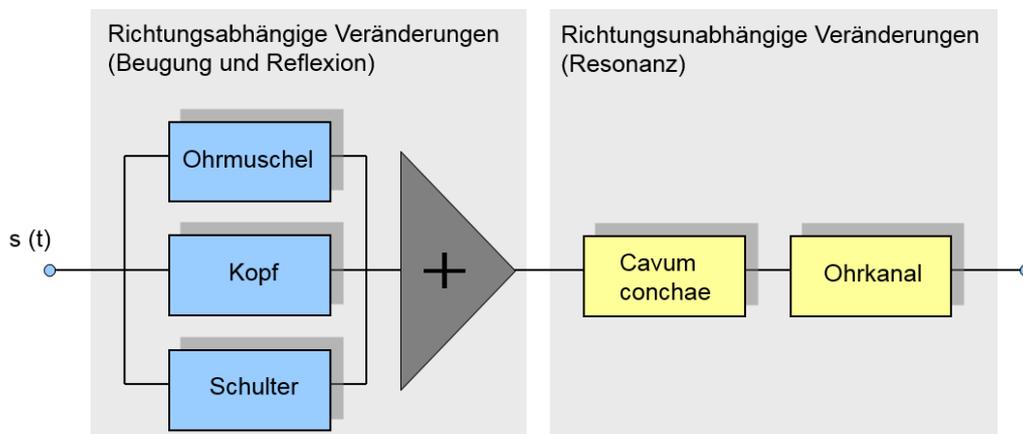


Abbildung 2: Hauptursachen der richtungsabhängigen und -unabhängigen Signalveränderungen

Aufnahmen mit einem Kunstkopfmesssystem

Den oben beschriebenen Mechanismen zur Lokalisation ist gemeinsam, dass sie die interauralen Unterschiede und die Signaländerungen, die durch die Physiologie des Hörers hervorgerufen werden, auswerten. Das Gehör ist auf diese Informationen angewiesen, um eine sinnvolle räumliche Lokalisation durchführen zu können. Nur eine Schallaufnahme, die diese Informationen enthält, kann beim Abhören ein Räumlichkeitsgefühl erzeugen und die räumliche Position der Schallquellen reproduzieren. Aufnahmen, die mit einem einzelnen Mikrofon durchgeführt wurden, enthalten diese Informationen nicht und können somit vom Gehör nicht entsprechend ausgewertet werden. Durch die fehlende räumliche Trennung der Geräuschquellen kann das Gehirn die einzelnen Schallquellen nicht separieren, und es ist schwerer, sich auf einzelne Schallquellen zu konzentrieren.

Aufnahmen, die mit Stereomikrofonen durchgeführt wurden, enthalten zwar Intensitäts- oder Laufzeitunterschiede, die durch den räumlichen Abstand der Mikrofone erzeugt werden. Diesen Aufnahmen fehlt aber die Verzerrung des Schallfeldes durch den Kopf, die für die Lokalisation in der Medianebene besonders wichtig sind. Das heißt, dass auch eine Stereoaufnahme keine korrekte Lokalisation ermöglicht, sondern nur eine ungefähre Positionsbestimmung zwischen den beiden Lautsprechern.

Eine vollständige räumliche Abbildung eines Schallfeldes ist nur mit einer Kunstkopfaufnahme möglich. Eine solche Aufnahme enthält zwei Kanäle (linkes und rechtes Ohr), die sowohl die nötigen interauralen Differenzen als auch die nötigen Verzerrungen beinhalten, weil der Kunstkopf das Schallfeld ähnlich wie eine Person verzerrt. Eine Kunstkopfaufnahme ermöglicht dem Hörer im Idealfall, ein Geräusch so wahrzunehmen, als ob er selbst im entsprechenden Schallfeld anwesend wäre.

Das Ziel der kopfbezogenen Stereophonie ist die verzerrungsfreie Messung, Übertragung und Reproduktion von Schallereignissen an den menschlichen Trommelfellen. Das Prinzip der Messung mit einem künstlichen Kopf ist zunächst einfach, dennoch traten bei früheren Kunstkopfmesssystemen viele Probleme auf (z. B. hohes Eigengeräusch, niedriger dynamischer Bereich, fehlende Kalibrierfähigkeit). 1982 kam mit dem HMS I (HEAD Measurement System) der Firma HEAD acoustics GmbH das erste kalibrierfähige Kunstkopfmesssystem mit originalgetreuer Kopf- und Ohrmuschelnachbildung und Übertragungseigenschaften, die mit dem menschlichen Gehör vergleichbar sind, auf den Markt. Seit 1989 steht das Kunstkopfmesssystem HMS II zur Verfügung, das eine mathematisch beschreibbare, vereinfachte Geometrie und eine repräsentative Richtcharakteristik besitzt. Die vereinfachte Geometrie berücksichtigt die relative Positionierung aller akustisch wirksamen Körperteile und erlaubt durch die mathematische Beschreibbarkeit z. B. die Berechnung der richtungsunabhängigen Entzerrung (ID-Entzerrung).

Die digitalen Kunstköpfe HMS III und HMS IV (Abbildung 3) sind das Ergebnis der Weiterentwicklung der Kunstkopfmessstechnik durch die HEAD acoustics GmbH. Durch den Einsatz verbesserter Technik, wie die 24-Bit-Technologie, besitzen diese Kunstkopfmesssysteme ein sehr geringes Eigenrauschen und einen hohen Dynamikumfang.

Mithilfe dieser neuen Kunstkopfmesssysteme können Schallereignisse so aufgenommen werden, dass sie auch die für die Lokalisation nötigen Informationen enthalten.



Abbildung 3: Kunstkopfmesssystem HMS IV

Entzerrung einer Kunstkopfaufnahme

Die Wiedergabe einer Kunstkopfaufnahme sollte mit einem auf den Kunstkopf angepassten Abhörsystem erfolgen und muss gewährleisten, dass der gleiche Höreindruck entsteht, als hätte der Hörer das Schallereignis unmittelbar wahrgenommen (siehe Abbildung 4). Dazu müssen die Signale ($p_r(t)$, $p_l(t)$), die an den Ohren einer Person anliegen, die sich im Schallfeld befindet, den Signalen ($p'_r(t)$, $p'_l(t)$) entsprechen, die an den Ohren einer Person anliegen, die die vom Kunstkopf in dem gleichen Schallfeld aufgenommenen Signale abhört.

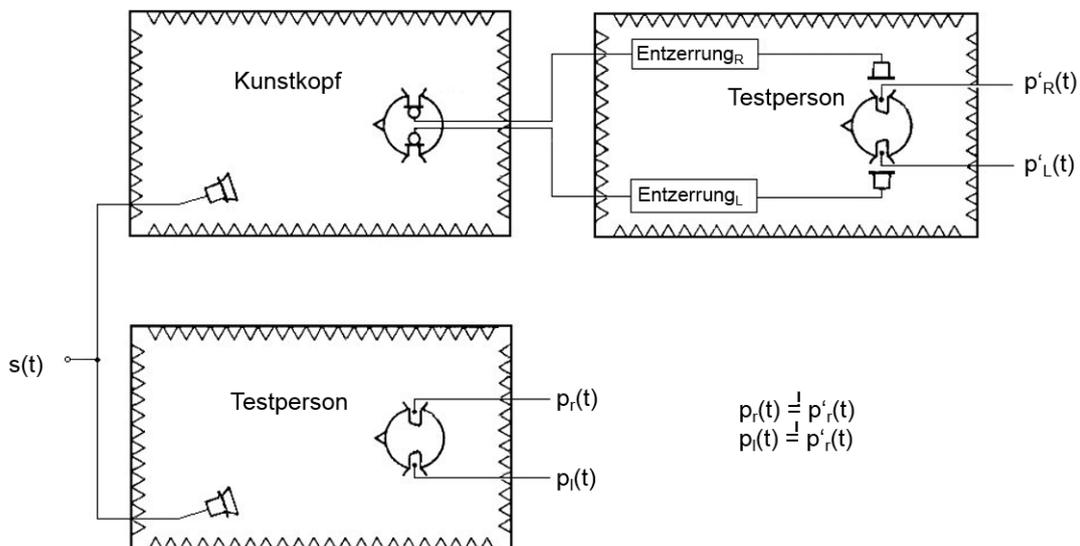


Abbildung 4: Anforderung an die Wiedergabe einer Kunstkopfaufnahme

Für eine solche Wiedergabe ist es allerdings erforderlich, die mit dem Kunstkopf aufgenommenen Signale vor der Wiedergabe zu filtern. Diese Filterung wird auch Entzerrung (engl. Equalization) genannt. Die Entzerrung ist unter anderem deshalb nötig, weil die Kopfhörermembran nicht an der gleichen Stelle wie die Mikrofonmembran im Kunstkopf platziert werden kann. In Abbildung 5 ist dies in einer Skizze vereinfacht dargestellt. Der Schall, der vor der Aufnahme mit dem Mikrofon im Kunstkopfohr z. B. bereits eine Cavum-conchae-Nachbildung durchquert hat, wird bei der Wiedergabe durch einen Kopfhörer noch einmal durch das menschliche Cavum conchae geleitet. Durch die Ankopplung des Kopfhörers an das Ohr und die unterschiedlichen Abschlüsse (Trommelfell \leftrightarrow Mikrofon) wird zudem das Schallfeld im Ohr verändert. Mithilfe der Entzerrung können diese Effekte

ausgeglichen werden, so dass beim Abhören einer Kunstkopfaufnahme am Trommelfell des Hörers die gleichen Signale anliegen, als wäre der Hörer im ursprünglichen Schallfeld anwesend. Zusätzlich können mit der Entzerrung eventuell auftretende Unregelmäßigkeiten der Übertragungseigenschaften des Kopfhörers ausgeglichen werden.

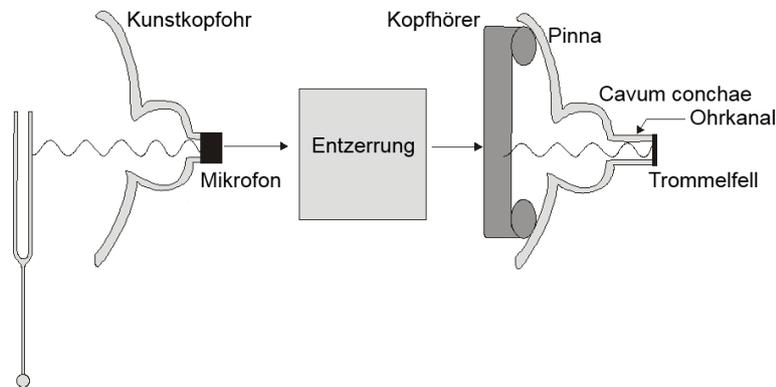


Abbildung 5: Entzerrung einer Kunstkopfaufnahme für die korrekte Wiedergabe

Entzerrungsschnittstelle

Um die Kunstkopfsignale kompatibel zu konventioneller Messtechnik (Mikrofonaufnahmen) analysieren zu können, muss eine geeignete Schnittstelle definiert werden. Die für die gehörrichtige Reproduktion der Schallsignale nötige Entzerrung H_{total} wird bei HEAD-acoustics-Produkten in zwei Teilentzerrungen (Aufnahme-Entzerrung H_{record} , Wiedergabe-Entzerrung $H_{playback}$) aufgeteilt, so dass eine solche Schnittstelle entsteht. An dieser Schnittstelle ist das Kunstkopfsignal durch die Aufnahme-Entzerrung H_{record} gefiltert, um es mit konventionellen Mikrofonaufnahmen vergleichbar zu machen. Dieses Signal kann dann für die Signalanalyse verwendet werden. Die Aufteilung ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

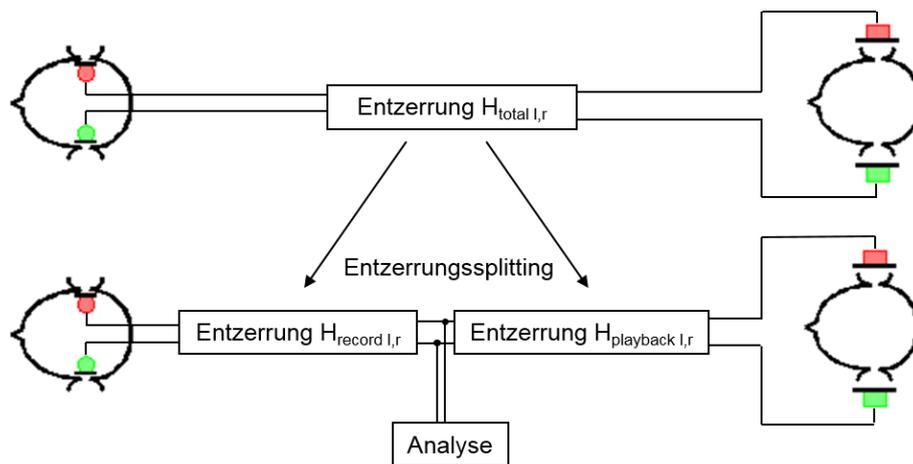


Abbildung 6: Aufspaltung der Entzerrung für die Analyse

Um zu gewährleisten, dass das Signal an der Schnittstelle dem einer konventionellen Mikrofonaufnahme entspricht, stehen für verschiedene Schallfelder verschiedene Aufnahme-Entzerrungen H_{record} zur Verfügung. Die Kunstkopfmesssysteme von HEAD acoustics bieten die folgenden drei Aufnahme-Entzerrungen an: Freifeld (FF), Diffusfeld (DF) und Richtungsunabhängig (Independent of Direction, ID). Für die gehörrichtige Wiedergabe muss die Wiedergabe-Entzerrung $H_{playback}$ die Aufnahme-Entzerrung H_{record} ausgleichen und die Gesamt-Entzerrung H_{total} herstellen. Nur so ist sichergestellt, dass beim Abhören der Kunstkopfaufnahme die gleichen Signale am Trommelfell anliegen, als wäre der Hörer im ursprünglichen Schallfeld anwesend gewesen. Damit beim späteren

Abhören die verschiedenen, schallfeldspezifischen Aufnahme-Entzerrungen korrekt ausgeglichen werden, stehen auf den Wiedergabegeräten von HEAD acoustics entsprechende Wiedergabe-Entzerrungen zur Verfügung.

Sowohl beim Freifeld als auch beim Diffusfeld handelt es sich um Schallfelder mit exakt festgelegten Rahmenbedingungen. Diese Rahmenbedingungen liegen allerdings in der Praxis nur selten vor. Aus diesem Grund wurde von HEAD acoustics die ID-Entzerrung entwickelt. Die ID-Entzerrung filtert nur die durch Resonanzen verursachten, richtungsunabhängigen Anteile der Übertragungsfunktion aus dem Kunstkopfsignal heraus. Die FF- bzw. DF-Entzerrung entfernt auch die richtungsabhängigen Anteile aus dem Signal. Während die FF- und DF-Entzerrungen durch umfangreiche Messungen bestimmt wurden, basiert die ID-Entzerrung auf mathematischen Berechnungen.

In Abbildung 7 ist die grundlegende Vorgehensweise zur Bestimmung der FF-Entzerrung schematisch dargestellt. Um die Freifeld-Entzerrung für einen Kunstkopf zu bestimmen, wird dieser in einem Freifeld von vorn aus einem Abstand von 3 m mit weißem Rauschen beschallt. Dann wird der Versuch noch einmal durchgeführt, wobei der Kunstkopf durch ein Messmikrofon ersetzt wird. Die beiden resultierenden Spektren der Kunstkopf- und der Mikrofonaufnahme werden voneinander subtrahiert. Das Ergebnis ist ein FF-Entzerrungsfilter, mit dem eine Kunstkopfaufnahme unter den gegebenen Schallfeldbedingungen so gefiltert werden kann, dass sie einer Mikrofonaufnahme entspricht. Die Entzerrung arbeitet aber natürlich nur dann korrekt, wenn die vorgegebenen Schallfeldbedingungen (Freifeld, Beschallung von vorn aus mindestens 3 m Abstand) erfüllt sind. Für andere Schallfeldbedingungen bzw. Schalleinfallrichtungen müssen andere Entzerrungen verwendet werden.

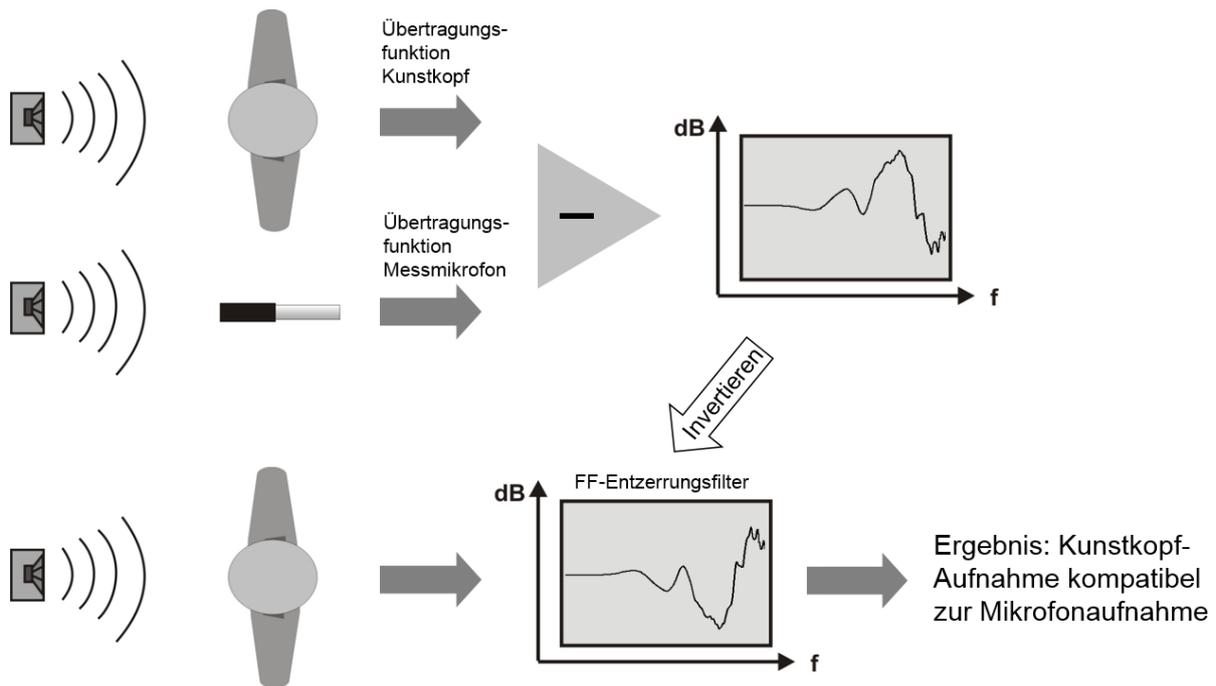


Abbildung 7: Messung zur Bestimmung der Freifeld-Entzerrung (vereinfacht)

Mit der FF-Entzerrung kann also eine Kunstkopfaufnahme, die im Freifeld bei Schalleinfall von vorne aufgezeichnet wurde, so entzerrt werden, dass das Kunstkopfsignal mit einer entsprechenden Mikrofonaufnahme vergleichbar ist. Entsprechend wird mit der DF-Entzerrung eine Kunstkopfaufnahme entzerrt, die in einem Diffusfeld mit Schalleinfall aus allen Richtungen aufgezeichnet wurde. In Schallfeldern, die weder einem Diffusfeld noch einem Freifeld entsprechen, sollte die ID-Entzerrung verwendet werden. Die Verwendung der falschen Entzerrung, d. h. einer Entzerrung, die nicht den vorhandenen Schallfeldbedingungen und der Schalleinfallrichtung entspricht, verfälscht das aufgezeichnete Signal. Ein falsch entzerrtes Kunstkopfsignal ist nicht mit einem Mikrofonsignal vergleichbar und kann zu möglichen Fehlinterpretationen bei der Analyse führen.

Abbildung 8 zeigt den Frequenzverlauf der drei Entzerrungskurven im Vergleich.

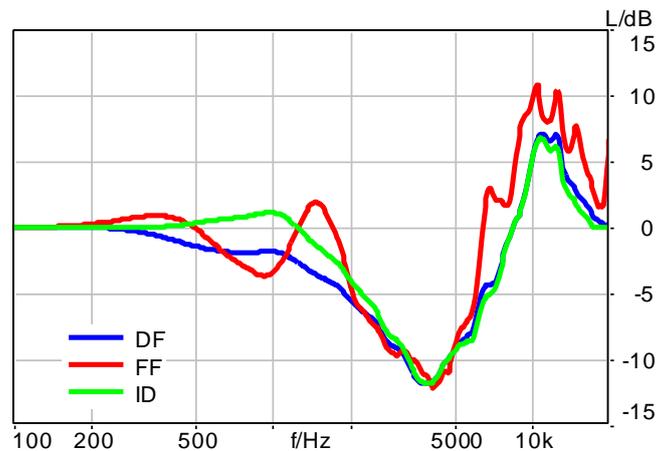


Abbildung 8: Frequenzverlauf der verschiedenen Entzerrungsfunktionen

Eine Kunstkopfaufnahme, die mit der passenden Aufnahme-Entzerrung durchgeführt wurde, ist mit einer konventionellen Mikrofonaufnahme weitestgehend vergleichbar und kann mit einer Signalanalyse-Software, z. B. mit der ArtemiS SUITE, untersucht werden.

Binaurale Aufnahmen mit anderen Aufnahmegeräten

Nicht immer kann für eine binaurale Aufnahme ein Kunstkopf verwendet werden. Das Fahrzeuginnenraumgeräusch an der Position des Fahrers kann während der Fahrt nicht mit einem Kunstkopf aufgezeichnet werden. Die Fahrerposition muss von einer Person eingenommen werden, die in der Lage ist, das Fahrzeug zu steuern. Für eine solche Aufgabe wurde das Kopfbügelmikrofon BHM (Binaural Head Microphone) entwickelt (Abbildung 9).



Abbildung 9: Kopfbügelmikrofon BHM

Ein solches Aufnahmegerät besteht aus zwei Sondenmikrofonen, die der Fahrer während der Fahrt auf dem Kopf bzw. in den Ohren trägt. Die beiden Mikrofone nehmen über die Sonden den Schalldruckpegel an den beiden Ohreingängen des Fahrers auf. Statt durch den Kunstkopf werden die nötigen Veränderungen im Schallfeld durch den Fahrer hervorgerufen. Auf diese Weise erhält der Benutzer eine binaurale Geräuschaufnahme, die mit einer Kunstkopfaufnahme vergleichbar ist.

Eine Kopfbügelmikrofon-Aufnahme muss ebenso wie eine Kunstkopfaufnahme entzerrt werden, damit beim Anhören dieser Aufnahme der gleiche Eindruck entsteht, den ein Hörer im originalen Schallfeld gehabt hätte. Für die Kopfbügelmikrofone steht die ID-Entzerrung zur Verfügung, d. h. nur die richtungsunabhängigen Veränderungen des Schallfeldes werden entzerrt. Die ID-Entzerrung für das Kopfbügelmikrofon basiert auf Messungen mit mehreren unterschiedlichen Trägern und wurde so entworfen, dass eine ID-entzerrte Kopfbügelmikrofon-Aufnahme mit einer ID-entzerrten Kunstkopfaufnahme vergleichbar ist. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrie von verschiedenen

Kopfbügelmikrofon-Trägern kann es zu geringfügigen Abweichungen zwischen den verschiedenen Aufnahmen kommen.¹

Genau wie beim Kunstkopf ist auch die Entzerrung für das Kopfbügelmikrofon geteilt, so dass eine Schnittstelle zur konventionellen Messtechnik entsteht. Im Unterschied zu Kunstkopfmesssystemen, bei denen die Entzerrung direkt durch die eingebaute Elektronik erfolgt, muss bei einer Aufnahme mit einem Kopfbügelmikrofon BHM von HEAD acoustics die Entzerrung entweder durch das Frontend oder durch die Aufnahme-Software durchgeführt werden.² Dabei ist zu beachten, dass die Entzerrung nur einmal durchgeführt wird, ansonsten ist die Aufnahme mit einem Messfehler behaftet, durch den die Klangfarbe der Aufnahme verfälscht wird. Die entzerrten, binauralen Aufnahmen können dann genau wie eine Kunstkopfaufnahme analysiert werden.

Ein weiteres binaurales Aufnahmegerät von HEAD acoustics ist das binaurale Headset BHS II. Dieses Headset ist eine binaurale Aufnahme- und Wiedergabeeinheit, die z. B. an SQuadriga II (Abbildung 10) oder SQobold angeschlossen werden kann.



Abbildung 10: SQuadriga II mit BHS II

Die BHS-II-Aufnahmen können genau wie Kopfbügelmikrofon-Aufnahmen ID-entzerrt werden und sind dann mit einer ID-entzerrten Kunstkopfaufnahme vergleichbar. Allerdings sind die Abweichungen zwischen BHS-II-Aufnahme und Kunstkopfaufnahme unter Umständen größer als die zwischen Kopfbügelmikrofon-Aufnahme und Kunstkopfaufnahme. Dies liegt an der unterschiedlichen Bauweise der Geräte und der unterschiedlichen Art, wie sie getragen werden. Ist das BHS II über den BHS-Eingang mit SQuadriga II oder SQobold verbunden, wird die Entzerrung der BHS-II-Aufnahmen automatisch durchgeführt, so dass die BHS-II-Aufnahme richtig entzerrt vorliegt und genau wie eine Kunstkopfaufnahme analysiert werden kann.³

Wird das BHS II über einen Adapter an zwei Line/ICP-Kanäle angeschlossen, muss der Anwender die Verwendung der korrekten Entzerrungsfiler sicherstellen. Für Aufnahmen im Stand-alone-Modus mit SQuadriga II oder SQobold können Sie die Filter auf das Frontend übertragen und für die entsprechenden Kanäle aktivieren. Wenn Sie im Frontend-Modus mit einer Aufnahme-Software aufnehmen, können Sie die Entzerrung auch durch die Aufnahme-Software durchführen lassen. Dann müssen die Entzerrungsfiler bei der Sensordefinition oder in der Kanalliste hinterlegt werden. Auch hier muss darauf geachtet werden, dass die Entzerrung nur einmal durchgeführt wird.

¹ Einen Überblick über diese Unterschiede gibt Ihnen die Application Note „Vergleichbarkeit von Aufnahmen mit Messsystemen von HEAD acoustics“.

² Detaillierte Informationen hierzu finden Sie in der Application Note „Verwendung des Kopfbügelmikrofons BHM“.

³ Die automatische Entzerrung kann allerdings nur dann korrekt arbeiten, wenn die für das angeschlossene BHS II individuell passenden Entzerrungsfiler verwendet werden. Um dies sicherzustellen, muss das BHS II, dessen Seriennummer auf dem SQuadriga II oder SQobold angegeben ist, an den BHS-Eingang angeschlossen werden.

Analyse einer Kunstkopfaufnahme

Der Unterschied zwischen einer korrekt entzerrten Kunstkopfaufnahme und einer Mikrofonaufnahme liegt unter anderem darin, dass es sich bei der Kunstkopfaufnahme um eine zweikanalige Messung handelt, während die Mikrofonaufnahme nur einen Kanal liefert. Um die Analyse der Kunstkopfaufnahme zu vereinfachen, werden die beiden Kunstkopffkanäle häufig von den Anwendern gemittelt. Dies ist allerdings nur selten sinnvoll.

In der Praxis handelt es sich bei Kunstkopfaufnahmen um dichotische Signale, d. h. die Signale der beiden Ohren sind unterschiedlich. Bei der Geräuschwahrnehmung und -bewertung durch den Menschen werden diese unterschiedlichen Signale nicht einfach gemittelt. Bei Untersuchungen zur Beurteilung der Lästigkeit von dichotischen Signalen hat sich gezeigt, dass die empfundene Lästigkeit zunimmt, wenn die interauralen Pegeldifferenzen zunehmen. Auch bei anderen Geräuschaspekten repräsentiert der arithmetische Mittelwert nicht unbedingt den gesamten Geräuscheindruck, weil die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts u. U. dazu führt, dass der negative Wert des einen Kanals durch den positiven Wert des anderen Kanals aufgehoben wird (siehe hierzu auch das Anwendungsbeispiel im Anhang dieser Application Note). Dies entspricht aber nicht in jedem Fall der Geräuschverarbeitung und -wahrnehmung des Menschen.

Aus diesem Grund sollten bei der Analyse von Kunstkopfsignalen zunächst immer beide Kanäle untersucht werden. Zeigt ein Vergleich der beiden Kanäle, dass nur ein geringer Unterschied vorliegt, ist es ausreichend, bei den folgenden Untersuchungen nur einen der beiden Kanäle zu betrachten. Liegen größere Abweichungen vor, kann es wahrnehmungsbezogen sinnvoll sein, den Kanal für die weiteren Untersuchungen zu verwenden, der den kritischeren Analysewert (also z. B. den höheren Wert für die Schärfeanalyse) liefert. In der Literatur sind z. B. für die Lautheit verschiedene Berechnungsvorschriften beschrieben, mit denen die Werte für den linken und rechten Kanal zu einem Wert zusammengefasst werden können. Diese Vorschriften unterscheiden sich aber je nach Veröffentlichung und sind sehr stark von der Wahl der dargebotenen Signale und der Darbietungsform (z. B. über Kopfhörer oder über Lautsprecher) abhängig, so dass keine allgemein gültige Empfehlung für eine bestimmte Rechenvorschrift gegeben werden kann.

Zusätzlich zur Signalanalyse sollten die Kunstkopfsignale immer angehört werden. Ein Vergleich des Höreindrucks mit den Ergebnissen der Signalanalyse zeigt, welche Analyse den Höreindruck am besten wiedergibt. Außerdem zeigt der Vergleich des Höreindrucks mit den Analyseergebnissen, welcher Kanal besonders beachtet werden muss.

Wiedergabe binauraler Aufnahmen mit der ArtemiS SUITE⁴

Bei der Wiedergabe der binauralen Aufnahmen ist wichtig, dass der Wiedergabepegel und die Wiedergabe-Entzerrung den Einstellungen bei der Aufnahme angepasst sind. Wie bereits oben beschrieben, muss die Wiedergabe-Entzerrung H_{playback} so gewählt werden, dass diese zusammen mit der Aufnahme-Entzerrung H_{record} der Gesamt-Entzerrung H_{total} entspricht. Die Wahl des Entzerrungsfilters beeinflusst nicht nur den Wiedergabepegel, sondern auch die spektrale Verteilung, also die Klangfarbe der Aufnahme.

HEAD acoustics stellt für die Wiedergabe von binauralen Aufnahmen einen programmierbaren Kopfhörerentzerrer *labP2* zur Verfügung (Abbildung 11). Dieser ist ebenso wie das Vorgängermodell PEQ V mit allen nötigen Filtern für die Wiedergabe-Entzerrung programmiert, so dass die binaurale Aufnahme richtig entzerrt wiedergegeben werden kann und ein zum Originalschallfeld vergleichbarer Geräuscheindruck entsteht.

Eine pegelrichtige und entzerrte Wiedergabe ist allerdings nur dann gegeben, wenn für das *labP2* eine werkseitige Kalibrierung durchgeführt und die nötigen individuellen Entzerrungsfiler für die verwendeten Kopfhörer aufgespielt wurden. Diese individuellen Filter enthalten dann nicht nur die Wiedergabe-Entzerrung, sondern auch Filter, mit denen eventuelle Abweichungen der Kopfhörer-

⁴ Die Beschreibungen in dieser Application Note beziehen sich auf die ArtemiS SUITE 9.0. Die allgemeine Vorgehensweise ist auch für andere Versionen ab ArtemiS SUITE 6.0 gültig. Allerdings können sich Änderungen im Funktionsumfang und in der Benutzer-Oberfläche ergeben.

Übertragungseigenschaften ausgeglichen werden. Die Nummer über den Kopfhörerbuchsen am *labP2* gibt die Seriennummer des Kopfhörers an, für den dieser Ausgang die korrekte Kalibrierung und Entzerrung liefert.



Abbildung 11: Vorder- und Rückseite eines *labP2*

Auswahl der Wiedergabe-Entzerrung

Die Einstellung der Wiedergabe-Entzerrung erfolgt bei der Wiedergabe aus der ArtemiS SUITE automatisch. Dafür gibt die ArtemiS SUITE die in der Aufnahme-Datei enthaltenen Informationen bzgl. der Entzerrung an das Wiedergabegerät weiter. Liegen diese Informationen in der Datei nicht vor, stellt die ArtemiS SUITE das Wiedergabegerät automatisch auf die für diesen Fall definierte Standard-Entzerrung ein. Die Standard-Entzerrung wählen Sie über **Werkzeuge -> Einstellungen -> Generell -> Wiedergabe -> Wiedergabegerät** in der Zeile **Standardentzerrung** aus (engl. **Tools -> Options -> Basic -> Playback -> Playback Frontend -> Default Equalization**, siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Wiedergabeeinstellungen zur Festlegung der Standard-Entzerrung

Auswahl des Wiedergabepegels für Kunstkopfaufnahmen

Neben der richtigen Entzerrungseinstellung ist die Auswahl des Wiedergabepegels entscheidend für die korrekte, kalibrierte Wiedergabe. Bei Kunstkopfaufnahmen ist der Aussteuerungsbereich in 10-dB-Schritten fest vorgegeben (84 dB, 94 dB usw. jeweils zuzüglich 6 dB(SPL) Aussteuerungsreserve, sogenannter „Head Room“). Dieser Aussteuerungsbereich entspricht der Einstellung, die an dem Wiedergabegerät ausgewählt werden muss, um die Wiedergabe pegelrichtig durchzuführen.

Mit der ArtemiS SUITE 6.0 wurde die Wiedergabefunktionalität deutlich verbessert: die ArtemiS SUITE bietet Ihnen nun einige Schutz- und Komfortfunktionen. Dies hat zur Folge, dass sich die Einstellung am Wiedergabegerät von der am Aufnahmeegerät unterscheiden kann. Die Einstellungen für diese Funktionen können Sie auf der Einstellungsseite für die Wiedergabe (**Werkzeuge -> Einstellungen -> Generell -> Wiedergabe -> Wiedergabepegel**, engl. **Tools -> Options -> Basic -> Playback -> Playback Level**, siehe Abbildung 13) definieren.



Abbildung 13: Wiedergabe-Einstellungen mit Schutz- und Komfortfunktionen

Im Feld **Maximal-Pegel** (engl. **Hearing Protection Level**) können Sie festlegen, welcher Schalldruckpegel in dB(SPL) bei der Wiedergabe nicht überschritten werden darf. Der erste Wert in diesem Feld gibt den maximalen Pegel an, im Beispiel: **100 (94+6)**. Dieser Wert setzt sich zusammen aus 94 dB(SPL) (am Wiedergabegerät eingestellter Aussteuerungsbereich) + 6 dB(SPL) (Aussteuerungsreserve). Im nächsten Feld können Sie einen **Normalisierungs-Pegel** (engl. **Comfort Level**) angeben. Dieser Wert gibt die für Sie angenehme Abhör lautstärke an. Gültige Werte hierfür liegen zwischen 50 dB(SPL) und dem eingestellten **Maximal-Pegel**.

Das Wiedergabegerät wird durch die ArtemiS SUITE automatisch auf den **Maximal-Pegel** eingestellt (Beispiel: **Maximal-Pegel: 100 (94+6)** führt zur Einstellung **94** am Wiedergabegerät).

Für die Wiedergabe stehen außerdem zwei Aussteuerungsmodi zur Verfügung:

Im Modus **Automatisch** (engl. **Automatic**) bestimmt die ArtemiS SUITE den höchsten Pegel der Datei, die abgespielt wird. Sofern dieser unterhalb des von Ihnen eingestellten Aussteuerungsbereiches liegt, erfolgt die Wiedergabe pegelrichtig. Liegt der höchste Pegel oberhalb des eingestellten Aussteuerungsbereiches, erfolgt die Wiedergabe automatisch mit einem verringerten Pegel. Dafür wird innerhalb der gesamten Datei die maximale Überschreitung in Relation zum eingestellten Aussteuerungsbereich bestimmt und die gesamte Datei um diesen Faktor abgesenkt. Dann erfolgt die Wiedergabe nicht mehr pegelrichtig. Dies wird dem Benutzer durch das ausgegraute Kopfsymbol im Player verdeutlicht. Außerdem wird in der Statusleiste die Warnung **Wiedergabe mit verringertem Pegel** (engl. **Reduced Playback Level**) angezeigt.

Im Modus **Normalisiert** (engl. **Normalized**) werden alle Signale unabhängig von den aufgezeichneten Originalpegeln immer mit dem eingestellten **Normalisierungs-Pegel** ausgegeben. Aufnahmen, deren höchste Pegel unterhalb des **Normalisierung-Pegels** liegen, werden dafür entsprechend angehoben, während lautere Aufzeichnungen, mit einem Maximal-Pegel oberhalb des **Normalisierungs-Pegels**, abgesenkt werden. Dies erlaubt Ihnen den Hörvergleich von unterschiedlich lauten Aufnahmen unabhängig von der Lautstärke (z. B. bei Aufnahmen von vergleichbaren Produkten, die in unterschiedlichen Abständen zur Quelle aufgezeichnet wurden). Die Wiedergabe im Modus **Normalisiert** ist nicht gehör richtig.

Der Modus **Automatisch** kann nur für Luftschallsignale verwendet werden, für alle anderen Signalarten (z. B. Körperschall, Beschleunigung, Spannung) wird von der ArtemiS SUITE automatisch der Modus **Normalisiert** verwendet. Bei binauralen Aufnahmen bleiben unabhängig vom Aussteuerungsmodus die Pegelunterschiede zwischen dem linken und rechten Ohr immer erhalten. Bei jeder Art von Anpassung wird dazu jeweils derjenige Kanal verwendet, der den höheren Maximal-Pegel enthält. Der andere Kanal wird dann mit dem gleichen Faktor verändert, aber relativ zum lautereren Kanal mit den richtigen Pegelunterschieden wiedergegeben.

Bei der Wiedergabe über eine Playliste kann in der Einstellung **Normalisiert** zusätzlich die Funktion **Relative Pegel** (engl. **Comparable Levels**) aktiviert werden. In diesem Modus ermittelt die ArtemiS SUITE den höchsten Pegel innerhalb einer Playliste sowie einen entsprechenden Korrekturwert, mit dem die Wiedergabe entsprechend angepasst wird, damit dieser Pegel dem gewünschten **Normalisierungs-Pegel** entspricht. Alle Dateien in der Playliste werden entsprechend abgeschwächt bzw. verstärkt wiedergegeben, so dass die Pegelunterschiede innerhalb einer Aufnahme und zwischen den verschiedenen Aufnahmen der Playliste erhalten bleiben. Der absolute Wiedergabepiegel ist allerdings bei dieser Wiedergabe nicht korrekt.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Einstellungen, mit denen Sie den Wiedergabepiegel beeinflussen können, steht Ihnen im Player ein Lautstärkereglер zur Verfügung, mit dem Sie individuelle Pegelanpassungen von -40 dB bis +10 dB vornehmen können (siehe Abbildung 14).

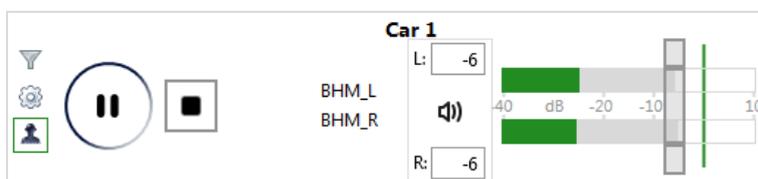


Abbildung 14: Player mit Lautstärkereglер

Der Schieberegler selbst ist dreigeteilt, sodass Sie sowohl den linken und den rechten Kanal (Balken in der Mitte) gemeinsam, als auch beide einzeln (Balken außen) einstellen können. Wenn Sie den Mauszeiger über den Schieberegler führen, erscheint zusätzlich ein Bedienfeld, in dem Sie die gewünschte Pegelanpassung numerisch eingeben können.

Auswahl des Wiedergabepegels für BHM-Aufnahmen

Die Wiedergabe einer BHM-Aufnahme sollte ebenfalls über die Analysesoftware ArtemiS SUITE, *labP2* bzw. PEQ V und einen Kopfhörer erfolgen. Da für die BHM-Aufnahme nur die ID-Entzerrung zur Verfügung steht, wird das Wiedergabegerät für die Wiedergabe immer auf ID eingestellt.

Die Einstellung des Pegels erfolgt auf dieselbe Weise wie im vorherigen Kapitel beschrieben, d. h. auch bei der Wiedergabe von BHM-Aufnahmen stehen Ihnen die beiden Modi **Automatisch** und **Normalisiert** zur Verfügung. So können Sie auch bei der Wiedergabe von diesen Geräuschen eine gehörrichtige Wiedergabe erreichen oder – falls die Aufnahmen zu laut sind – eine auf Ihren **Normalisierungs-Pegel** reduzierte Wiedergabe durchführen.

Falls die beiden Kanäle der BHM-Messung unterschiedliche Aussteuerungsbereiche besitzen, wird der Kanal mit dem geringeren Aussteuerungsbereich von der ArtemiS SUITE automatisch umgerechnet, so dass auch für diesen Kanal eine pegelrichtige Wiedergabe erfolgen kann.

Wiedergabe binauraler Aufnahmen mit BHS II und SQuadriga II oder SQobold

Da es sich bei dem Headset BHS II um eine Aufnahme- und Wiedergabeeinheit handelt, erfolgt nicht nur die Aufnahme, sondern auch die Wiedergabe direkt über das BHS II, sofern es über den BHS-Eingang mit einem SQuadriga II oder SQobold verbunden ist. Über diese Kombination können aber nicht nur BHS-II-Aufnahmen, sondern auch andere binaurale Aufnahmen, z. B. Kunstkopfaufnahmen, wiedergegeben werden. Um auch Kunstkopfaufnahmen, die nicht mit der ID-Entzerrung aufgenommen wurden, korrekt wiedergeben zu können, stehen für die Wiedergabe am SQuadriga II und SQobold auch die FF- und DF-Entzerrungen zur Verfügung.

Im Stand-alone-Modus können Sie Aufnahmen von der Speicherkarte direkt mit dem SQuadriga II oder SQobold wiedergeben. Sobald die Funktion **Auto** im **Headphone**-Menü ausgewählt ist, werden die Entzerrungs- und Pegelinstellung für die Wiedergabe automatisch durch das Frontend durchgeführt. Außerdem können die Einstellungen für Entzerrung und Pegel auch manuell ausgewählt werden. Wenn die automatische Einstellung deaktiviert wurde, müssen Sie die Entzerrung und den Aussteuerungsbereich für die Wiedergabe so wählen, dass diese den Einstellungen bei der Aufnahme entsprechen, um eine gehörrichtige Wiedergabe zu erreichen.

Wird ein SQuadriga II oder SQobold als Wiedergabegerät für die ArtemiS SUITE verwendet, übernimmt die ArtemiS SUITE die Einstellung und stellt automatisch, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, die korrekte Entzerrung sowie den gewünschten Pegel ein.

Anwendungsbeispiel

BHM-Aufnahme im Fahrzeuginnenraum

Der Fahrzeuginnenraum ist aufgrund der Mischung aus reflektierenden und absorbierenden Materialien weder ein reines Freifeld noch ein Diffusfeld. Für die Aufnahme in der Fahrgastzelle eines PKWs empfiehlt sich daher die Verwendung der ID-Entzerrung. Im folgenden Beispiel wurde ein BHM mit ID-Entzerrung für die Aufnahme verwendet. Die Aufnahme wurde direkt auf der Computerfestplatte gespeichert und steht nun richtig entzerrt für die Analyse zur Verfügung.

Analyse der BHM-Aufnahme

In Abbildung 15 ist die Analyse **FFT über Zeit** der Fahrzeuginnenraum-Aufnahme dargestellt. Die FFT-Analyse zeigt deutlich, dass zwischen 8,5 und 13,5 Sekunden das Signal eine Resonanz durchläuft. Diese Resonanz ist im linken Kanal stärker als im rechten.

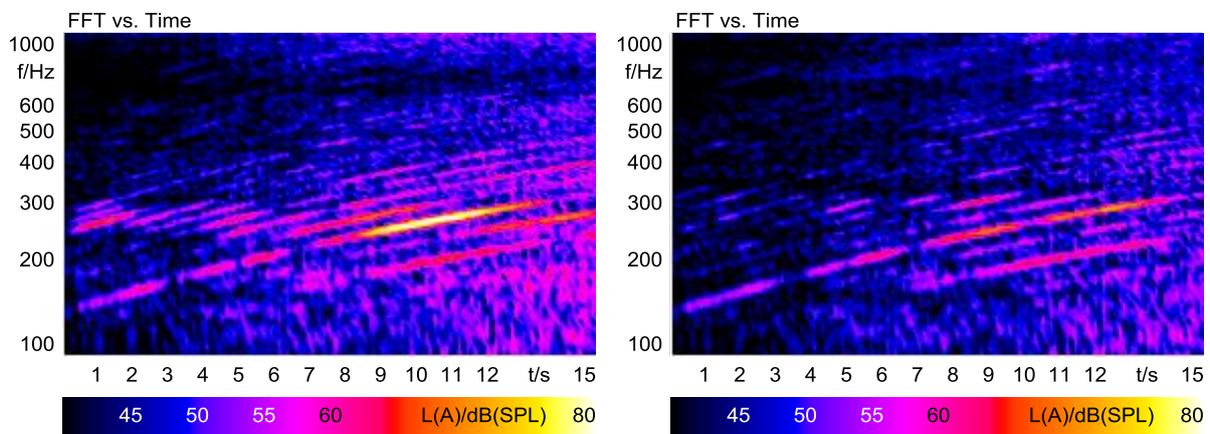


Abbildung 15: Zeitabhängige FFT-Analyse eines Fahrzeuginnenrausches; links: linker Kanal, rechts: rechter Kanal

In Abbildung 16 ist das Ergebnis einer Analyse **Spezifische Prominenz** des Fahrzeuginnenrausches aus Abbildung 15 dargestellt. Die Analyse **Spezifische Prominenz** dient dazu, tonale Komponenten in einem Signal zu finden und quantitativ darzustellen. Dazu wird z. B. in einem terzbreiten Frequenzband die Leistung bestimmt, die dann auf den Mittelwert der Leistungen in den benachbarten Terzbändern bezogen wird. Je höher der resultierende Zahlenwert, desto prominenter ist die jeweilige tonale Komponente ausgeprägt. Die Spezifische-Prominenz-Analyse ist sehr gut geeignet, um die Resonanzen des oben beschriebenen Signals aufzuspüren.

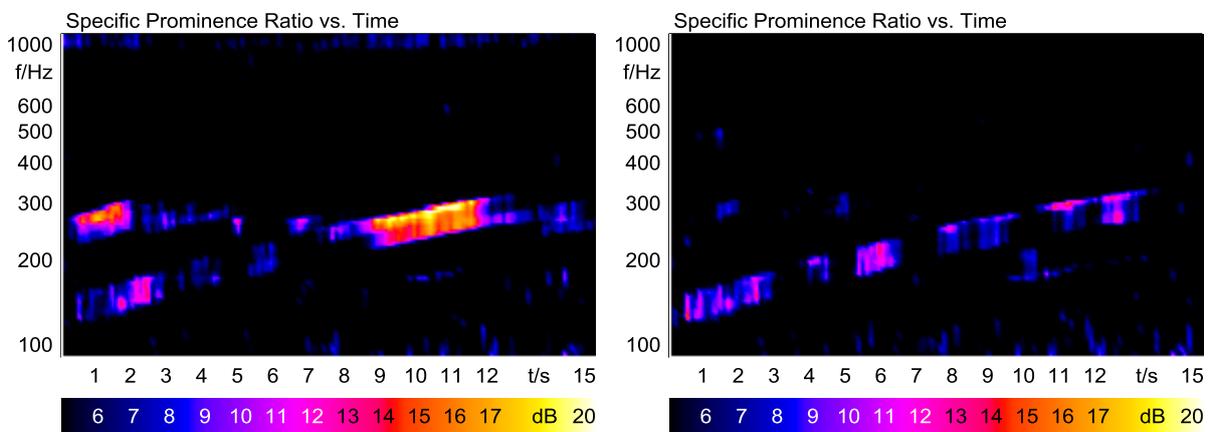


Abbildung 16: Spezifische-Prominenz-Analyse des Fahrzeuginnenrausches aus Abbildung 15; links: linker Kanal, rechts: rechter Kanal

Auch diese Analyse zeigt deutlich, dass die Resonanz im linken Ohr sehr viel ausgeprägter ist als im rechten. Bei einer Mittelung der beiden Kanäle (siehe Abbildung 17) hingegen wird die Aussagekraft der Analyse reduziert. Die tonale Komponente ist zwar auch in der gemittelten Analyse vorhanden, aber die Ausprägung hat deutlich abgenommen. In diesem Fall ist es also entscheidend, die beiden Kanäle nicht zu mitteln. Stattdessen würde es sich anbieten, für die weiteren Analysen dieser Art vor allem den linken Kanal zu betrachten.

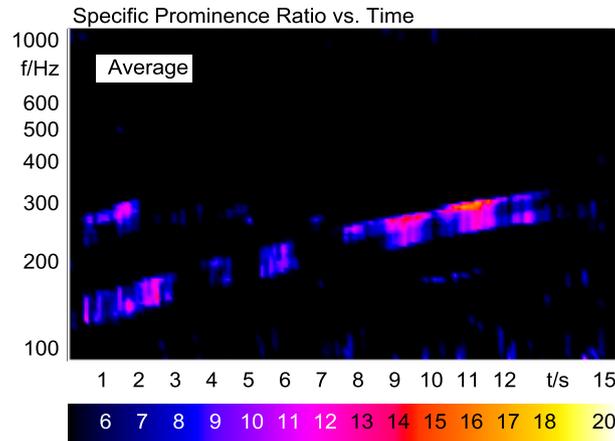


Abbildung 17: Gemittelte Werte der Analyse **Spezifische Prominenz** aus Abbildung 16

Um zu überprüfen, ob die Analyseergebnisse dem Wahrnehmungseindruck entsprechen, muss die Geräuschdatei angehört werden.

Wiedergabe der BHM-Aufnahme

Für die Wiedergabe der BHM-Aufnahme soll in diesem Anwendungsbeispiel die ArtemiS SUITE und ein *labP2* benutzt werden.

Für die Wiedergabe bestimmt die ArtemiS SUITE die maximale Schalldruckamplitude in der Aufnahme und zeigt diese in der Infokachel des Players an. Im vorliegenden Beispiel beträgt dieser Wert 7,641 Pa. Dies entspricht einem Schalldruckpegel von 108,6 dB(SPL)⁵.

Bei der Wiedergabe mit einem *labP2* ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- **Aussteuerung: Automatisch, Maximal-Pegel: 120 (114+6) dB(SPL)**

(d. h. gewählter **Maximal-Pegel** > 108,6 dB(SPL):

Left	Right
7,641 Pa	7,332 Pa
- no level adaptation -	
44,1 kHz	44,1 kHz
ID	ID

Das *labP2* wird von der ArtemiS SUITE auf **114** sowie **ID**-Entzerrung eingestellt. Es ist keine Pegelanpassung nötig, die Wiedergabe erfolgt somit pegelrichtig und korrekt entzerrt. Dies wird durch den grünen Rahmen um das Kunstkopfsymbol im Player verdeutlicht.

- **Aussteuerung: Automatisch, Maximal-Pegel: 110 (104+6) dB(SPL)**

(d. h. gewählter **Maximal-Pegel** < 108,6 dB(SPL):

Left	Right
7,641 Pa	7,332 Pa
-4,6 dB	-4,6 dB
44,1 kHz	44,1 kHz
ID	ID

Das *labP2* wird von der ArtemiS SUITE auf **104** sowie **ID**-Entzerrung eingestellt. Da der höchste Schalldruckpegel in der Aufnahme den eingestellten Maximal-Pegel übersteigt, wird die gesamte Datei für die Wiedergabe im Pegel abgesenkt. Die Pegelabsenkung beträgt:

$$\Delta L = 104 \text{ dB(SPL)} - 108,6 \text{ dB(SPL)} = -4,6 \text{ dB(SPL)}$$

Da die Wiedergabe für die gesamte Aufnahme mit reduziertem Pegel erfolgt, bleiben die relativen Pegelunterschiede innerhalb der Aufnahme erhalten. Die Wiedergabe erfolgt mit der korrekten Entzerrung, allerdings nicht mehr pegelrichtig. Dies wird durch das ausgegraute Kunstkopfsymbol sowie eine entsprechende Warnung in der Statusleiste verdeutlicht.

⁵ Der Schalldruckpegel berechnet sich nach der folgenden Formel: $L = 20 \cdot \log\left(\frac{\bar{p}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}}\right)$. Dabei ist \bar{p} der Effektivwert der Schalldruckamplitude \hat{p} , der sich bei sinusförmigen Signalen über die Formel $\bar{p} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}}$ bestimmen lässt.

- **Aussteuerung: Normalisiert, Maximal-Pegel: 120 (114+6) dB(SPL), Normalisierungs-Pegel: 110 dB(SPL)**

(d. h. gewählter **Normalisierungs-Pegel** > 108,6 dB(SPL):

Left	Right
7,641 Pa	7,332 Pa
+1,4 dB	+1,4 dB
44,1 kHz	44,1 kHz
ID	ID

Das *labP2* wird von der ArtemiS SUITE auf **114** sowie **ID**-Entzerrung eingestellt. Bei der Wiedergabe wird die Lautstärke so angehoben, dass der höchste in der Aufnahme vorkommende Pegel dem gewählten Normalisierungs-Pegel von 110 dB(SPL) entspricht. Dazu wird eine Pegelanpassung von $\Delta L = 110 \text{ dB(SPL)} - 108,6 \text{ dB(SPL)} = 1,4 \text{ dB(SPL)}$ vorgenommen. Die Wiedergabe erfolgt mit der korrekten Entzerrung, allerdings nicht pegelrichtig. Dies wird durch das ausgegraute Kunstkopfsymbol sowie eine entsprechende Warnung in der Statusleiste verdeutlicht.

- **Aussteuerung: Normalisiert, Maximal-Pegel: 110 (104+6) dB(SPL), Normalisierungs-Pegel: 100 dB(SPL)**

(d. h. gewählter **Normalisierungs-Pegel** < 108,6 dB(SPL):

Left	Right
7,641 Pa	7,332 Pa
-8,6 dB	-8,6 dB
44,1 kHz	44,1 kHz
ID	ID

Das *labP2* wird von der ArtemiS SUITE auf **104** sowie **ID**-Entzerrung eingestellt. Bei der Wiedergabe wird die Lautstärke so abgesenkt, dass der höchste in der Aufnahme vorkommende Pegel dem gewählten Normalisierungs-Pegel entspricht. Dazu wird eine Pegelanpassung von $\Delta L = 100 \text{ dB(SPL)} - 108,6 \text{ dB(SPL)} = -8,6 \text{ dB(SPL)}$ vorgenommen.

Die Wiedergabe erfolgt mit der korrekten Entzerrung, allerdings nicht pegelrichtig. Dies wird durch das ausgegraute Kunstkopfsymbol sowie eine entsprechende Warnung in der Statusleiste verdeutlicht.

Weitere Hinweise für die Verwendung unserer binauralen Aufnahme- und Wiedergabegeräte finden Sie in der Application Note „Richtig binaural aufnehmen und wiedergeben“, die Sie im Download Center unserer Webseiten herunterladen können:

http://head-acoustics.de/de/nvh_application_notes_use_of_systems.htm

Haben Sie Fragen an den Autor? Schreiben Sie uns an:

imke.hauswirth@head-acoustics.de.

Wir freuen uns auf Ihre Rückmeldung!