



Tom Ammermann, Hartmut Gieselmann

Akustisches Holodeck

Binaurale Surround-Simulation mit Stereo-Kopfhörern

Bei Stereosignalen unterscheidet man lediglich zwischen links und rechts. Binaurale Surround-Simulationen vermitteln zusätzlich, ob der Ton von vorne, hinten, oben oder unten kommt – und zwar mit jedem handelsüblichen Kopfhörer. Head-Tracking-Systeme simulieren 5.1-Sound von Filmen inzwischen täuschend echt – bald werden uns auch Computerspiele in akustische Holodecks entführen.

Der Mensch hat zwar nur zwei Ohren, aber in der Natur kann er sehr wohl unterscheiden, aus welcher Richtung Geräusche kommen. Die Informationen erhält das Gehirn durch die Auswertung verschiedener psychoakustischer Effekte. Das Stereo-Signal verrät zwar, ob der Pianist von links in die Tasten greift oder das Saxophon von rechts bläst; wenn die Abmischung aber lediglich mit Lautstärkeunterschieden arbeitet, hat der Hörer das Gefühl, der mittig positionierte Sänger säße direkt in seinem Kopf statt vor ihm auf der Bühne.

Mit der in den 30er Jahren entwickelten Kunstkopfaufnahmetechnik konnte man erstmals den kompletten Raum akustisch erfassen. Anfänglich steckten sich die Tonmeister noch selbst

kleine Mikrofone in die Ohren. So konnten sie die Schallwellen genau so aufzeichnen wie sie in den Gehörgang gelangen und somit auch die Richtungsinformationen konservieren, die von der Form des Kopfes und Torsos beeinflusst werden. Aus praktischen Gründen wurden die Mikrofone später in einen Kunstkopf gepackt.

Noch heute werden Kunstköpfe gerne für räumliche Aufnahmen verwendet. Will man jedoch die Räumlichkeit nachträglich zu Mehrkanalaufnahmen hinzufügen, so muss man die einzelnen psychoakustischen Effekte, die von der Form und Beschaffenheit des Kopfes und der Position und Ausrichtung der Ohren abhängen, technisch simulieren. Für die Lokalisation einer Klangquelle

sind Laufzeit-, Frequenz- und Pegeldifferenzen sowie spezifische Frequenzmuster des einfallenden Schalls am rechten und linken Ohr besonders wichtig. Sie werden unter dem Begriff kopfbezogene Übertragungsfunktionen („Head Related Transfer Functions“, HRTF) zusammengefasst. Diese beziehen sich auf den Schall, der die Ohren auf direktem Weg erreicht. Um den umgebenden Raum und die Distanz einer Schallquelle zu erfassen, wertet das Gehirn aber auch die indirekten, von Wänden reflektierten, diffusen Schallwellen aus. Hinzu kommen sogenannte perzeptive Reize, die etwa Drehungen des Kopfes zur genaueren Lokalisierung berücksichtigen. Erst das Zusammenspiel all dieser akustischen Zusatz-

informationen macht die Illusion eines akustischen Raumes, wie ihn eine binaurale (zwei-ohrige) Surround-Simulation liefert, perfekt.

Schattengeräusche

Normale Stereo-Aufnahmen arbeiten hauptsächlich mit Laufzeit- und Pegeldifferenzen, um Geräusche in der horizontalen Ebene zu positionieren. Da sich der Schall in der normalen Atmosphäre mit 330 Metern pro Sekunde ausbreitet (in drei Millisekunden legt er einen Meter zurück), kommen die Schallwellen nicht gleichzeitig an beiden Ohren an. Das Gehirn kann anhand von Phasendifferenzen Laufzeitunterschiede von etwa 10 bis 30 μ s erkennen und dadurch die horizontale Richtung

eines Geräusches auf ein bis drei Grad genau bestimmen. Die HRTFs berücksichtigen zusätzlich frequenzabhängige Pegelunterschiede, die dadurch entstehen, dass hohe Frequenzen bei ihrem Weg um den Kopf herum stärker abgeschwächt werden als tiefe.

Wenn Geräusche jedoch direkt von vorne, hinten oben oder unten kommen, können wir sie weder anhand von Laufzeit- noch Pegeldifferenzen lokalisieren, da die Schallwellen beide Ohren gleichzeitig erreichen. Deshalb zieht das Gehirn in der vertikalen Medianebene Unterschiede innerhalb der Frequenzspektren zu Rate. Je nachdem, aus welcher Richtung der Schall auf den Kopf auftrifft, kommt es zu charakteristischen Abschattungseffekten. Zusätzlich entstehen im Außen- und Mittelohr je nach Einfallswinkel bestimmte Resonanzen. So bilden sich für Geräusche von vorne andere Frequenzverläufe, als wenn sie von hinten kommen würden. Diese unterschiedlichen Frequenzbänder wurden nach ihrem Entdecker Jens Blauert „Blauertsche Bänder“ benannt.

Demnach glauben Hörer, ein Geräusch von vorne zu hören, wenn das Frequenzspektrum in den Bereichen um 315 Hz und 3150 Hz auf einer Breite von jeweils zwei Terzen um bis zu 4 dB angehoben wird. Das Geräusch wirkt dadurch präsenter. Den umgekehrten Effekt erreicht man, wenn man stattdessen die Bänder bei 1 kHz und 10 kHz auf einer Breite von einer Terz anhebt. Dann scheint der Schall diffus von hinten zu kommen, denn hinter dem Rücken liegende Geräusche können nicht so genau lokalisiert werden. Wird hingegen ein schmales Band bei 8 kHz angehoben, so glaubt der Hörer, das Geräusch komme von oben. Billige Effektgeräte neigen dazu, diese Frequenzeffekte zu übertreiben und dadurch die Klangfarbe zu verändern. Es reicht eben nicht aus, die Frequenzen lediglich mit einem Equalizier zu manipulieren.

Das Gehirn kann die vertikale Position einer Schallquelle nicht so genau bestimmen wie die horizontale. Entscheidend ist dabei nicht nur die Richtung, sondern auch, ob der Hörer das Geräusch bereits kennt, da das Richtungs-hören von Kindesbeinen an trainiert wird und das Gehirn bei der

genauen Lokalisation auf seinen bisherigen Erfahrungsschatz zurückgreift.

Aus der Ferne

Da Pegel- und Frequenzunterschiede auch von der Entfernung zur Schallquelle abhängen, kann der Hörer hieraus die Distanz eines Signals bestimmen. Beispielsweise wird im Nahbereich ein Signal aus einem Meter Entfernung anders um den Kopf gebeugt und die Schalldruckdifferenz ist höher als bei einem Signal, dessen Quelle im gleichen Winkel fünf Meter entfernt ist. Im Fernbereich findet die Distanzdefinition einer Signalquelle eher durch Pegelunterschiede im Höhen- und Bassbereich statt. Hohe Frequenzen werden über größere Distanzen von der Luft stärker gedämpft als tiefe. Ein zwei Meter weit entferntes Signal klingt somit deutlich präsenter als eines in 30 Meter Entfernung. Der Direktschall liefert allerdings nur unzureichende Informationen über die Entfernung, wichtige Zusatzinformationen bekommt das Gehirn aus den diffusen Schallwellen, die von Wänden, dem Boden und der Decke reflektiert werden.

Je weiter eine Signalquelle entfernt ist, desto geringer ist der Anteil des Direktschalls im Vergleich zum Diffusschall, der unser Ohr erreicht. Bei weit entfernten Signalquellen ist der direkte Schall kaum lauter als der Hall oder das später eintreffende Echo. Anhand der ersten Reflexionen, die innerhalb von 10 ms eintreffen, kann man etwa die Größe und Ausdehnung einer Schallquelle erkennen. In diesem Bereich nimmt man auch Klang-

verfärbungen wahr. Nach dem „Gesetz der ersten Wellenfront“ bestimmt der Hörer die Richtung eines Schallsignals nur aus den Wellen, die seine Ohren 2 bis 30 ms nach der ersten Wellenfront erreichen. Reflexionen bis 50 ms vermitteln Information über die Raumart und -größe sowie die Distanz zur Schallquelle. Späte Reflexionen ab 100 bis 150 ms bilden die so genannte Nachhallfahne, die dem Zuhörer weitere Informationen über die Raumgröße und Oberflächenbeschaffenheit verrät. Ein Badezimmer mit blanken Kacheln reflektiert den Schall anders als ein Schlafzimmer mit Vorhängen und Textiltapete. Die Reflexionsmuster sind in der Nähe einer Wand wiederum anders als in der Raummitte. Selbst auf freiem Feld würde immer noch der Boden Schallwellen reflektieren. Ohne Reflexionen klingen Raumsimulationen deshalb unnatürlich.

Eine authentische Simulation eines dreidimensionalen Klangraumes entsteht aber erst, wenn alle genannten Parameter zusammenspielen. Würde unser Gehirn zum Beispiel einen Laufzeitunterschied eines eingehenden Signals ausmachen, der nicht im richtigen Verhältnis zur Pegel- und Frequenzdifferenz stünde, wäre unsere Wahrnehmung irritiert und eine eindeutige Lokalisation nicht möglich. Der akustische Raum bräche zusammen.

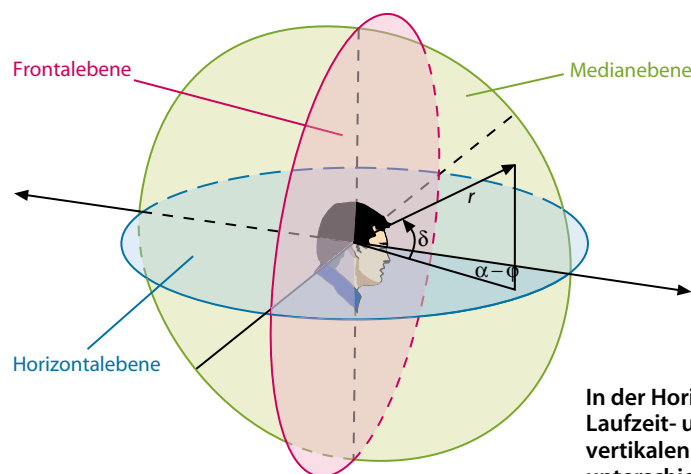
Ein großes Problem für eine allgemeine Berechnung der Laufzeit- und Pegelunterschiede sowie Frequenzmuster ist, dass jeder Mensch eine etwas andere Kopfform hat, auf die sein Gehirn akustisch geeicht ist. Ein allge-

mein gültiges System muss hier notgedrungen pauschalisieren, wodurch räumliche Simulationen bei einigen Zuhörern gut, bei anderen nur schlecht funktionieren. Anfangs versuchte man noch, aus Hunderten von Messungen durch Mittelwertbildung geeignete Parameter zu finden, die für alle Menschen passen. Als dies nicht funktionierte, gingen Akustikforscher dazu über, Messungen an einer realen Person mit einer durchschnittlichen Kopfform vorzunehmen. Bei dieser Durchschnittsperson liegen die Trommelfelle rund 15 cm auseinander. Wenn ein Geräusch genau von links oder rechts auf den Hörer trifft, beträgt der Laufzeitunterschied zwischen beiden Ohren nur eine halbe Millisekunde. Je nach Frequenz variieren die daraus entstehenden Phasenunterschiede, die das Gehirn zur Lokalisation nutzt. Sie sind im Frequenzbereich bis 800 Hz besonders wichtig. Ab etwa 800 Hz wertet das Gehirn zusätzlich frequenzabhängige Pegelunterschiede aus, die jenseits von 1600 Hz sogar die Hauptrolle bei der horizontalen Lokalisation übernehmen.

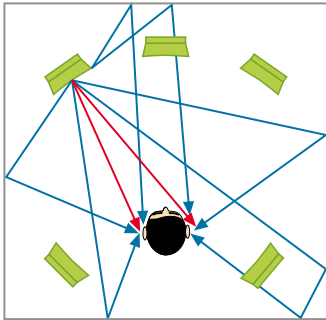
Hardware

Anfänglich wurden binaurale Simulationen für Konstruktionsprogramme entwickelt, mit denen Architekten die Akustik von Räumen vorab überprüfen konnten. Die Raumsimulatoren waren relativ aufwendig und berücksichtigten die Raummaße sowie die Oberflächen der Wände, Böden und Decken. Anhand dieser Daten berechneten sie die zu erwartenden Reflektionen verschiedener im Raum positionierter Audioquellen – etwa eine Sprechanlage in einem Vortragssaal. Allerdings funktionierte dies nicht in Echtzeit, da die genaue Berechnung sämtlicher Schallwellen einen enormen Rechenaufwand erfordert.

Für eine Raumsimulation mit billigen Elektronikgeräten musste man die Algorithmen deshalb vereinfachen. Alle gebräuchlichen Systeme simulieren bis dato nur ein statisches 5.1-Laut-



In der Horizontalebene wertet das Gehirn Laufzeit- und Pegelunterschiede, in der vertikalen Medianebene Frequenzunterschiede aus.



Binaurale Algorithmen in Elektronikgeräten simulieren derzeit fünf Lautsprecher um den Zuhörer herum.

sprechersetz in einem vorgegebenen Raum. Dadurch müssen sie lediglich sechs Klangquellen an genau definierten Positionen berücksichtigen (vorne links, vorne rechts, hinten links, hinten rechts, Mitte und tieffrequente Effekte). Die Räume sind in festen Presets gespeichert und können etwa einen Kino- oder Theatersaal akustisch nachbilden. Wenn also in einer Filmszene eine Schlacht in einem Flugzeughangar tobt, dann wird für den Kopfhörer nicht der Flugzeughangar akustisch modelliert, sondern man nimmt die bereits vorhandene 5.1-Abmischung des Films und simuliert lediglich, wie ein Zuschauer in einem Kinosaal oder Wohnzimmer die Szene hören würde.

Einer der ersten Algorithmen, der Berechnungen dieser Art ermöglichte, wurde 1996 von der Firma Lake Technology (www.lake.com.au) aus Australien entwickelt und bildet heute die Basis für das Dolby-Headphone-Verfahren. Das Besondere an Dolby Headphone ist, dass Lake eine recht gute Verallgemeinerung der HRTFs gefunden hatte, sodass nicht nur Hörer mit durchschnittlichen Kopfmaßen einen räumlichen Eindruck gewinnen. Dolby konnte die Berechnungen schließlich so vereinfachen, dass selbst günstige Prozessoren oder Plug-ins für DVD-Abspielsoftware ein einigermaßen glaubwürdiges Klangbild berechnen.

Da aber wichtige räumliche Informationen auch in den Frequenzbändern enthalten sind, muss eine Simulation auch die Frequenzgänge verschiedener im Handel erhältlicher Kopfhörer berücksichtigen. Dolby Headphone soll sowohl mit billigen Ohrstöpseln, wie sie Fluggesell-

schaften auf Langstreckenflügen einsetzen, als auch mit Hifi-Kopfhörern funktionieren. Der Algorithmus kann deshalb individuelle Frequenzunterschiede nicht berücksichtigen und wurde auf einen Durchschnittswert geeicht.

Deutlich besser arbeiten Komplettsysteme, die nicht nur einen Signalprozessor, sondern auch einen Kopfhörer mitbringen, auf dessen Frequenzgang die Parameter genau abgestimmt wurden – wie etwa von Sennheiser, Sony oder AKG. So bringt der Signalprozessor des AKG Hero 900 einen optischen Dolby-Digital-Eingang mit und berechnet aus den 5.1-Kanälen eine passende binaurale Simulation für den beiliegenden Kopfhörer.

Doch letztlich verfügen diese Geräte nur über eine begrenzte Anzahl von Presets und vorgegebenen Räumen, die für manche Situationen zwar passen, für andere Tonbeispiele jedoch nicht.

Mit teuren Studio-Prozessoren lassen sich binaurale Effekte glaubwürdiger simulieren. Nicht nur, dass deren Raumklangsimitatoren Wandreflexionen genauer berechnen als billige Consumergeräte; der Toningenieur kann darüber hinaus die Raumklangparameter auf jede Filmszene gezielt abstimmen – er schneidert sozusagen einen akustischen Maßanzug. So bietet der Co-Autor dieses Artikels Tom Ammermann solche Mischungen unter dem Namen „headphone-surround“ an. Seine Firma Mo’Vision erstellt für Filmstudios und Musikproduktionen spezielle binaurale Surround-Mischungen (www.headphone-surround.de).

Die daraus resultierende Stereo-Tonspur einer 5.1-Ausgangsmischung kann auf CDs, DVD oder sogar als MP3-Datei abgespeichert und mit handelsüblichen Kopfhörern abgehört werden. Der Hörer benötigt keine speziellen Signalprozessoren. Unter dem Soft-Link finden Sie einige Klangbeispiele. Im Handel findet man Headphone-Surround-Abmischungen beispielsweise auf den DVDs „Cypher“ und „Saw 2“, weitere Musikveröffentlichungen über iTunes und Finetunes sind geplant.

Rotierende Kunstköpfe

Doch selbst mit den besten Algorithmen und Raumklangprozessoren ist die räumliche Illusion nur begrenzt, solange Hörer und Schallquelle starr im virtuellen Raum verharren. Da die frequenzabhängigen Unterschiede sehr gering sind, verwechseln Zuhörer bei statischen Systemen häufig, ob Signale genau von vorne oder hinten kommen. Im Alltag bewegen wir ständig den Kopf – und sei es nur um wenige Millimeter. Dadurch erhalten wir permanent neue positionsabhängige Signale und können die Schallquellen besser lokalisieren.

Um solche Bewegungen zu kompensieren und ein stabiles Klangbild zu gewährleisten, kann der Kopfhörer mit einem Head-Tracker ausgerüstet werden, der die aktuelle Position des Kopfes an einen Signalprozessor übermittelt. Dieser berechnet dann in Echtzeit die Position der Klangquellen in Relation zur Kopfdre-

hung, sodass der Zuhörer den Eindruck hat, der Schall käme stets aus der gleichen Richtung.

Ein solches System wurde 1998 am Münchener Institut für Rundfunktechnik (IRT) in Zusammenarbeit mit der Schweizer Studer AG entwickelt [1]. Die Forscher ersannen ein neues Verfahren, das sie „Binaural Room Scanning“ (BRS) nannten. Dazu wird ein Kunstkopf auf einer drehbaren Scheibe montiert. Die Kunstkopfmikrofone nehmen dann die bis zu 85 ms langen binauralen Impulsantworten (BRIR) von rosa Rauschsequenzen einer 5.1-Lautsprecheranlage auf. Dabei wurde der Kopf in 6-Grad-Schritten um 42° nach links und rechts gedreht, sodass man für jede Lage die Impulsantworten jedes einzelnen Lautsprechers im Raum erhielt. Ein BRS-Prozessor interpolierte anschließend aus den Messwerten die passenden HRTFs und die Impulsantworten für die spätere Faltung mittels Fouriertransformationen [2]. Mit dem BRS-System können aber nur reale Räume vermessen und in einen Signalprozessor eingespeist werden. Über einen Kopfhörer mit Head-Tracker kann dieser Raum dann naturgetreu simuliert werden, wobei das System horizontale Kopfbewegungen auf 0,01 Grad genau erfasst.

Studers BRS-System hörte sich bei Präsentationen so natürlich an, dass viele Zuhörer glaubten, der Schall käme tatsächlich aus den zum Vergleich aufgestellten Lautsprechern im Vorführraum. Lediglich einige Versuchspersonen bemängelten, dass das BRS-System die virtuellen Lautsprecher etwas in die Höhe hob [3]. Studer vermarktete das System allerdings niemals kommerziell – zum Teil auch, weil die Kosten von geschätzt 5000 bis 8000 Euro zu hoch erschienen. Das IRT bietet lediglich eine BRS-Software in Form eines VST-Plug-ins an.

In der Folge gründeten Mitarbeiter von Studer die Schweizer Firma Sonic Emotion (www.sonicemotion.com) und entwickelten zusammen mit Beyerdynamic das Kopfhörer-System Headzone. Das Gerät wurde gegenüber dem BRS-System neu entwickelt und besteht aus einem Effektprozessor mit analogen und digitalen 5.1-Eingängen und einem Kopfhörer (DT880 Pro HT) mit einem Ultraschall-Head-Tracker. Dieser habe gegenüber normalen Beschleunigungssen-



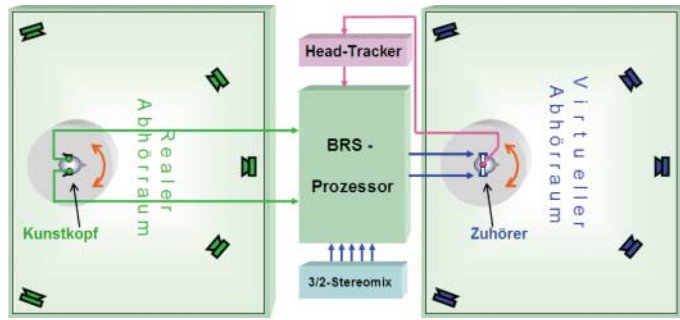
Im Hamburger Studio Mo’Vision mischt Tom Ammermann eine binaurale Headphone-Surround-Tonspur.

soren den Vorteil, dass es zu keiner Drift komme, bei der die Lautsprecher ihre Position verändern, erklärte Headzone-Entwickler Renato Pellegrini. Über einen Empfänger registriert das Gerät die Kopfbewegungen und passt die Simulation eines virtuellen Abhörraumes mit einer 5.1-Lautsprecheranlage in Echtzeit an. Über eine PC- oder Mac-Software nebst mitgelieferter FireWire-Soundkarte lassen sich einzelne Parameter wie Raumgröße, Oberflächenbeschaffenheit, Position der Lautsprecher und die Kopfgröße variieren. Das von Sonic Emotion entwickelte „Binaural Environment Modelling“ nutzt dafür keine vordefinierten BRS-Daten, sondern kann beliebige Räume mit bis zu fünf statischen Klangquellen simulieren. Mit einem Preis von 2150 Euro richtet sich das System, das Ende Oktober auf den Markt kommt, zunächst an professionelle Tonstudios als Abhöranlage, mit dem sie ihre Produktionen in beliebigen virtuellen Abhörräumen (Auto, Wohnzimmer, Kinosaal) testen können. Sonic Emotion plant darüber hinaus unter der Bezeichnung M3S phones günstigere kommerzielle Versionen für MP3-Spieler, Heimkinos sowie Spielkonsolen und PC-Spiele.

OpenAL und EAX

Während Autobauer und Flugzeugkonstrukteure eine möglichst exakte akustische Simulation von Innenräumen benötigen, kommt es im Film und bei Computerspielen nicht so sehr auf Realismus, sondern mehr auf überzeugende Effekte an. Die Prozessoren müssen nicht jede einzelne Schallreflexion genau berechnen, sondern können mit vereinfachten Modellen arbeiten – Hauptsache, es klingt für den Hörer gut. Im Bereich der Computerspiele arbeiten beispielsweise Soundkarten von Creative Labs mit inzwischen recht überzeugenden Hall-Effekten (Reverb), die sich dynamisch an die Spielsituation anpassen. Entwickler können seit einigen Monaten mit der freien Programmierumgebung OpenAL virtuelle Räume für Computerspiele akustisch nachbilden (siehe www.openal.org).

Mit OpenAL kann der Programmierer Geräuschquellen unabhängig von der Soundkarte beliebig im Raum positionieren.



Am Institut für Rundfunktechnik montierte man Kunstköpfe auf rotierenden Scheiben für ein „Binaural Room Scanning“.

Je nach Soundkarte können 16, 32, 64 oder gar 128 Klangquellen um den Hörer herum platziert und bewegt werden. Dabei berücksichtigt OpenAL selbst die Dämpfung durch die Luft oder Doppler-Effekte, wenn sich der Hörer und Schallquelle schnell aufeinander zu oder voneinander weg bewegen. Ähnlich wie bei Microsofts Programmierschnittstelle DirectSound wird die Soundausgabe automatisch berechnet. Egal, ob der Spieler eine 5.1-Anlage, Stereo-Lautsprecher oder einen Kopfhörer angeschlossen hat, OpenAL passt die Ausgabe an und nutzt für Kopfhörer die zuvor genannten HRTFs für die Direktschallberechnung der einzelnen Quellen. Zusätzlich lassen sich einfache Hall- und Echo-Effekte für den diffusen, reflektierten Schall in Software berechnen – allerdings nur nach Creatives EAX-2.0-Standard.

Creatives eigene Soundkarten der Audigy- und X-Fi-Reihe beherrschen aufwendigere Raumklangeffekte (EAX 3.0 bis 5.0), die über die Effect Extensions angesprochen werden [4]. Die Extensions arbeiten wie separate Effektprozessoren, durch die das Signal der einzelnen Quellen geschickt wird. Man kann beispiels-

weise eine Quelle in einem Nachbarraum positionieren, der andere Reflexionseigenschaften hat als der virtuelle Raum, in dem sich der Spieler befindet. Ebenso können Filter Effekte simulieren, bei denen der Direktschall blockiert wird, weil sich ein anderes Objekt vor der Geräuschquelle befindet. Die erweiterten EAX-Funktionen berücksichtigen dabei auch die Richtung, aus der der reflektierte Schall kommen soll.

Bei beweglichen Objekten berechnet EAX die Position für die Filter-Effekte des direkten Schalls 30 Mal pro Sekunde neu. Schiebt sich ein anderes Objekt zwischen Klangquelle und Zuhörer, so dämpft ein Filter den Direktschall. Im Extremfall ist nur noch der diffuse Schall der Wandreflexionen zu hören. Die Schallreflexionen an den Wänden können allerdings nicht wie bei einem BRS-System in Echtzeit berechnet werden. EAX macht keinerlei Unterschiede, ob sich die Quelle in der Mitte des Raums oder am Rand befindet. Der Programmierer beeinflusst stattdessen einzelne allgemeine Reverb-Parameter wie Diffusion, Nachhallzeit und Dämpfung und verändert sie in

Abhängigkeit von der Spielsituation.

Die Resultate sind mit Creatives jüngster Soundkarten-Generation X-Fi schon sehr beachtlich. Die einzelnen Bauteile für ein akustisches Holodeck wären also vorhanden. Soundkarten können Klangquellen frei im Raum bewegen und BRS-Systeme berechnen Reflexionen und Kopfbewegungen in Echtzeit. Was fehlt, ist eine Verbindung zwischen beiden Systemen. Immerhin sind die Preise für Bewegungssensoren in den vergangenen Jahren stark gefallen, sodass sie inzwischen schon von Nintendo und Sony für Spielkonsolen eingesetzt werden. Jetzt muss nur noch die Rechenleistung der Soundkarten für die Reflexionsberechnungen wachsen. Dann wäre der Weg zu einem akustischen Holodeck frei, bei dem der Zuhörer akustisch tatsächlich nicht mehr unterscheiden kann, ob er mit einem Motorrad durch einen Canyon rast oder nur zu Hause im Wohnzimmer sitzt. (hag)

Literatur

- [1] Gerhard Spikofski, Markus Fruhmänn, Optimisation of Binaural Room Scanning (BRS), www.irt.de/IRT/FuE/as/pdf/Spi19thAES%20Conf.pdf
- [2] Roman Beilharz, Selbstgefaltet, High-End-Raumsimulation durch Impulsfaltung, c't 8/04, S. 186
- [3] Ingmar Brüssow, Untersuchungen zum praktischen Einsatz des BRS-Verfahrens für die Beurteilung und Kontrolle der Qualität von Beschallungen, Diplomarbeit am Institut für Rundfunktechnik, München 2004
- [4] Open AL Effect Extensions Guide 1.1, Juli 2006, <http://developer.creative.com>

Das Headzone-System von Beyerdynamic registriert Kopfbewegungen über einen Ultraschall-Head-Tracker.



Bilder: IRT, München