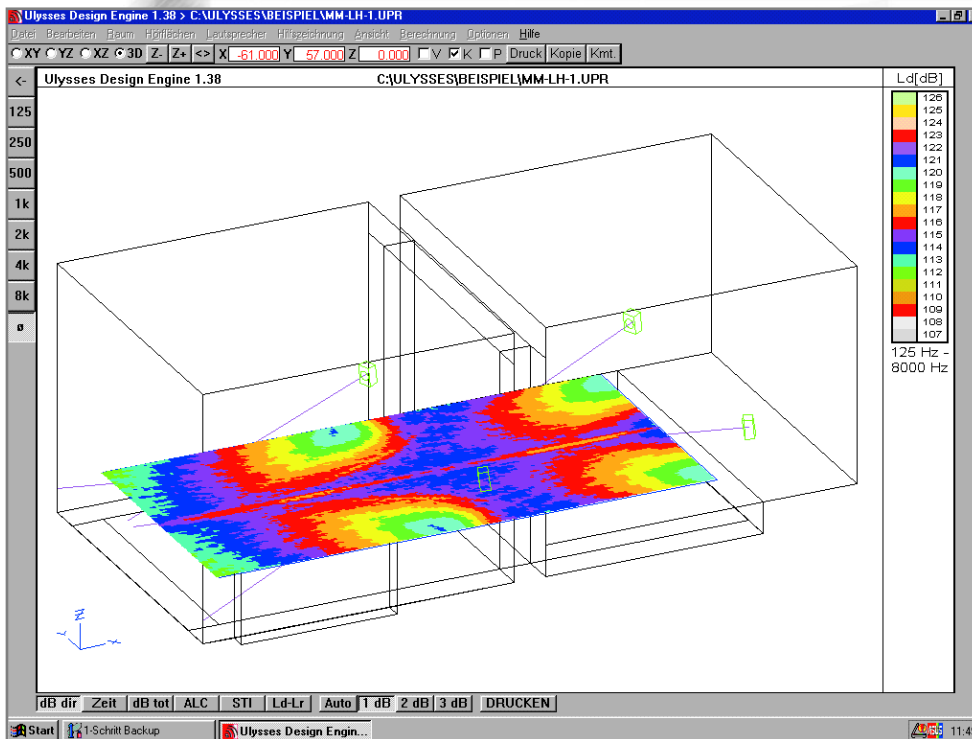




Sonderdruck aus Professional System:

ULYSSES IM TEST





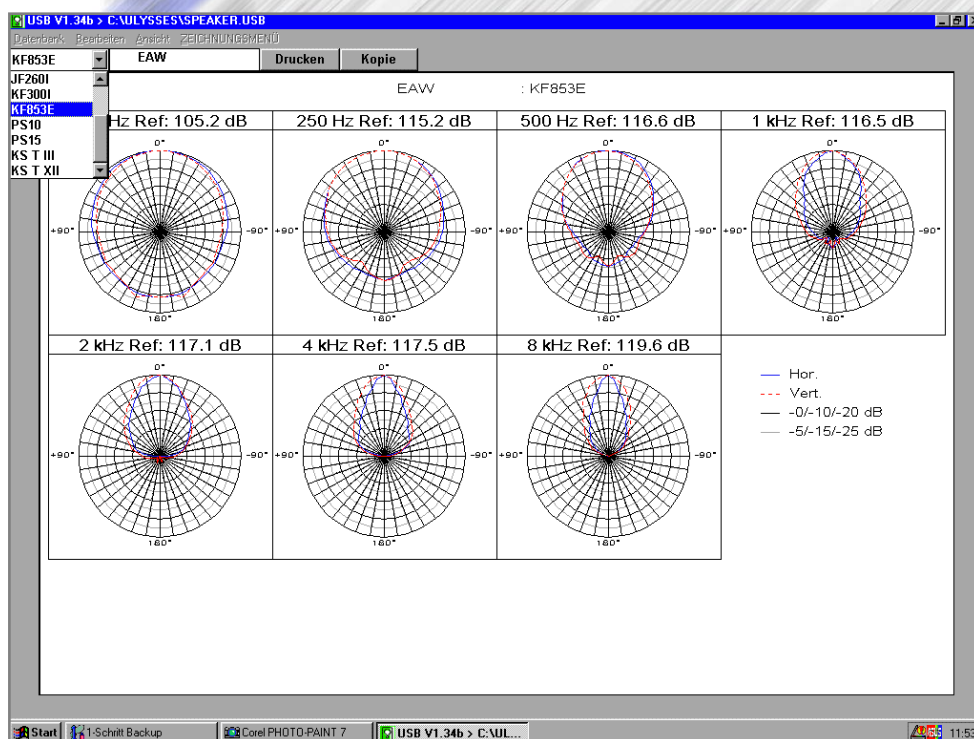
RAUMAKUSTISCHE SIMULATION

Ulysses

Vom Ingenieurbüro für Beschallungstechnik (IFB-Soft) in Bischofsheim gibt es das elektro- und raumakustische Simulationsprogramm Ulysses. Die Anwenderzielgruppe wird in den Planungs- und Projektierungsbüros für Beschallungsanlagen aller Art gesehen, denen mit Ulysses ein schnelles Hilfsmittel zur Vorhersage der Ergebnisse ihrer Entwürfe an die Hand gegeben werden soll.

- In nahezu allen öffentlichen Räumen und Gebäuden werden heute Lautsprecheranlagen unterschiedlichster Art und Größe zur Übertragung von Musik oder Sprache eingesetzt. Typische Einsatzbereiche sind hier Versammlungsräume, Sitzungssäle, Sportarenen, Bahnhofshallen oder Kirchen. Meist steht die Sprachübertragung im Vordergrund, womit auch schon klare Anforderungen an die Übertragungsqualität, d.h. an die Sprachverständlichkeit gestellt sind. Auch durch die Gesetzgebung wurden in den letzten Jahren einige Richtlinien für die Leistungsfähigkeit solcher Anlagen vorgegeben, mit denen unter anderem sichergestellt werden soll, daß in Krisensituationen noch Durchsagen an das Publikum gemacht werden können. Nicht weniger interessant und natürlich auch problematisch können die Anforderungen bei der Übertragung von Musik sein. Soweit es sich um eine Hintergrundbe-

schallung (z. B. in einem Kaufhaus) handelt, wird der primäre Aspekt eine unauffällige Installation mit möglichst gleichmäßiger Beschallung einer großen Fläche sein. Nicht nur Musik, sondern auch angenehm klingende Klangkompositionen sollen über solche Lautsprecheranlagen wiedergegeben werden. Ein gutes Beispiel kommt hier aus dem Bereich des Akustik-Designs, wo gezielt versucht wird, durch Einspielung bestimmter Klänge ein passendes akustisches Umfeld zu erzeugen. In einem architektonisch sehr offen gestalteten Kundenbereich einer Bank mag dem ein oder anderen Kunden, wenn es um Kreditverhandlung geht, das unguete Gefühl beschleichen, vom Nachbartisch könnte jemand mithören. Unauffällig eingespielte Klang- und Geräuschkulissen können in solchen Fällen mehr oder weniger unbewußt den Eindruck der akustischen Abgeschlossenheit erzeugen und das Wohl-



finden der Kunden wieder herstellen. Dieses vielleicht ein wenig exotisch anmutende Beispiel ist durchaus nicht so weltfremd, wie es zunächst erscheint. Immer häufiger wird das akustische Design neuer Räume, Gebäude und auch öffentlicher Plätze nicht dem Zufall überlassen, sondern aktiv beeinflusst.

Nach diesem kurzen Exkurs über Einsatzmöglichkeiten von Lautsprecheranlagen wird der Wunsch der hiermit beschäftigten Künstler und Techniker klar, ein Werkzeug an der Hand zu haben, mit dem sich die Ergebnisse einer neuen Installation in gewissen Grenzen vorhersagen lassen. Auch bei mobilen Aufbauten für Konzerte oder Filmvorführungen wird immer häufiger in der Planungsphase von akustischen CAD-Programmen Gebrauch gemacht.

In verschiedenen Hochschuleinrichtungen und Entwicklungsabteilungen von Firmen wird seit vielen Jahren bereits eifrig an der Konzeptionierung und Programmierung solcher akustischen CAD-Software gearbeitet. Dank immer leistungsfähigerer PCs ist der Einsatz dieser rechenintensiven Programme schon vor etlichen Jahren auch auf bezahlbarer PC-Hardware möglich geworden, womit einer weiten Verbreitung der Weg geebnet war. In ihrer Zielsetzung sind diese Programme in zwei Gruppen zu unterteilen, die ihre Ergebnisse nur optisch präsentieren oder aber auch eine sogenannte Auralisation des simulierten Raumes erlauben. Für die Auralisation wird neben der Schallfeldverteilung auch die

Impulsantwort eines Übertragungsweges zwischen einer Sender- und Empfängerposition berechnet. Damit wird ein tatsächliches Hineinhören in einen Raum, der ja evtl. noch gar nicht existiert, möglich gemacht. Über DSP-Systeme kann dann ein beliebiges und natürlich möglichst nachhallfrei aufgenommenes Musikmaterial in Echtzeit abgehört werden. Der Anspruch an die berechnete Impulsantwort ist dabei recht hoch, was mit längeren Rechenzeiten einhergeht und natürlich auch entsprechend genaue Daten über den Raum und die akustischen Beschaffenheiten der dort verwendeten Materialien verlangt.

Ulysses stellt hier eine Variante der Auralisation ohne Echtzeitbearbeitung bereit, die dafür aber auf dem PC in kurzer Zeit berechnet und über ein Audiointerface abgehört werden kann. Näheres hierzu später.

Der nächste Schritt zur virtuellen Realität, wo dann auch bewegte Sender und Empfänger oder auch Kopfbewegungen des Hörers in Echtzeit berücksichtigt werden können, gewinnt im Zusammenhang mit neuen Medien und Kommunikationsmöglichkeiten zunehmend an Bedeutung. Zur Zeit benötigen diese Verfahren jedoch noch leistungsstarke externe Hardware neben dem eigentlichen PC, so daß sie sich noch in einem Stadium befinden, wo die Anwendung auf einige Forschungslabors beschränkt ist. Die rasante Entwicklung auf dem Computermarkt dürfte aber auch dieses alsbald dem PC-User zugänglich machen.

RAUMSIMULATIONS-THEORIE

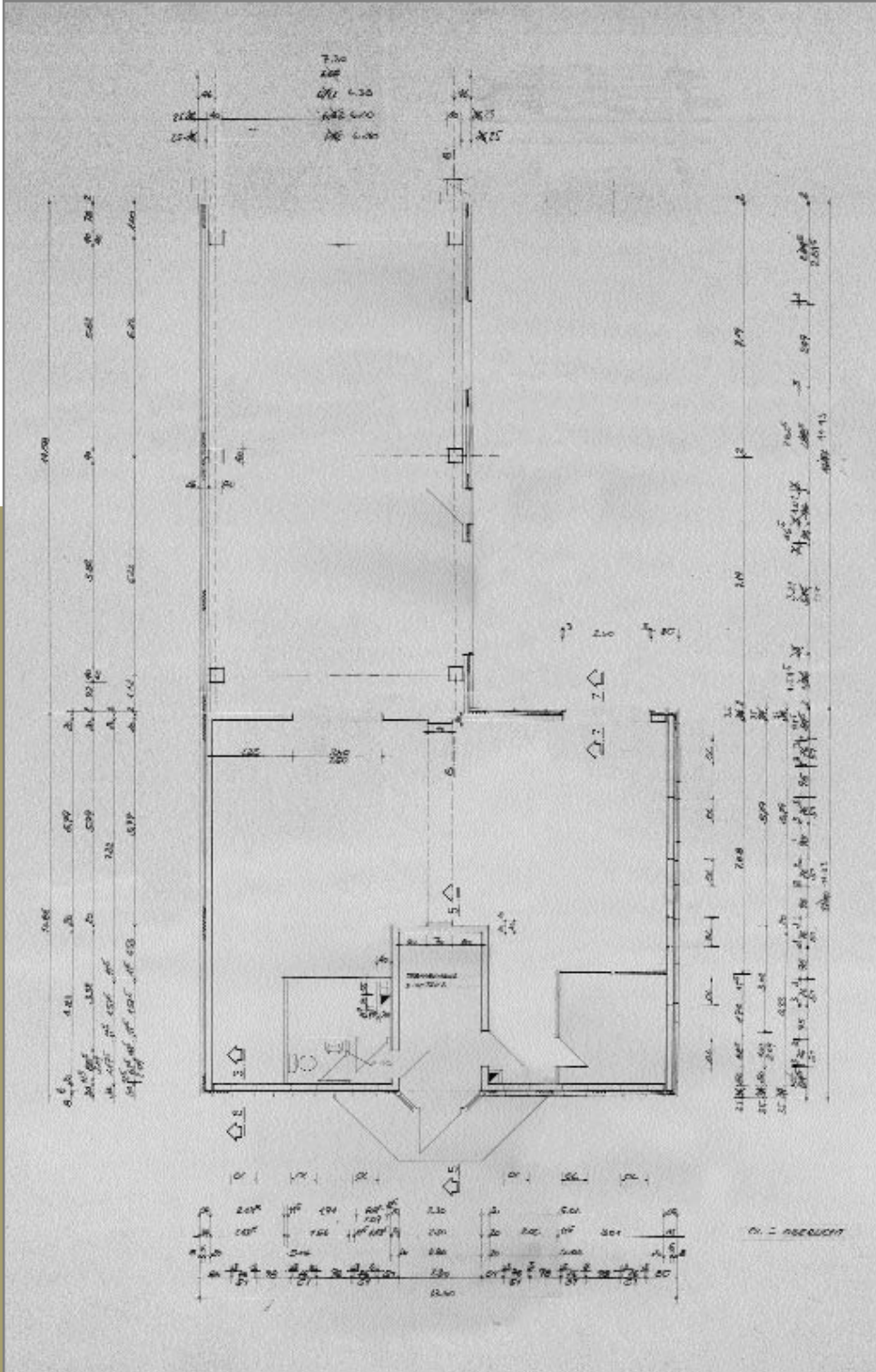
Die einzig wirklich exakte Beschreibung der Schallausbreitung ist über die wellentheoretische Betrachtung unter Beachtung aller Randbedingungen möglich. Randbedingungen sind dabei die auf den Raumbegrenzungen erzwungenen Zustände, z. B. ein Schalldruckmaximum auf einer schallharten Wand. Eine analytische oder auch nur numerische Lösung der Wellen-

lengleichung ist aber nur für sehr einfache Fälle, z. B. einen Quaderraum, überhaupt praktikabel. Anwendungen in der Forschung finden sich zur Zeit mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Untersuchung von Beugungseffekten bei tiefen Frequenzen.

Für diejenigen Frequenzbereiche, bei denen die Raumabmessungen als groß gegenüber der Wellenlänge betrachtet werden können, bieten die einfacheren Modellvorstellungen der geometrischen Akustik die effektivste Möglichkeit einer Berechnung des Schallfeldes. Die Schallausbreitung wird hier auf Spiegelquellen bzw. Strahlengänge beschränkt, deren Position bzw. Verlauf nach geometrischen Gesetzen verfolgt werden kann.

Bei der Strahlenverfolgung kann eine Schallquelle anschaulich als Sender von Schallteilchen betrachtet werden, deren richtungsabhängige Dichte das Richtverhalten der Quelle beschreibt. Die Schallteilchen gelangen dann auf direktem Wege – das wäre der Direktschall – oder über eine oder mehrere Wandreflexionen zum Empfänger. Abhängig von der Beschaffenheit des Wandmaterials und der Frequenz werden dann die Schallteilchen

Eine einfache Bauzeichnung (Beispiel) ist oft erste Grundlage zur Ermittlung der Raumdaten.



**BEISPIELSIMULATION:
SCHRITT FÜR SCHRITT**

Anhand eines einfachen Beispiels soll einmal die Arbeitsweise mit Ulysses kurz veranschaulicht werden. Zu Beginn einer jeder Berechnung steht die von Fall zu Fall recht arbeitsintensive Eingabe der Raumdaten, soweit keine Dateien in einem importfähigen Format vorliegen. Typische Bauzeichnungen mit sehr vielen Details, die akustisch nicht relevant sind, helfen hier leider auch nicht weiter, da meist der Aufwand zur Aufarbeitung einer solchen Datei die Neueingabe sogar noch übertrifft. Der entscheidende Faktor aber dürfte die Erfahrung im Umgang mit dem Ulysses-Editor und bei der Umsetzung von typischen Architektenzeichnungen sein. Hat man nach kurzer Zeit erst einmal die prinzipielle Vorgehensweise des grafischen 3D-Editors in der Design Engine überblickt, so kommt man sehr schnell zu einer routinierten Arbeitsweise, mit der die Raumeingabe dann zügig von der Hand geht. Vorab sollte man sich allerdings schon Gedanken dazu machen, wie der Aufbau des Raumes am Rechner möglichst einfach von-statten geht und wie man durch Kopier- und Spiegelfunktionen die Arbeit beschleunigen kann. Neben der grafischen Eingabe können alle Positionierungen im Ulysses auch nume-

bei der Reflexion mehr oder weniger stark absorbiert. Die Reflexion kann rein geometrischen Charakter haben oder auch diffus streuend sein. Soll nun für einen gegebenen räumlichen Bereich die Schallfeldverteilung berechnet werden, so ist dieses gleich der Bestrahlungsdichte durch die Schallteilchen. Wandabsorption und Luftdämpfung können in diesem Modell durch eine frequenzabhängige Verminderung der Schallteilchenenergie bedacht werden.

ULYSSES' SIMULATIONS-ENGINE

Ulysses verwendet die beiden Verfahren der geometrischen Akustik mit Spiegelquellen bzw. Strahlenverfolgung in Kombination. Für das Spiegelquellenverfahren ist jede Quelle im ersten Durchlauf an jeder von ihrer Position aus sichtbaren Begrenzungsfläche zu spiegeln, um alle Reflexionen erster Ordnung zu erfassen. Im zweiten Durchlauf für die Reflexionen zweiter Ordnung sind nun all dieses Spiegelquellen ihrerseits wieder an allen für sie sichtbaren Begrenzungsflächen zu spiegeln, womit die Anzahl der Quellen exponentiell ansteigt. Für einen Beispielraum mit 36 Wandflächen (Anzahl W) und vier Quellen (Anzahl Q) sind somit für den Direktschall vier Quellen, für die Reflexionen 1. Ordnung 144 Quellen, für die Reflexionen 2. Ordnung schon 5184 Quellen zu berücksichtigen, womit sich leicht erkennen läßt, daß der Rechenaufwand sehr schnell unermeßliche Formen annehmen kann. Für die n -te Ordnung läßt sich die Anzahl der Rechenoperationen damit zu

$$\text{Summe} = Q \times \sum_{m=0}^{m=n} W^m = Q \times (1 + W + W^2 + W^3 + \dots)$$

berechnen

Das Verfahren der Strahlenverfolgung verhält sich hier weniger kritisch, wo der Rechenaufwand nur linear mit der Ordnung wächst.

Für den Fall, daß von der Quelle die Schallstrahlen im 1-Grad-Raster ausgesandt werden, starten ca. 65.000 Strahlen (Anzahl S) pro Quelle, die über eine bestimmte Anzahl Reflexionen bis zum gewünschten Ordnungsgrad verfolgt werden.

Für die n -te Ordnung ist jetzt die Anzahl der Rechenoperationen mit

$$\text{Summe} = Q \times W \times S \times n$$

zu berechnen. Bezüglich des Rechenaufwandes bietet die Strahlenverfolgung so schon bei recht geringen Ordnungen deutliche Vorteile bezüglich des Rechenaufwandes, der allerdings mit dem Nachteil einer geringeren Genauigkeit erkauft werden muß, da die Schallstrahlen nicht unendlich dicht sind und unter Umständen daher auch nicht alle Begrenzungsflächen treffen. Ulysses macht daher einen guten Kompromiß und berechnet die ersten und besonders wichtigen Reflexionen nach der 100% genauen Spiegelquellenmethode und die späteren Reflexionen mit der Strahlenverfolgung, beginnend mit der Ordnung, bei der die Strahlenverfolgung eine geringere Rechenleistung erfordert als die Spiegelquellen. In einer Formel ausgedrückt heißt das, ab einer Ordnung n , für die gilt:

$$Q \times W \times S \times n \leq Q \times \sum_{m=0}^{m=n} W^m$$

wird die Strahlenverfolgung verwendet und für alle geringeren Ordnungen die Spiegelquellenmethode.

EINSTIEG INS PROGRAMM

Die Ulysses-Software besteht aus vier Windows-basierten Einzelprogrammen und bietet die üblichen Funktionen, die man hier auch von anderen Programmen kennt. Angenehm fällt allerdings die hohe Arbeitsgeschwindigkeit auf, insbesondere der Grafikaufbau und der auffällig geringe Speicherplatzbedarf. Sowohl das eigentliche Ulysses-Programm wie auch die zugehörigen Dateien sind so kompakt, daß sie problemlos auf eine Diskette passen. Ebenso angenehm und eigentlich untypisch geht die Installation vonstatten, wo lediglich ein Zip-File im gewünschten Verzeichnis zu entpacken ist und damit schon alles erledigt wäre. Das IFB bietet eine Demo-Ver-

sion kostenlos an, die alle Funktionen beinhaltet, aber nicht speichern kann. Beim Kauf des Programmes wird die Demo-Version durch einen rechner-spezifischen Freischaltcode in eine Vollversion verwandelt, und der Arbeit steht nichts mehr im Wege. Wie bereits zu Beginn erwähnt, handelt es sich um vier einzelne Programme:

- Absorber Base
- Speaker Builder
- Viewer
- Design Engine

Das eigentliche Kernprogramm mit allen Rechenfunktionen ist die Design Engine, in der die Räume editiert, die Lautsprecher platziert und alle Berechnungen ausgeführt und deren Resultate dargestellt werden. Als Ausgangsdaten benötigt die Design Engine eine Lautsprecher- und eine Absorber-Datenbank, die mit den entsprechenden Hilfs-

programmen Speaker Builder und Absorber Base erstellt und bearbeitet werden können. Für die eigentliche Arbeit mit Ulysses wird daher nur die Design Engine benötigt. Speaker Builder und Absorber Base dienen dagegen dem normalen Anwender eher zur Darstellung einer Übersicht, was alles in den Datenbanken enthalten ist. Hersteller von Lautsprechern können den Speaker Builder in einer speziellen Version beziehen, mit dem geschützte Datenbanken erstellt werden können, die bei einer späteren Anwendung nicht mehr zu verändern sind. Auf der anderen Seite gibt es den Ulysses Viewer, der alle Darstellungen sämtlicher Berechnung erlaubt. Der Viewer ist kostenlos und kann beliebig weitergegeben werden, so daß ein mit Ulysses erstelltes Konzept zusammen mit dem Viewer an Kunden, Architekten oder ausführende Firmen weitergereicht werden kann, die dann alle Resultate, Raumzeichnungen, Lautsprecher-Verteilungen usw. beliebig anschauen, kopieren und ausdrucken können.

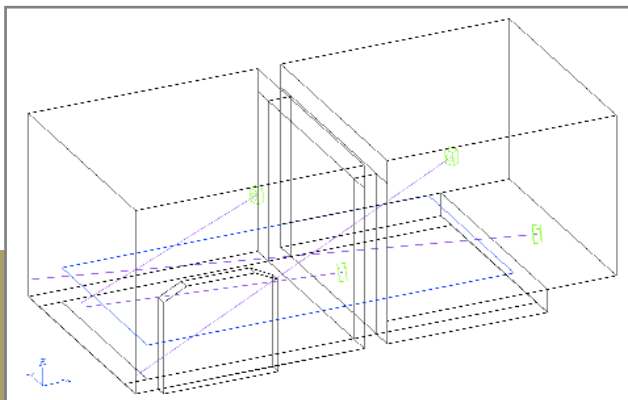
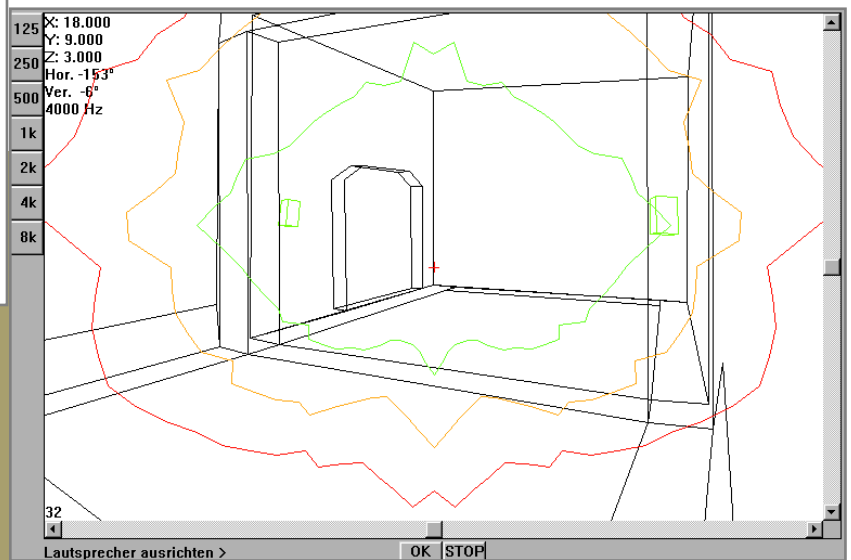


Abb. 1a: Drahtgittermodell des Raumes mit Lautsprechern

risch absolut oder relativ vorgenommen werden, was sich als sehr praktisch erwiesen hat, insbesondere da alle Methoden beliebig gemischt miteinander verwendet werden können. Abb. 1a zeigt den Beispielraum mit nur 36 Wandflächen, der mit vier Lautsprechern bestückt wurde. Die Ausrichtung der Lautsprecher kann über die Eingabe eines Zielpunktes für die Mittelachse oder über die nette Variante eines Blickes durch den Lautsprecher erfolgen. Im zweiten Fall befindet man sich perspektivisch in der Lautsprecherbox und blickt in Richtung der Mittelachse aus der Box in den Raum hinein. Als farbliche Linien werden dabei die Isobaren des Richtverhaltens für ein gewähltes Frequenzband eingeblendet, so daß man mit dem Lautsprecher auf einen bestimmten Raumbereich zielen kann (siehe Abb. 1b).

Noch vor der Lautsprechereingabe erfolgt in der regulären Arbeitsabfolge die Festlegung der Wandmaterialien. Ist der Raum erst einmal eingegeben, so muß jeder Fläche eine akustische Beschaffenheit zugewiesen werden, indem die Fläche zunächst mit einem einfachen Mausklick aktiviert und dann ein vorher ausgewähltes Material aus der Absorberdatenbank zugewiesen wird. Bei sehr vielen Flächen verliert man leider schnell die Übersicht, welche Fläche schon definiert

Abb. 1b: Blick in den Raum aus dem Lautsprecher mit Isobarenlinien



wurde und mit welchem Material. Hilfreich wäre die Möglichkeit, aus dem Innern des Raumes sich in einer 3D-Darstellung, vergleichbar dem Blick aus dem Lautsprecher, umschauen zu können, wobei verschiedene Wandmaterialien unterschiedlich farblich dargestellt würden. Als kleine Hilfe bietet Ulysses hier die Liste der Begrenzungsflächen an, wo die gerade aktivierte Fläche dann in der 3D-Darstellung des Raumes rot hervorgehoben wird.

ERGEBNISSE

Sobald der Raum eingegeben ist und alle Begrenzungsflächen definiert sind, kann unabhängig von den Lautsprechern zunächst einmal die Nachhallzeit des Raumes für die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz berechnet werden. Für den Beispielraum wurden zwei Varianten verfolgt: In der ersten Ausführung werden Wand- und Deckenflächen als un-

ABSORBER BASE

Baumaterialien für Fußböden, Decken und Wänden sowie andere Gegenstände zur Raumausstattung, wozu Vorhänge, Leinwände, Bestuhlung oder auch Publikum gehören, sind unter akustischen Gesichtspunkten über ihren frequenzabhängigen Absorptionsgrad definiert. Es gibt es dabei zwei wichtige Ursachen für die Schallabsorption: Reibungsverluste durch Luftbewegung in den Poren des Materials bei den porösen Absorbieren und das Mitschwingen von Platten oder Wänden bei den Resonanzabsorbieren. Poröse Absorber zeigen eine mit steigenden Frequenzen zunehmende Wirkung, wogegen Resonanzabsorber nur im Bereich der Resonanzfrequenz eine nennenswerte Wirkung aufweisen. In gut besetzten Sälen muß zudem das Publikum als starker Absorber beachtet werden, dessen Absorptionsgrad bei sehr dichter Besetzung bei tiefen Frequenzen von 125 Hz von ca. 50% auf nahezu 100% oberhalb von 500 Hz ansteigen kann. Bei höheren Frequenzen und größeren Laufstrecken macht sich außerdem die Ausbreitungsdämpfung in Luft bemerkbar, die eine sehr starke Abhängigkeit von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufweist.

Zusammen mit dem Ulysses-Programmpaket wird eine Absorber-Datenbank geliefert, die bereits eine Reihe üblicher Wandmaterialien enthält, deren Absorptionsgrade in Oktavschritten von 125 bis 8000 Hz angegeben sind. Insgesamt ist die Vielfalt der Baumaterialien aber so groß und unterschiedlich, daß niemals alle erfaßt werden können. Für den Raumakustiker gibt es daher ausführliche Katalogwerke, aus denen sich die Werte bei Bedarf ablesen und in die Datenbank übertragen lassen. Spezielle Werkstoffe und Dämmmaterialien, wie sie von Firmen wie G+H geliefert werden, sind ohnehin bereits in ihren Datenblättern mit den entsprechenden Werten beschrieben. Ein wenig kritisch wird es, wenn es um z. B. durch Farbauftrag veränderte Baustoffe oder um bereits bestehende unbekannte Wand-, Boden- oder Deckenbeläge geht. Hier bleibt dann nur die Möglichkeit, eine Probe des Materials auf einem Prüfstand zu vermessen oder mit einer sogenannten In-Situ-Messung das Material vor Ort zu prüfen.

SPEAKER BUILDER

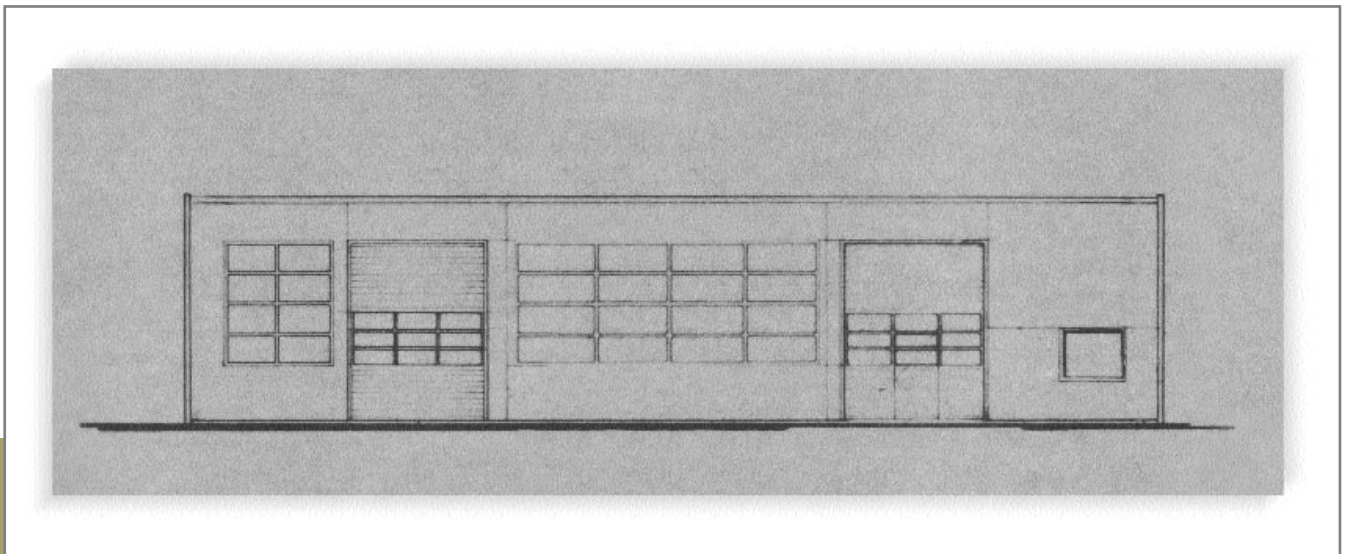
Die zweite wichtige Datenbank im Ulysses enthält die Lautsprecherdaten. Bisher erfolgen bei Ulysses alle Angaben zum Lautsprecher oktavgemittelt von 125 Hz bis 8 kHz, als da sind: Sensitivity in dB bei 1 W/1 m, Belastbarkeit in W, Nennimpedanz in Ohm, der Bündelungsfaktor, das Bündelungsmaß in dB, der Wirkungsgrad

in % und das räumliche Abstrahlverhalten. Der Bündelungsfaktor und der Wirkungsgrad werden nach der Messung vom Speaker Builder automatisch errechnet. Das räumliche Raster entsteht durch eine Kugelfläche um den Lautsprecher, die von einem äquidistanten Rasternetz in 5-Grad-Schritten unterteilt ist. Abgespeichert werden für die betreffenden Positionen immer nur die Pegelwerte, bezogen auf 1 W/1 m. Der frequenzabhängige Phasenverlauf des Lautsprechers wird zur Zeit noch nicht mit abgespeichert. Für zukünftige Programmversion ist dieses allerdings schon geplant. Ebenso sind auch noch höhere räumliche Auflösungen und terzbreite Frequenzbänder in der Diskussion.

In der Praxis bedeutet aber selbst das gegenwärtige Format schon die Messung von 2.738 Einzelfrequenzgängen, die dann gleitend oktavgemittelt und abgespeichert werden müssen. Ist der Lautsprecher symmetrisch zu seiner vertikalen Mittelachse aufgebaut oder sogar zur horizontalen und ver-

tikalen Mittelachse symmetrisch (wie bei einem Koaxsystem), so kann die Messung auf eine Halb- bzw. Viertelkugel beschränkt werden. Die restlichen Werte ergeben sich dann durch Spiegelung an den Symmetrie-Ebenen. Recht aufwendig gestaltet sich auch der mechanische Aufbau der Meßeinrichtung, um den Lautsprecher um zwei Drehachsen zu schwenken. Einige Lautsprecherhersteller haben sich eigens für diese Messungen bereits große mechanische Aufbauten konstruiert, die voll- oder halbautomatisch die Meßreihen in mehrstündigen Prozeduren aufnehmen. Der Speaker Builder erlaubt zwar dem Ulysses-Anwender nicht, selber Dateien zu

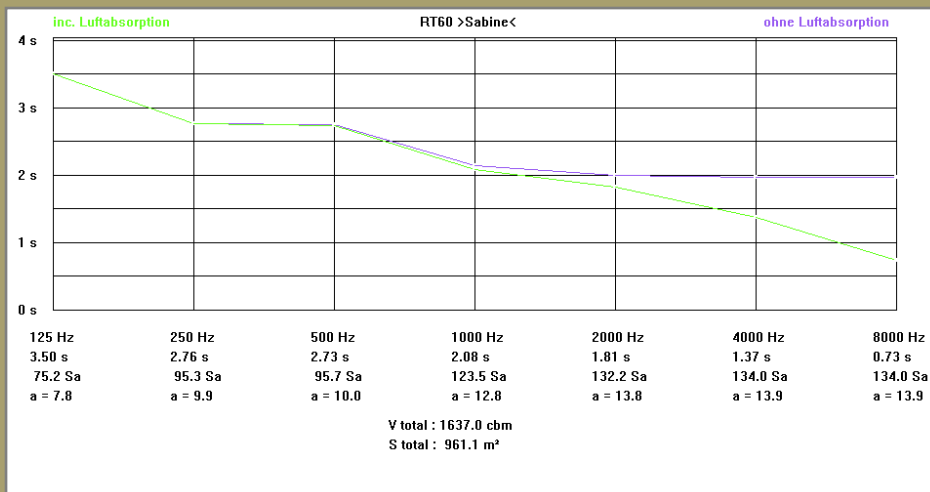
erstellen oder bestehende abzuändern, was ja auch durchaus sinnvoll ist, wenn sich der Hersteller für die Richtigkeit der Messung verbürgt. Aber es besteht die Möglichkeit, sich über die mitgelieferte Datenbank einen schnellen Überblick über die Abstrahleigenschaften der verschiedensten Systeme zu machen. Die Darstellung im Speaker Builder kann über klassische Polardiagramme (siehe Abb. 11) oder über die sehr schönen dreidimensionalen Balloons (siehe Abb. 12) erfolgen. Die Lautsprecherdaten kann der Anwender aus den mitgelieferten Dateien oder von den Lautsprecherherstellern teilweise auch direkt beziehen. Neue Datensätze können kostenlos



verkleidete Betonflächen belassen und lediglich der Boden mit Nadelfilz belegt und die Publikumsfläche mit leicht gepolstertem Gestühl mit Personen auf den Stühlen besetzt. Die Kurve für die frequenzabhängige Nachhallzeit in Abb. 2 zeigt hier deutlich die sehr langen Nachhallzeiten bei tiefen

Frequenzen, wo es kaum absorbierende Flächen gibt. Für die 125-Hz-Oktave liegt der Wert schon bei beachtlichen 3,5 s, obwohl von einer 100%-Besetzung der Publikumsflächen ausgegangen wurde. Die zweite Variante sieht gut absorbierende Wand- und Deckenverkleidungen vor, die teilweise durch mit Dämmmaterial hinterlegte Lochrasterplatten realisiert werden. Das Ergebnis in Abb. 3 sieht nun deutlich anders aus mit wesentlich kürzeren Nachhallzeiten. Grundsätzlich sollte man hier einen von den tiefen zu den hohen Frequenzen kontinuierlich abfallenden Verlauf anstreben, so daß hier durch die großflächig verteilten Lochplattenabsorber schon ein wenig zu viel des Guten getan wurde. An diesem krassen Beispiel wird sehr schön die Wirkung unterschiedlicher Wandverkleidungen verdeutlicht.

Abb. 2: Nachhallzeiten mit unverkleideten Wänden (Var1)



Bei der Nachhallzeit handelt es sich um eine ausschließlich raumbezogene Größe, die nicht von den Lautsprechern abhängt. Sobald diese nun plaziert sind und mit ins Spiel gebracht werden, können verschiedene Schallfeldverteilungen berechnet werden. Die Berechnung erfolgt in unserem

von der IFB-Homepage <http://members.aol.com/ifbcon/home.htm> geladen werden.

CLUSTER-BERECHNUNG

Da ein Lautsprecher häufig nicht alleine, sondern zu mehreren im sogenannten Cluster eingesetzt wird, bietet Ulysses auch die Möglichkeit der Cluster-Berechnung. Das Ergebnis kann anschließend in ähnlicher Form wie eine Lautsprecherdatei abgespeichert und per Polardiagramm oder auch im Balloon (siehe Abb. 13) dargestellt werden. Rechnerisch läuft dieser Vorgang so ab, daß das Programm zunächst einen neuen geometrischen Mittelpunkt für das Cluster ermittelt und dann die komplexe Summe des Schall-

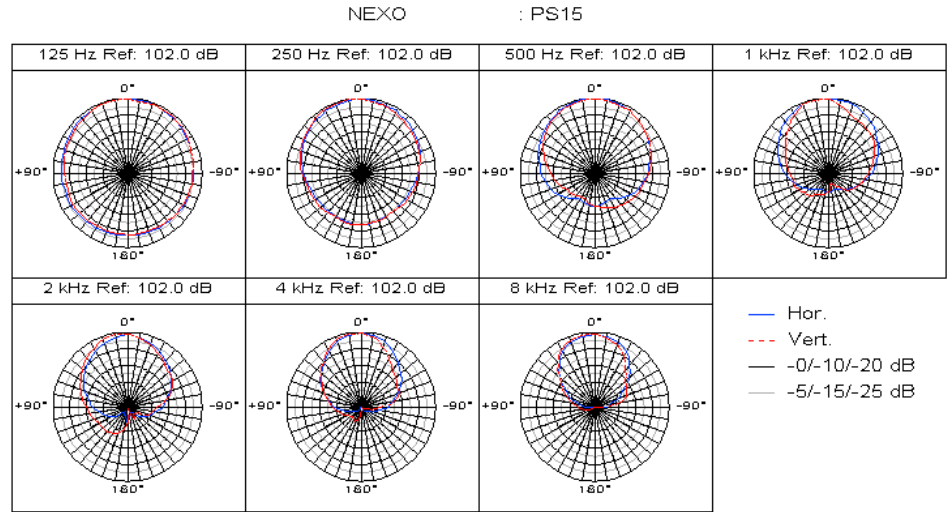


Abb. 11: Horizontale und vertikale Polardiagramme

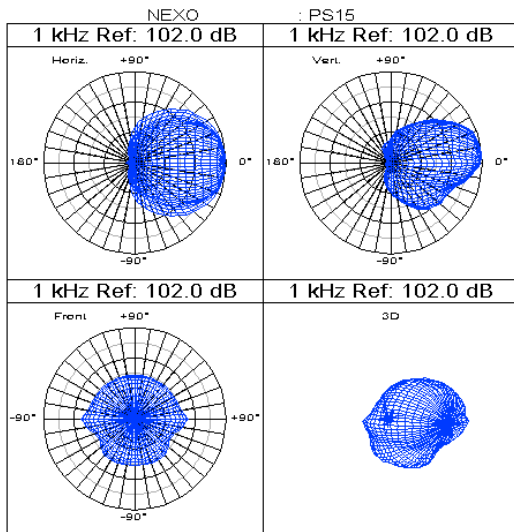


Abb. 12: Directivity in der 3D-Balloon-Darstellung

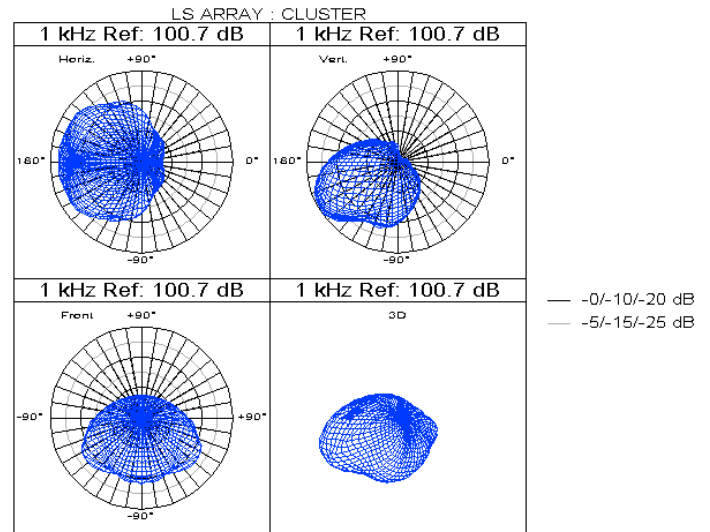


Abb. 13: Balloon für ein neu berechnetes Cluster aus zwei Lautsprechern

druckpegels im 5-Grad-Raster für die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz neu berechnet; berücksichtigt werden dabei also nicht nur einfach die Beträge, sondern auch die Phasenlage. Jede Oktavband-Summe wird dabei als Mittelwert aus den drei zugehörigen Terzen berechnet. Das Kugelrasternetz wird für die Berechnung mit einem Radius von 100 m angenommen. Durch das geschickte Verfahren, den Pegel zunächst für jedes Oktavband über die drei zugehörigen Terzmittenfrequenzen komplex zu berechnen und diese dann energetisch zu mitteln, wird ein guter Kompromiß zwischen einer rein energetischen Betrachtung und einer komplex frequenzselektiven Berechnung gemacht, der sehr gut mit dem letztendlichen Höreindruck korreliert.

Bei der Projektierung des neuen Plenarsaales im Reichstagsgebäude in Berlin hat der Autor für die Planung der Beschallungsanlage ebenfalls Ulysses eingesetzt, wo die beiden aus

je fünf Lautsprechersystemen bestehenden Halbampeln als Cluster berechnet wurden. Um allen möglichen Eventualitäten vorzubeugen, wurden von ihm neben der Cluster-Berechnung auch noch sehr aufwendige Messungen am bereits im Plenarsaal installierten Cluster ausgeführt, welche die Ergebnisse der Simulation bestens bestätigte. Die guten Resultate bei diesem völlig unsymmetrischen und schwierig zu berechnenden Gebilde bestätigen den im Ulysses verwendeten Algorithmus der Cluster-Berechnung.

PROJEKTENTWICKLUNG MIT DER DESIGN ENGINE

Die Ulysses Design Engine ist das eigentliche Kernprogramm, mit dem alle Berechnungen, die Auralisation und auch die Raumeingabe, ausgeführt werden. Speaker Builder, Absorber

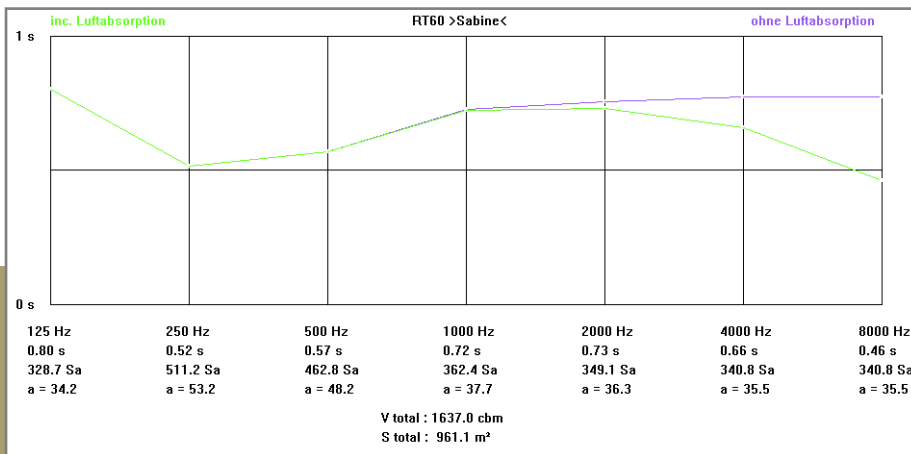
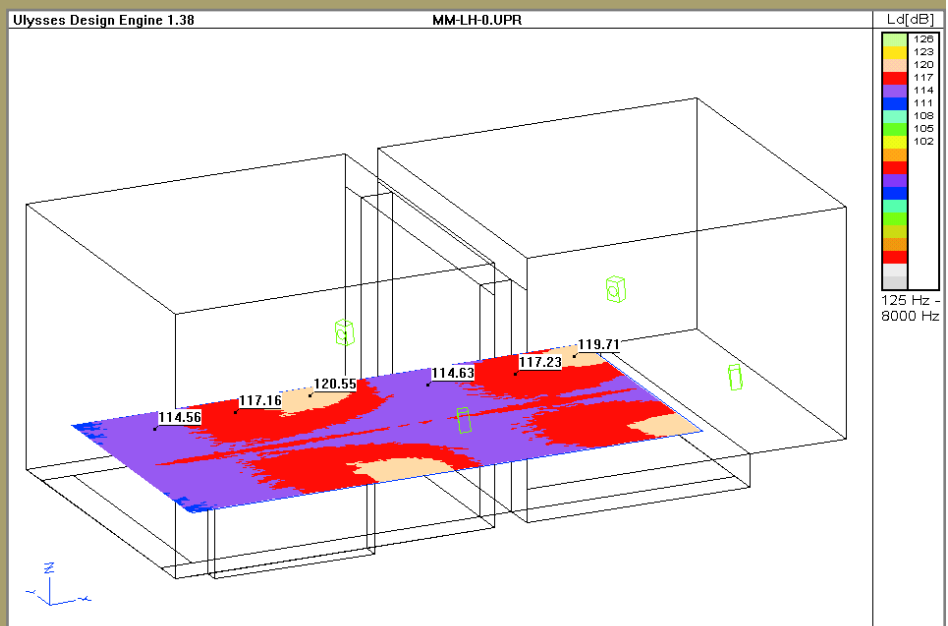


Abb. 3: Nachhallzeiten mit stark absorbierender Wandverkleidung (Var2)

Beispiel für die in Abb. 1a blau umrandete Hörfläche, die hier ca. 1,6 m oberhalb der Bodenfläche liegt, die als Publikumsfläche definiert wurde. Die erste Größe, die es hier zu berechnen gilt, ist die Direkt-schallverteilung. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis für den Fall, daß der längliche Raum mit zwei Lautsprechern für den vorderen und zwei Lautsprechern für den hinteren Bereich versorgt wird, die für eine gleichmäßigere Beschallung 1,5 m über dem Publikum plaziert wurden. Mit dieser Aufteilung wird erreicht, daß die Pegelunterschiede über die gesamte Hörfläche betrachtet für den Direkt-schallanteil nicht mehr als ca. 6 dB betragen. Würde man dagegen nur die beiden vorderen Lautsprecher benutzen, so wäre die Pegeldifferenz für den Direkt-schall deutlich größer. Die Direkt-schallverteilung wird von Ulysses in wenigen Sekunden berechnet,

so daß man hier sehr schnell verschiedene Varianten vergleichen kann. Im selben Vorgang wird auch die Diffusfeldverteilung berechnet, die hier über die Nachhallzeit und den



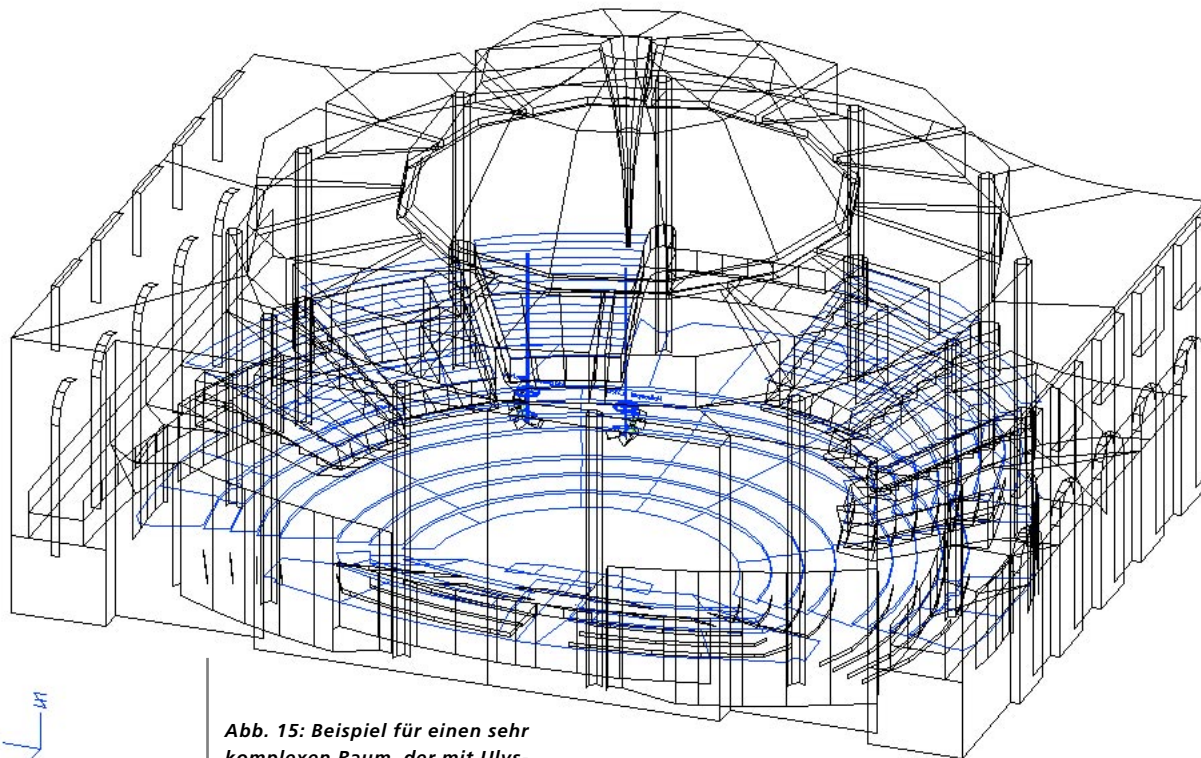
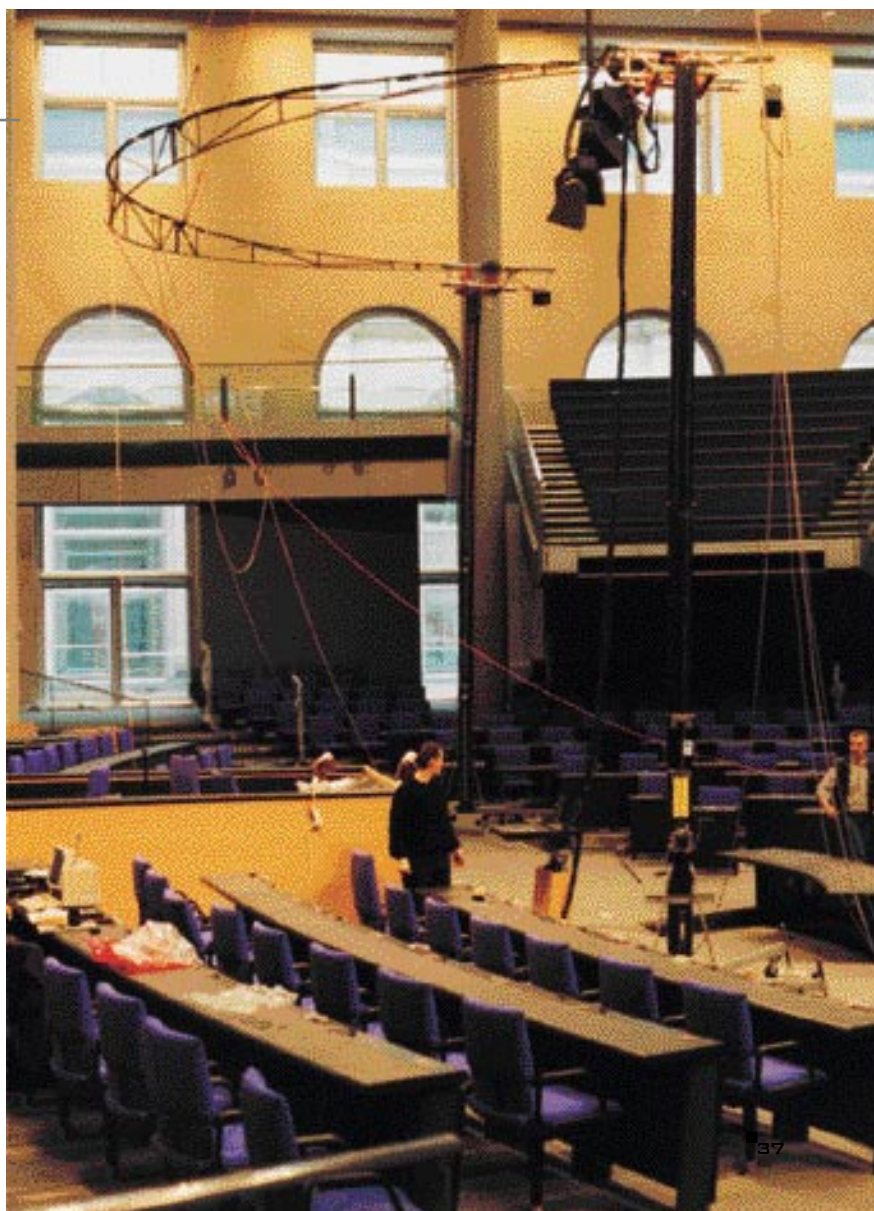


Abb. 15: Beispiel für einen sehr komplexen Raum, der mit Ulysses berechnet wurde.

DIE FERTIGEN UND KOMPLETT INSTALLIERTEN LAUTSPRECHER-CLUSTER IM PLENARSAAL WURDEN ZUR ÜBERPRÜFUNG DER BERECHNUNGEN NOCH EINMAL VOR ORT VERMESSEN. DAZU BAUTEN SCHLOSSER EIGENS EINEN HALBKREISFÖRMIGEN ARM, DER AN ZWEI GENIES FIXIERT UND IN DER KUPPEL VERSPANNT WURDE. AUF DIESEM ARM WAREN 19 MIKROFONKAPSELN VON AKG IN 10-GRAD-SCHRITTEN BEFESTIGT.

DURCH AUSWERTEN DER MESSSIGNALE VON DEN KAPSELN ÜBER DAS FFT-MESS SYSTEM MONKEY FOREST (LINKS UNTEN IM BILD) UND DURCH DAS DREHEN DES GESAMTEN ARMS EBENFALLS IN 10-GRAD-SCHRITTEN ERGAB SICH SOMIT EIN KOMPLETTES KUGELRASTER MIT DATEN IM UNF-FORMAT, DAS DANN MIT DEM ULYSSES SPEAKER BUILDER DARGESTELLT WERDEN KONNTE.

DIESER VON DEN PROFESSIONAL SYSTEM-AUTOREN ANSELM GOERTZ UND CHRISTOPH MOLDRZYK ERFASSTE DATENSATZ BESTÄTIGTE DIE ERGEBNISSE DER VORHERIGEN SIMULATION DES CLUSTERS BESTENS.



Base und Viewer sind dagegen eher als zusätzliche Tools zur Übersichtsdarstellung bei der Lautsprecherauswahl oder für die Kundenpräsentation zu sehen.

Alle folgend beschriebenen Funktionen und Berechnungen beziehen sich auf die Design Engine. Die Nachhallzeit als umfassende raumakustische Größe kann im Ulysses nach Sabine, Eyring oder nach Fitzroy aus den Raumdaten und Tabellen der Wandabsorptionsgrade berechnet werden. Diese einfachen Berechnungen führen zu einer Kurve der frequenzabhängigen Nachhallzeit, die mit oder ohne Luftabsorption dargestellt werden kann (siehe z. B. Abb. 2). Alternativ dazu können für bereits existierende Räume auch die gemessenen Nachhallzeiten für die Oktavbänder eingegeben werden. Der wohl wichtigste Punkt im Ulysses ist die Berechnung des Schallfeldes in bestimmten Raumbereichen, die hier als Hör-

flächen zu definieren sind. Für diese ausgewählten Flächen, die frei im Raum plaziert werden können, kann sowohl der Direktschallpegel wie auch das Verhältnis von Direkt- zu Diffusschall zueinander berechnet werden. Zur Berechnung des Direktschallfeldes werden neben der Abstrahlcharakteristik der Lautsprecher einzig noch das Abstandsgesetz und die Luftdämpfung benötigt.

Für die reflektierten Schallanteile unterscheidet Ulysses zwei Methoden. Zum einen wird ein sehr schneller Berechnungsvorgang nach statistischen Verfahren der Raumakustik angeboten, wo aus der insgesamt in den Raum abgestrahlten akustischen Leistung, der vorhandenen Absorptionsfläche und dem Raumvolumen das diffuse Schallfeld berechnet wird. Streng genommen sind die Ergebnisse aber nur dann richtig, wenn alle Quellen als Kugelstrahler betrachtet wer-

Abb. 5: Verhältnis von Direktschall zu Diffusschall (Var1)

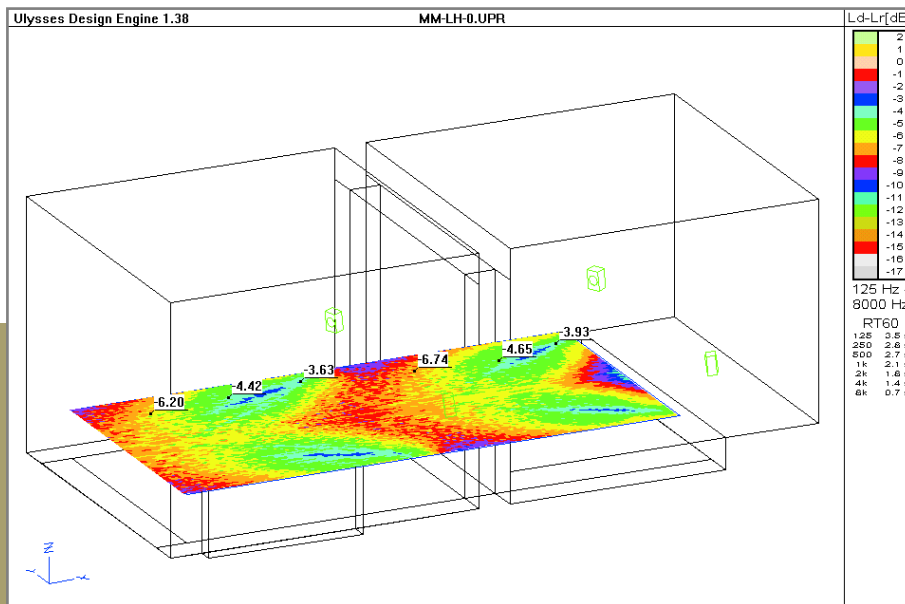
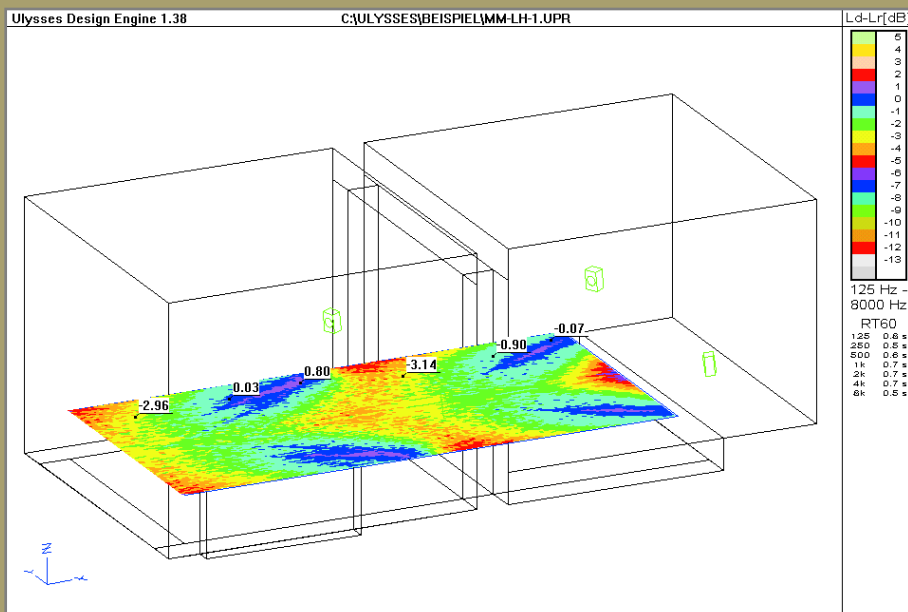


Abb. 6: Verhältnis von Direktschall zu Diffusschall (Var2)



den dürfen und die Absorptionsfläche völlig gleichmäßig über den Raum verteilt ist. Da diese Voraussetzungen eigentlich nie erfüllt sind, kommt es hier zu mehr oder weniger großen Fehlern in der Berechnung. Das Ausrichten der Lautsprecher auf die stark absorbierende Publikumsfläche in einem halligen Raum würde bei dieser Berechnungsvariante keinerlei Beachtung finden, woran sich leicht erkennen läßt, daß hier eine gewisse Skepsis angebracht ist, was natürlich keinesfalls dem Programm anzulasten ist. Angemessen erscheint diese Berechnungsmethode dagegen, wenn es um die Berechnung des Pegels durch gleichmäßig verteilte Quellen, z. B. Deckenlautsprecher in großer Stückzahl, geht.

Grundsätzlich wird jeder Lautsprecher hier als Kugelschallquelle betrachtet, die eine aus dem Wirkungsgrad und der eingespeisten elektrischen Leistung berechnete Schalleistung abstrahlt. Diese entspricht der des tatsächlichen Lautsprechers, nur daß dieser aufgrund seines Richtverhaltens den Schall mehr oder weniger gerichtet abstrahlt.

Die zweite Möglichkeit, dem Diffusschallfeld auf die Spur zu kommen, ist die vorab schon beschriebene Methode der Strahlenverfolgung mit Berechnung der Wandreflexion bis zu einem gewissen Grad. Hier geht das Richtverhalten des Lautsprechers, so wie es in der Lautsprecherdatenbank vorliegt, vollständig in die Berechnung ein. Leider ist diese wesentlich genauere Berechnungsform deutlich zeitaufwendiger und kann durchaus einige Minuten bis Stunden in Anspruch nehmen. Mit dieser Berechnung wird auch kein flächendeckendes Resultat für die ganze Hörfläche erzielt, sondern immer nur der Energiezeitverlauf (ETC) für einen bestimmten Empfänger berechnet.

Für diese Position im Raum liefert der Algorithmus der Strahlenverfolgung dann nicht nur den Pegel an dieser Stelle, sondern auch den zeitlichen Verlauf der eintreffenden Schallanteile. Das sogenannte ETC Echogramm zeigt das Eintreffen des Direktschalls und der anschließenden Reflexionen mit ihrer Intensität über einer Zeitachse an. Besonders gut eignet sich diese Darstellungsform zur Auffindung möglicherweise vorhandener Echos im Raum, die sich als starke und spät eintreffende Reflexionen zeigen. Will man nun die Ursache einer bestimmten Reflexion nachvollziehen, so kann ein Reflektogramm den Verlauf der Strahlenverfolgung im Raum sichtbar machen.

Für eine mögliche Auralisation kann aus der ETC die Impulsantwort für die Faltung mit einer Musik- oder Sprachpassage erzeugt werden.

SIMULIERTE RÄUME HÖREN

Das Signal, das man nun in dem simulierten Raum virtuell wiedergeben und abhören möchte, muß auf dem PC in Form einer einkanaligen WAV-Datei im Format 16 Bit und 44,1 oder 22,05 kHz vorliegen. Für Sprachsignale dürften auch die 22,05 kHz vollkommen ausreichen, womit sich die Berechnungszeit immerhin halbiert. Besonders gut geeignet sind für das Hineinhören Aufnahmen, die selber nachhallfrei sind, so daß man wirklich nur den Nachhall des berechneten Raumes hört. Die Rechenzeit für die Faltung mit der simulierten Impulsantwort kann für einen 200 MHz Pentium MMX-Rechner als x -faches der Länge der WAV-Quelldatei angegeben werden, wobei x gleich der Anzahl der Reflexionen geteilt durch 16 ist. Nach der erfolgten Berechnung kann sowohl die Originaldatei, wie auch die für den simulierten Raum berechne-

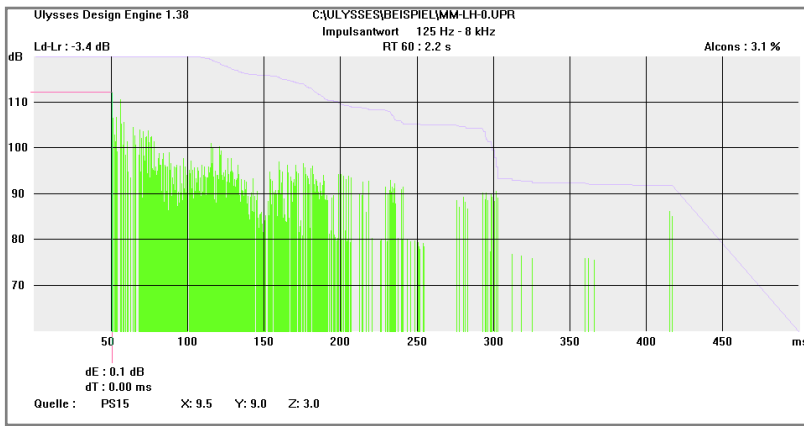


Abb. 7: ETC-Kurve für eine Empfängerposition hinten in der Mitte des Raumes (Var1)

Abb. 8: ETC-Kurve für eine Empfängerposition hinten in der Mitte des Raumes (Var2)

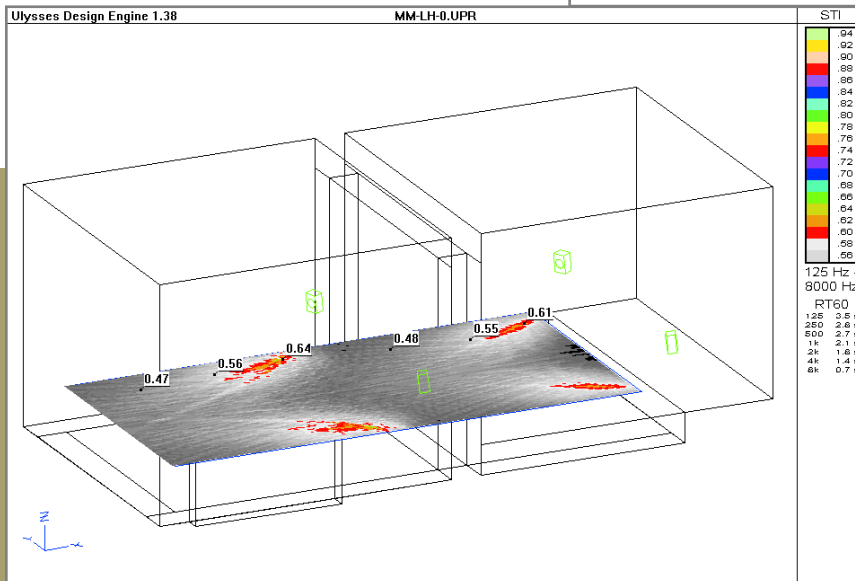
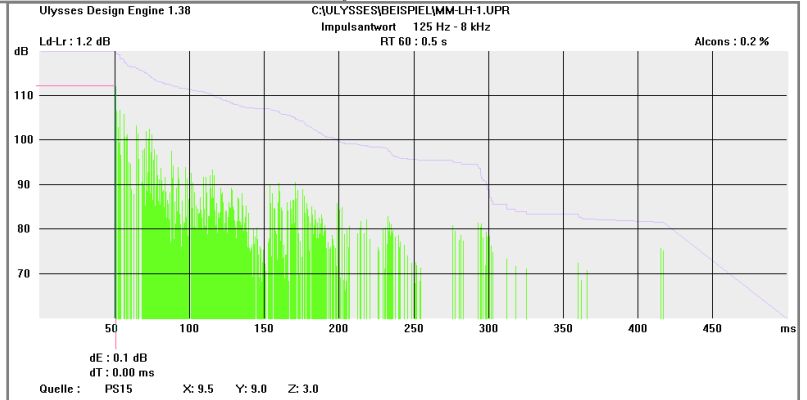
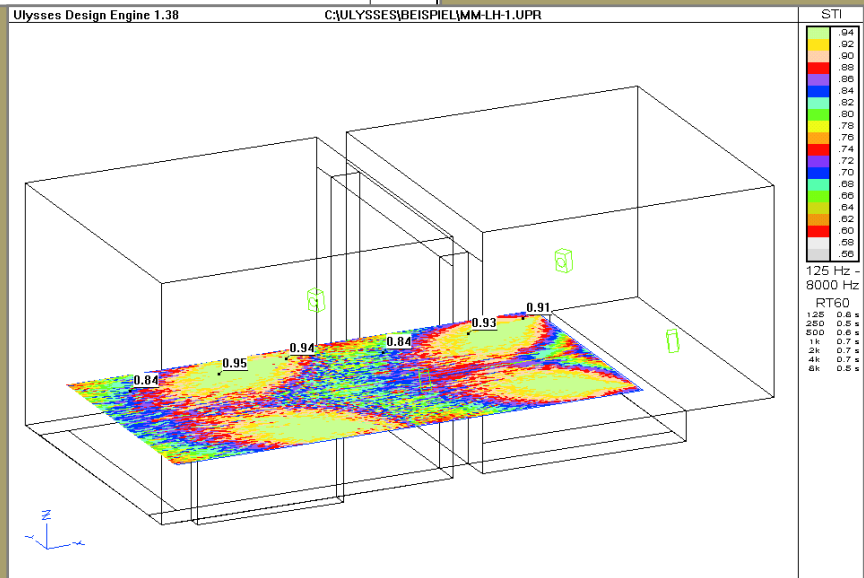


Abb. 9: STI-Werte auf der Zuhörerfläche (Var1)

Abb. 10: STI-Werte auf der Zuhörerfläche (Var2)



te Datei direkt aus der Ulysses Design Engine abgespielt werden. Voraussetzung ist natürlich eine unter Windows korrekt installierte und bekannte Soundkarte.

Was man nun dort hört, ist für eine ausgewählte Empfängerposition das Signal aus der ursprünglichen Quelldatei - abgespielt über die Lautsprecher in dem betreffenden Raum. Der Empfänger wird hier vereinfacht als monaural mit Kugelcharakteristik angenommen.

Auf die kompliziertere Methode der binauralen Simulation mit zwei richtungsabhängigen Empfängern, die vom Richtverhalten den menschlichen Ohren entsprechen, wurde zunächst einmal verzichtet. Für diesen Fall würde der Empfänger vergleichbar den Lautsprechern in einem dichten Rasternetz vermessen und sein Richtverhalten für sogenannte Richtungsgruppen frequenzabhängig angegeben. In der Simulation wäre nun zu prüfen, aus welcher Richtung die Schallstrahlen auf die beiden den Ohren entsprechenden Empfänger treffen, so daß sie anschließend entsprechend frequenzabhängig bewertet werden können. Ebenso ginge der Laufzeit- bzw. Phasenunterschied zwischen den beiden räumlich versetzten Empfängern in die Berechnung ein. Für eine exakte Simulation mit Richtungseindruck ist dieses Verfahren unumgänglich, da die Ortung einer Schallquelle primär über interaurale Laufzeitdifferenzen und eine rich-

tungsabhängige Filterung des Schallereignisses durch die Außenohrübertragungsfunktion erfolgt.

Ebenso wird bei der Auralisation in der aktuellen Version 1.38 von Ulysses darauf verzichtet, den berechneten Anfang der Raumimpulsantwort durch einen statistisch ermittelten Nachhallverlauf zu ergänzen. Die zur Zeit in einer Testphase befindliche nächste Version wird dann schon um diese Fähigkeit erweitert sein, wie ganz aktuell von IFB-Soft zu erfahren war. Um den Rechenaufwand bei der Strahlenverfolgung in Grenzen zu halten, wird hier ein Schallstrahl nicht mehr weiter verfolgt, wenn er um einen bestimmten Wert gegenüber dem Direktschall abgefallen ist. Dieses sogenannte Abbruchkriterium bewirkt, daß der in Natura unendlich lange abklingende Nachhallverlauf unnatürlich früh abgebrochen wird. Um trotzdem den Höreindruck eines ausklingenden Nachhalls zu vermitteln, wird versucht, diesen durch einen Hallalgorithmus nachzubilden.

Insgesamt ist damit die Auralisation in Ulysses eher einfacher Natur, was auch in der Betriebsanleitung deutlich gemacht wird. Der Sinn und Zweck hier liegt darin, es zu ermöglichen, sehr schnell für einen akustischen Überblick ein hörbares Resultat zu liefern, das auf jeden Fall korrekt ist, aber eben keinen Richtungseindruck vermittelt und auch den späten leisen Nachhall nicht wiedergibt. Eine praktische Erprobung der

Auralisation zeigte jedoch, daß der Höreindruck für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften des Raumes völlig ausreichend ist. Klanglich war der Eindruck sehr natürlich und frei von den sonst gelegentlich zu beobachtenden tonalen Verfärbungen. Als Fazit dürfte die Ulysses-Auralisation daher als gelungener Kompromiß zwischen Rechenaufwand respektive Rechenzeit und verwertbaren Ergebnissen betrachtet werden.

HÖREN UND STAUNEN

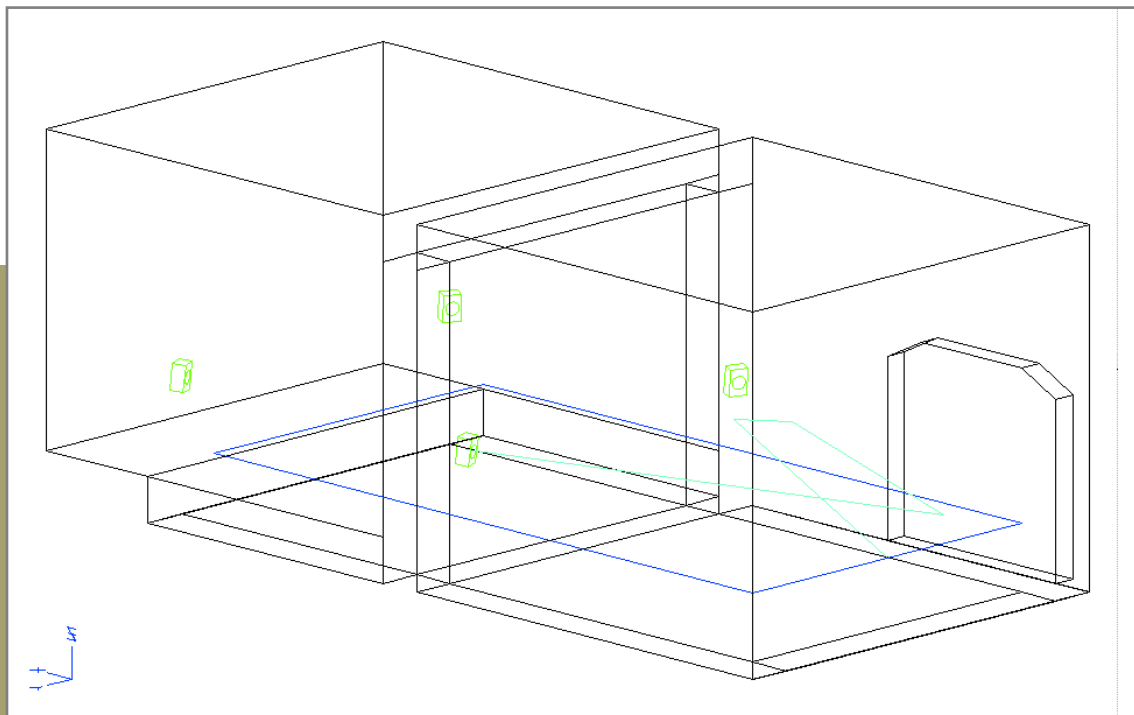
Um den Unterschied dieser beiden Raumvarianten jetzt nicht nur in Zahlen zu fassen, kann für ausgewählte Hörpositionen die Auralisation erfolgen. Es empfiehlt sich dabei, eine wohl

bekannte, möglichst nachhallfreie und nicht zu lange Musik- oder Sprachaufnahme zu verwenden. Für die beiden Beispiele wurden kurze Sprachausschnitte und einige Musikpassagen verwendet, die in einer WAV-Datei mit 16-Bit-Auflösung und 44,1-kHz-Abtastrate zusammengefaßt waren. Die Hörergebnisse fielen tonal ausgewogen und plausibel aus, so daß es anschaulich gut möglich war, die Unterschiede im Höreindruck und vor allem bei der Sprachverständlichkeit deutlich zu machen.

KOMPATIBILITÄT ZU FREMDDATEN

Da jedes Simulationsprogramm auf Lautsprecherdaten und Absorberdatenbanken in größerem Rahmen angewiesen ist,

Abb. 14: Rückverfolgung einer in der ETC auffälligen Reflexion in der 4-kHz-Oktave



Schalleistungspegel der Lautsprecher bestimmt wird. Näheres hierzu wurde bereits vorab erläutert. Für den Beispielfraum finden sich in Abb. 5 und Abb. 6 für die beiden Varianten der Wandverkleidung die Verhältnisse von Direktschall zu Diffusschall. Ebenfalls aus diesen Daten lassen sich für die Hörfläche die Alcons- und STI-Werte zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit herleiten. Abb. 9 und 10 zeigen die STI-Werte, die für die Variante ohne Wandverkleidung mit Größen von 0,47 bis 0,64 eher schlecht ausfallen, was eine nur mäßige Sprachverständlichkeit bedeuten würde. Mit den gut absorbierenden Wandverkleidungen wandelt sich das Bild drastisch, und die STI-Werte liegen nun zwischen 0,84 und 0,94, was eine exzellente Sprachverständlichkeit bedeutet.

Abschließend wurde noch eine Raytracing-Berechnung für einen kritischen Hörerplatz ganz am hinteren Ende der Publikumsfläche gestartet. Die ETC-Kurven sind in Abbildung 7 und 8 dargestellt. Aus dieser ETC-Berechnung lassen sich nun auch die exakten Werte für die Direktschall- und Diffusschallwerte ermitteln. Sehr wichtig ist es auch, im ETC-Verlauf nach gefährlichen Echos Ausschau zu halten, die als herausragende späte Reflexionen zu erkennen sind. Jede einzelne Reflexion läßt sich im ETC-Diagramm markieren und anschließend in der Raumdarstellung zurückverfolgen über die reflektierenden Wandflächen bis hin zur Quelle. Ein Beispiel für eine späte Reflexion, die in der 4-kHz-Oktave auftrat, zeigt Abb. 14. Der Weg kann hier über drei Wandreflexionen bis zur Quelle zurückverfolgt werden.

stellt sich natürlich die Frage nach der Kompatibilität zu anderen Programmen. Ebenso könnte es nützlich sein, wenn ganze Räume zum Vergleich der Simulationen zwischen den Programmen ausgetauscht werden könnten. So wurde auch der Plenarsaal zunächst mit EASE editiert, unter anderem, um hier eine Auralisation zu berechnen und auszuführen.

Für den Import der Lautsprecherdaten wurde für Ulysses das UNF-Format definiert, das eine leichte Konvertierung aus dem für CADP2 und EASE üblichen GDF-Formates erlaubt. Der Ulysses-Speakerbuilder ermöglicht aber auch den direkten Import von EASE- oder AcoustaCadd-Datenbanken sowie von Dateien im UNF- oder GDF Format mit 5° oder 10° Auflösung.

ANWENDUNGEN

Die Anwenderzielgruppe von Ulysses liegt klar bei allen Firmen und Planungsbüros, die sich mit der Beschallung von größeren Räumen und Freiflächen beschäftigen. Ein Schwerpunkt wurde bei der Programmierung auf die schnelle Bedienbarkeit, auf schnelle Grafikroutinen und auf kurze Rechenzeiten gelegt. Sobald man einmal geübt ist im Umgang mit Ulysses, dürfte man dazu geneigt sein, selbst für kleinere

Projekte vorab am Rechner das Beschallungskonzept zu optimieren.

Geht man einmal alle Menüpunkte im Ulysses und den zugehörigen Tools durch, so kann man eine überraschende Feststellung machen: Es gibt nichts was überflüssig wäre und eigentlich kaum etwas, was man vermissen würde. Für 90% aller Standardanwendungen bei der alltäglichen Planung von Lautsprecheranlagen dürfte das Programm damit optimal ausgelegt sein.

Sicherlich gibt es eine Menge Punkte bei der Schallfeldberechnung, wie die Streuung an Oberflächenstrukturen, Beugung an Kanten oder die Schallausbreitung über Publikumsflächen, die in Ulysses keine Beachtung finden. Solche Feinheiten dürften aber mehr den Raumakustiker interessieren, der bei sehr aufwendigen und teuren Projekten darauf angewiesen ist, perfekte Simulationen vorzulegen und diese auch noch durch entsprechende Auralisationen zu unterstützen. Für diese Aufgaben bedarf es dann wesentlich aufwendiger Programme, die meist ein Mehrfaches in der Anschaffungskosten und auch an Zeit für die Bedienung in Anspruch nehmen. Man sollte daher klar unterscheiden zwischen einer komplizierten raumakustischen Planung, wie sie z. B. für einen Konzertsaal angebracht wäre und die durchaus einige

Monate an Arbeitszeit beanspruchen kann und der Planung eines Beschallungskonzeptes, wo es in erster Linie um den optimalen Einsatz einer Lautsprecheranlage im Zusammenspiel mit der Raumakustik geht. Das Letztere ist die Domäne von Ulysses, die es optimal beherrscht.

HANDBUCH UND SCHULUNGEN

Die zugehörige Online-Hilfe ist zur Zeit die einzige Unterstützung, die der Ulysses-Käufer mit dem Programmpaket erhält. Die Erläuterungen hier beziehen sich zum größten Teil auf die eigentliche Bedienung des Programms, was ja auch der Sinn einer Online-Hilfe sein sollte. Weitere Background-Informationen zu den Rechenvorgängen und eine grundsätzlich Einführung sucht man hier aber leider vergebens. Eine kurze Einführung anhand eines Beispiels wäre für den Anfänger ebenso wünschenswert wie eine genauere Erläuterung der Berechnungsmethoden für den erfahrenen Akustiker.

Zum Glück weiß man nun aber, daß Ulysses von IFB-Soft, einer Partnergesellschaft von IFB, vertrieben wird, die eines ihrer Hauptaufgaben in Schulungen und Seminaren zur Beschallungstechnik sieht. Hier gibt es daher einen 1 1/2-tägigen Ulysses-User-Workshop, in dem der Umgang mit dem Programm, die akustischen Grundlagen dazu sowie die Interpretation der Ergebnisse ausführlich behandelt werden. Die nächste Veranstaltung dieser Art findet am 11. und 12. 10. 1999 in Aschaffenburg statt und kostet ca. 1.450 DM. Alternativ dazu gibt es auch eine eintägige Intensivschulung, bei der ein Mitarbeiter des IFB im Hause des Käufers eine detaillierte Einführung gibt und für alle Fragen bereit steht. Das Programm selber schlägt mit ca. 2.260,- DM für eine Einzelplatzversion incl. einer Backupversion zu Buche. In den USA erfolgt der Vertrieb über IRP Professional Sound Product. Ulysses ist sowohl mit deutscher wie auch mit englischer Oberfläche und Online-Hilfe erhältlich.

FAZIT

Ulysses ist ein unter Windows zu betreibendes Softwarepaket zur akustischen Simulation von Räumen und Beschallungsanlagen. Die Funktionen und die Bedienung sind dabei optimal an den praktischen Bedürfnissen orientiert und werden durch keinerlei unnötige Features gestört, was sich in kurzen Rechenzeiten und sehr schnellen Grafikausgaben widerspiegelt. Der Umgang mit dem Programm wird einem sehr schnell vertraut, so daß man sich bereits nach kurzer Zeit ausschließlich auf die eigentliche Aufgabenstellung der Planungsarbeit konzentrieren kann. Lange Wartezeiten, umständliche Eingaberoutinen, gigantische Mengen von Datenmüll und Programmabstürze gibt es bei Ulysses kaum oder gar nicht, was manchen Benutzer moderner Softwarepakete überraschen mag. Seine Qualitäten konnte Ulysses bei der Simulation der Beschallungsanlage im neuen Plenarsaal des Reichstagsgebäudes unter Beweis stellen, wo sowohl die Berechnung der beiden Halbbalken als Cluster, wie auch die Simulation für einige im Saal verteilte Plätze zu einer erfreulich hohen Übereinstimmung mit den realen Meßergebnissen führte, was letztendlich eine hohe Planungssicherheit garantiert. Ebenso erfreulich ist der Preis, so daß es heute schon über 60 registrierte Ulysses-Anwender gibt. Ausschlaggebender als der eigentliche Anschaffungspreis dürfte allerdings sein, daß man mit Ulysses sehr schnell zu genauen Ergebnissen kommt, was letztendlich eine viel größere Bedeutung bezüglich der entstehenden Kosten hat.

■ ■ TEXT UND GRAFIKEN:
ANSELM GOERTZ

