

N. Wendt: Raumsimulation mit CARA

CARA (Computer Aided Room Acoustics) ist ein PC-Programm zur numerischen Simulation und zur Optimierung der Raumakustik beliebiger Räume. Es wurde von der Firma „ELAC Technische Software GmbH“ mit Sitz in Kiel entwickelt. Zur Berechnung wird eine Spiegelstrahlmethode mit einem so genannten Backtracing-Verfahren verwendet.

Die Analyse und Verbesserung der raumakustisch bedingten Klangveränderungen erfolgt in CARA zweistufig:

- Bestimmung der akustischen Grundeigenschaften des Raumes (Akustisches Raumklima) mit Vorschlägen zur Raumausstattung (Wandmaterialien, Möblierung), um das Nachhallzeit-Spektrum zu optimieren,
- automatische Optimierung der Lautsprecheraufstellung und der Hörposition, um Interferenzerscheinungen (stehende Wellen, Raummoden) im Hörbereich zu minimieren.

CARA bietet die Möglichkeit, das gesamte Schallfeld im Raum zu berechnen und 3D animiert darzustellen. So lässt sich die Modenlandschaft mit ihrem Wellencharakter, die Sprachverständlichkeit oder die räumliche Abbildung (Ortung) im gesamten Raum untersuchen. Außerdem berechnet CARA Schalldruckfrequenzgänge oder Raumimpulsantworten/Echogramme und eine Reihe von akustischen Kennzahlen (frequenzabhängige Nachhallzeiten, Klangfärbung, Sprachverständlichkeit und Ortung).

Als Sonderfunktion ermöglicht die Auralisation einen Hörvergleich mit frei wählbaren Musikstücken, um z.B. Klangunterschiede verschiedener Lautsprecheraufstellungen akustisch beurteilen zu können.

Die Systemvoraussetzungen für CARA sind beim heutigen Stand der Computerentwicklung recht niedrig. Als Prozessor wird ein Pentium bzw. ein entsprechend kompatibler CPU empfohlen. Der Arbeitsspeicher sollte mindestens 64 MByte, besser jedoch 128 MByte, betragen. Auf der Festplatte müssen mindestens 500 MByte frei sein. Als Betriebssystem werden Windows-Versionen ab Windows 98 und alle Neueren empfohlen. Der Bildschirm sollte eine Auflösung von mindestens 800x600 und eine Farbtiefe von mindestens 16 Bit haben. Die Grafikkarte sollte 3D-fähig sein. Für die Auralisation ist eine Sound-Karte erforderlich.

[<http://www.cara.de>]

Funktionale Struktur von CARA

Das Programmpaket CARA (Computer Aided Room Acoustics) gliedert sich in drei Funktionsblöcke:

- Raumkonstruktion
- Berechnungen
- Ergebnisausgabe

Für jeden dieser Funktionsblöcke existiert ein eigenes Programmmodul, das unabhängig von den anderen funktioniert. Das Modul CARACAD zur Raumkonstruktion ermöglicht die

Übergabe aller Raumdaten an den Rechner. Akustische Berechnungen zur Raumsimulation führt das Programmmodul CARACALC durch. Für die Darstellung der Ergebnisse existieren die Programme ETS2DV und ETS3DV. Diese erreicht man über das Programmmodul CARACALC.

Raumkonstruktion (Programmmodul CARACAD)

CARA ermöglicht die Konstruktion eines (nahezu) beliebigen Raums. Zunächst wird der Grundriss des Raums (Fußbodenfläche) erstellt. Dazu muss man in vier Schritten die Grundeinstellungen vornehmen: Als erstes legt man die Grundform fest, wie Abbildung 1 zeigt. Das können L-Räume sein oder gekoppelte Räume mit Durchgängen usw. Die maximale Größe des Grundrisses beträgt 100 x 100 Meter. Als nächstes gibt man die Raummaße und Grundmaterialien ein. Und als letztes legt man die Lautsprecherkonfiguration fest. Angeboten werden: Stereo-, Quadro-, verschiedene Surround- und Public-Address-Konfigurationen (siehe Abbildung 2).

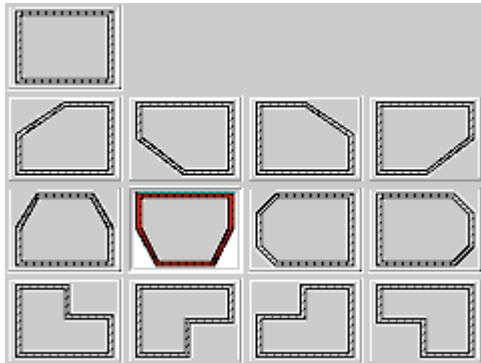


Abbildung 1

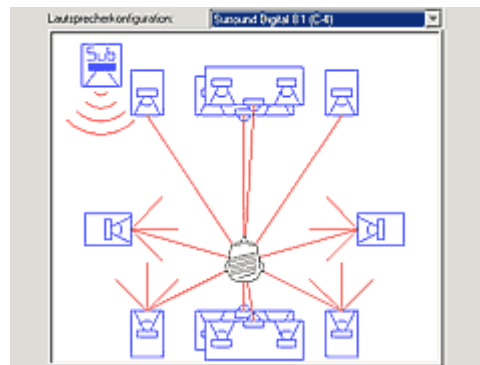


Abbildung 2

Entspricht der Grundriss immer noch nicht den gewünschten Vorstellungen kann man ihn im Menüpunkt „Grundriss“ verändern. Man kann die Eckpunkte beliebig verschieben oder neue Eckpunkte dazufügen (Abbildung 3).

Mittels sog. 3D-Objekte lassen sich u. a. auch Möbelstücke erstellen. Die *Möbel* bestehen aus einzelnen oder mehreren zusammengesetzten 3D-Objekten. Man kann vorgefertigte *Möbel* als Gruppe laden oder auch eigene *Möbel* aus 3D-Objekten erstellen und sie als Gruppe abspeichern. Eine solche Gruppe kann beliebig gedreht und verschoben werden.

Mit Hilfe dieser 3D-Objekte ist es möglich Innenwände, Türrahmen, Fensterbänke, Balken, Dachschrägen, Rampen oder auch Zwischendecken zu erstellen. Die Varianten sind, wie, Abbildung 4 zeigt, sehr umfangreich

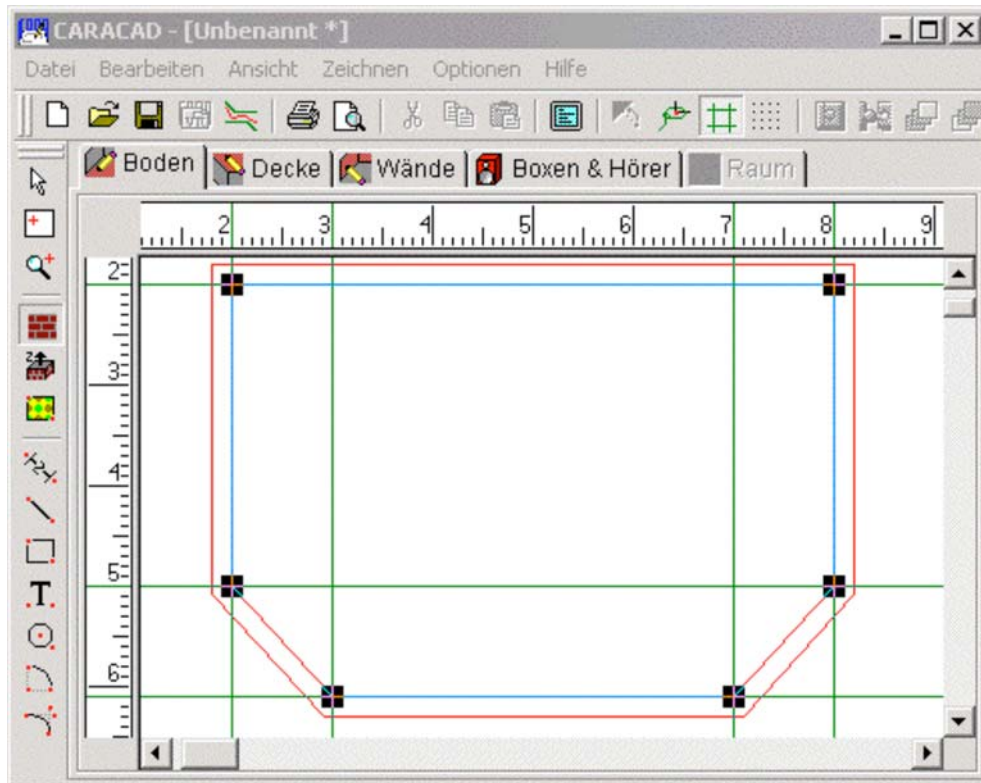


Abbildung 3

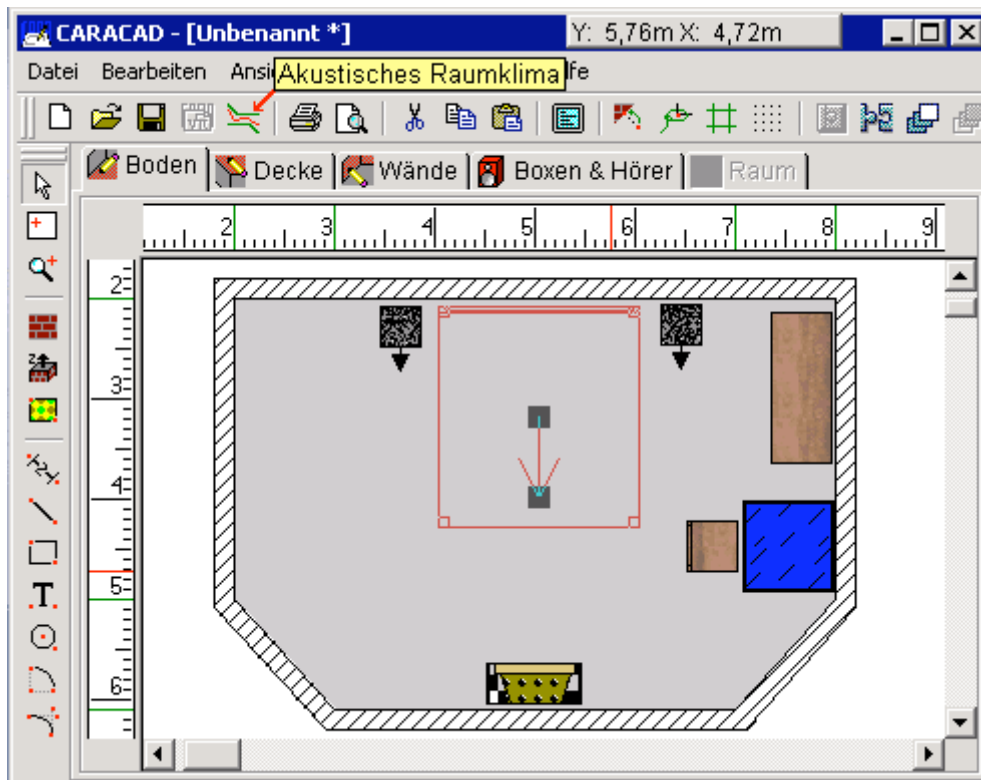


Abbildung 4

Bei der Raumkonstruktion und –ausstattung sollte man beachten, dass jedes 3D-Objekt die Rechenzeit überproportional ansteigen lässt. Hier gilt: "weniger ist mehr". Möbel, die nahe an Lautsprechern bzw. Hörern stehen, beeinflussen den Klang stärker als weiter entfernte, große Möbel stärker als kleine. Man sollte also lieber auf kleine Details verzichten, da sie nur einen geringen Einfluss auf das Rechenergebnis haben, aber einen großen Einfluss auf die Rechenzeit.

Die Form der Deckenfläche entspricht immer der des Fußbodens; die Decke liegt parallel zum Boden. Zusätzlich lassen sich durch Einfügen keilförmiger Podestelemente schräge Deckenflächen definieren. Die senkrechten Seitenflächen des Raumes ergeben sich automatisch durch das Verbinden der einander entsprechenden Kanten von Decken- und Fußbodenflächen. Außerdem kann man zusätzlich Innenwände als Raumteiler, Säulen, Zwischendecken und Deckenbalken einbauen.

Durch die Definition der Oberflächenmaterialien der diversen Teilflächen (Raumpolygone) wird das akustische Absorptionsverhalten bestimmt, also die Nachhallzeiten und somit das Akustische Raumklima. Zusätzlich können auf diesen Teilflächen weitere Materialbereiche (wie z.B. Teppiche, Fenster oder Bilder) angebracht werden, um den Raum realistischer zu modellieren. Materialbereiche sind nur zweidimensional und beeinflussen daher im Gegensatz zu dreidimensionalen Gegenständen (z.B. Möbel) die Rechenzeit praktisch nicht. In Abbildung 5 sehen wir rechts ein hellblaues Rechteck, das ein Fenster darstellen soll, welches in die Wand, umrahmt durch den blauen Kreis (unten mittig) eingesetzt wurde.

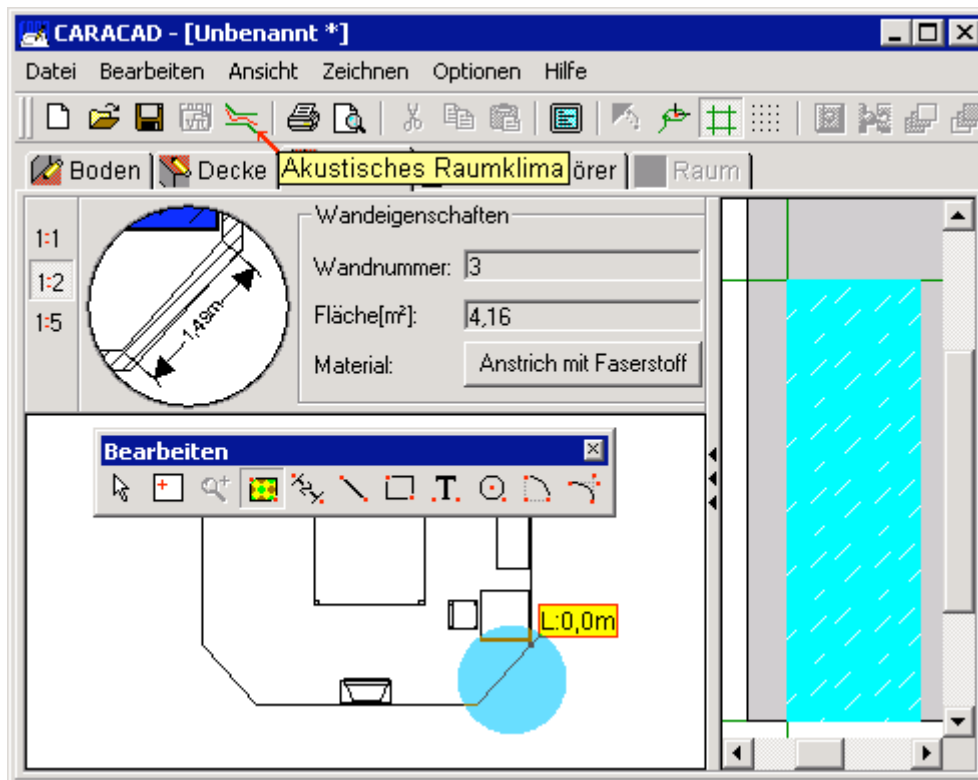


Abbildung 5

Das Material für eine Wand oder Seitenfläche eines 3D-Objekts wählt man aus der Material-Datenbank aus. Die Datenbank enthält Schallabsorptionswerte unterschiedlichster Wand- und Bodenbeläge. Die Frequenzabhängigkeit eines ausgewählten Absorbermaterials

ist in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Der Frequenzgang dient als Hilfe bei der Suche nach einem geeigneten Werkstoff, um das Akustische Raumklima zu verbessern.

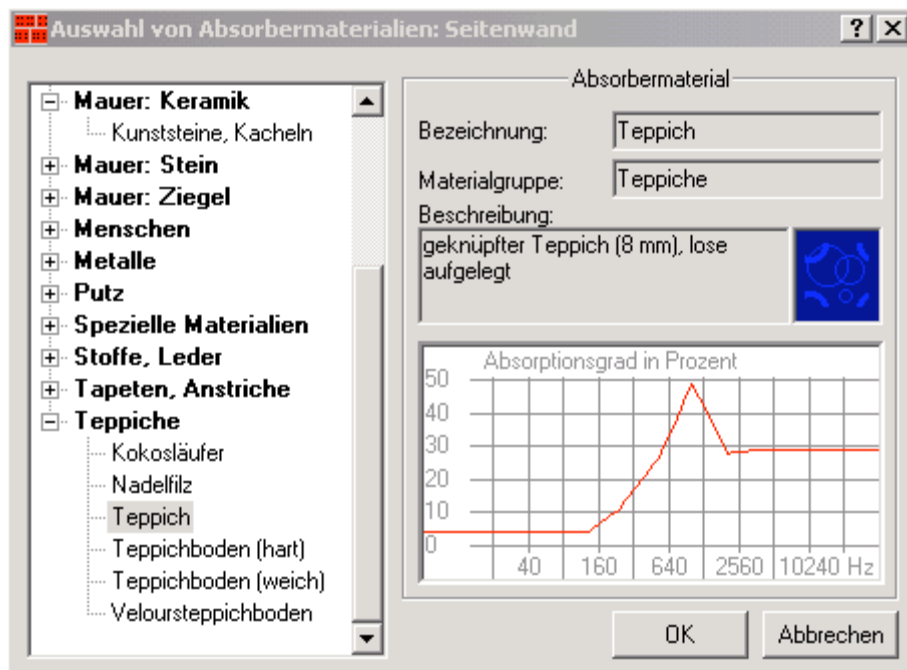


Abbildung 6

Zur Vervollständigung der Raumkonstruktion werden die Lautsprecherboxen aus einer Datei, der Boxendatenbank, ausgewählt und auf die gewünschten Positionen platziert. Sie enthält über 200 Modelle und ist übers Internet jederzeit aktualisierbar. Außerdem kann man eigene Boxen entwerfen bzw. die Daten von Boxen eingeben, die weder in der Datenbank noch im Internet vorhanden sind. Ebenso werden der bzw. die Hörerplätze festgelegt. Zusätzlich sind für die automatische Aufstellungsoptimierung Verschiebebereiche (siehe Abbildung 7) für die Lautsprecherboxen und für den Hörer zu definieren. Innerhalb dieser Verschiebebereiche optimiert CARA die Aufstellung der Lautsprecher und findet den passenden Hörplatz. Ziel ist es, dass die negativen raumakustischen Einflüsse (z. B. Interferenzen, Klangfärbungen) auf die Musikwiedergabe minimiert werden.

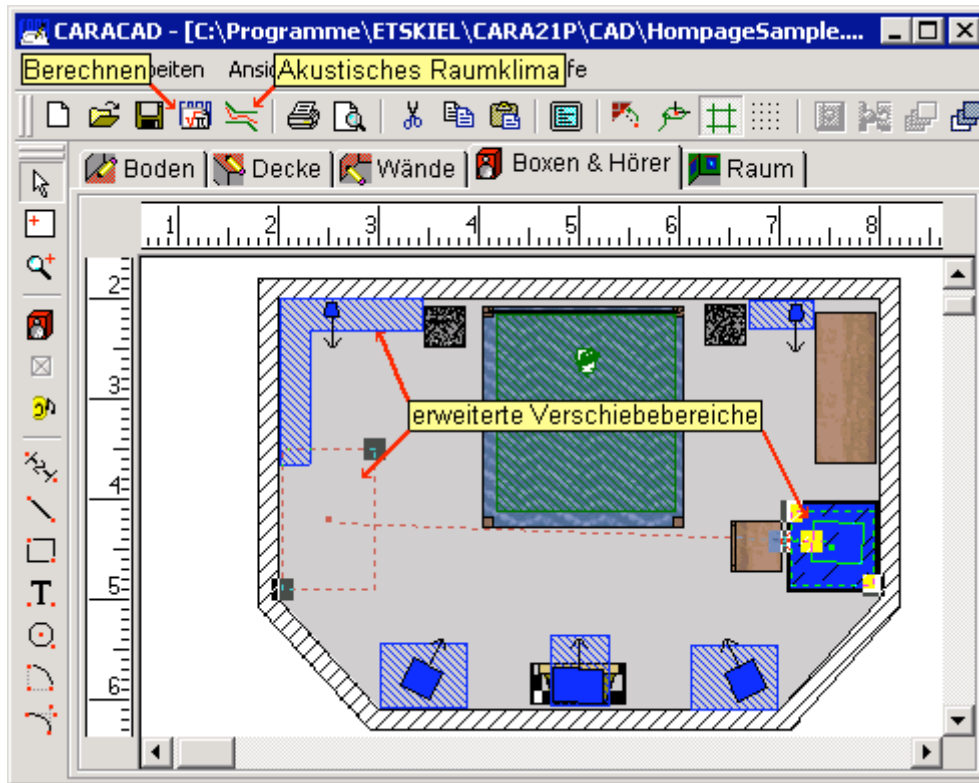


Abbildung 7

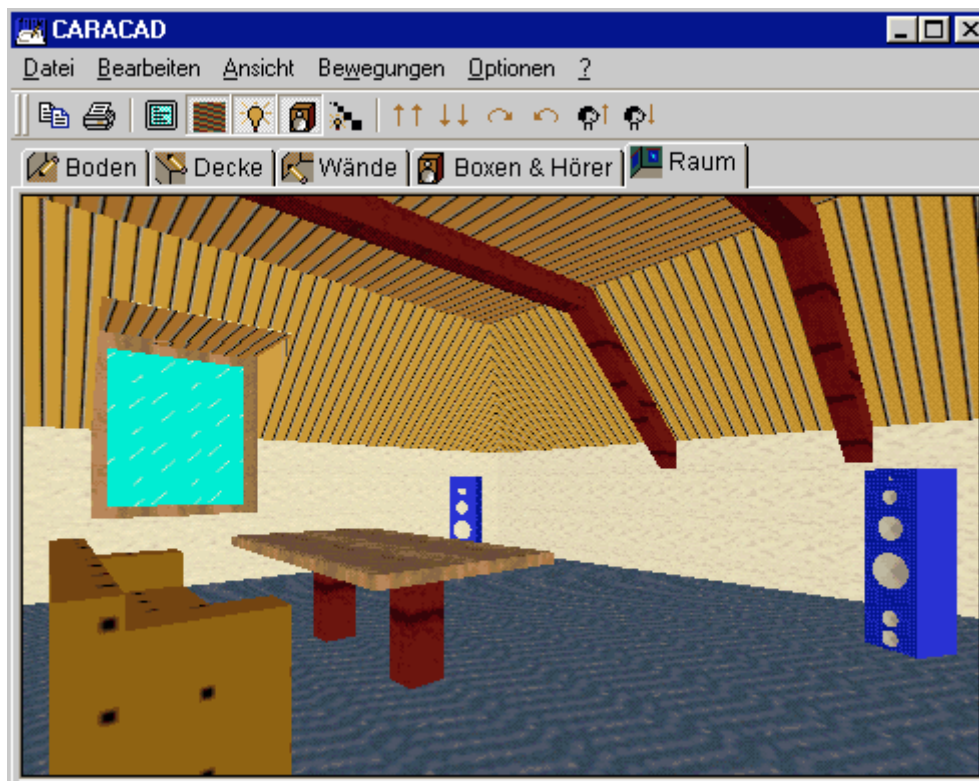


Abbildung 7a

Das Programmmodul ermöglicht die 3-dimensionale Darstellung des konstruierten Raumes; jeder Nutzer kann einen virtuellen Rundgang durch den Raum starten. Unter anderem lassen

sich Beleuchtungsvarianten wählen, Hörerplätze und Boxen anzeigen sowie die räumliche Auflösung verändern. Die 3D-Ansicht des Raumes ist nicht nur ein nettes Spielzeug, sondern sie hilft auch, Fehler zu entdecken. Hat man Möbel oder andere Einrichtungsgegenstände vergessen? Ist das Fenster oder die Tür an der richtigen Stelle? Solche Fragen lassen sich mit der 3D-Ansicht beantworten, da man Realität und Modell nun sehr einfach vergleichen kann (s. Abbildung 7a).

Berechnungen (Programmmodul CARACALC):

Nach Abschluss der Raumkonstruktion startet man das Programmmodul CARACALC. CARA bietet eine Vielzahl raumakustischer Berechnungen. So kann z.B. die Frequenzabhängigkeit des Schalldrucks an den verschiedenen Hörplätzen - erzeugt von einer oder mehreren Boxen - berechnet werden. Hierbei werden je nach Vorgabe der Programmparameter mehrere tausend an den Raumwänden gespiegelte Schallwellen berücksichtigt. Aus dem Raumvolumen und dem Schallabsorptionsverhalten der Oberflächen lässt sich mit Hilfe bekannter Formeln die Nachhallzeit des Raumes abschätzen.

Weitere Algorithmen ermitteln mit Hilfe des Echogramms die zeitliche Struktur des Schallfeldes am Hörplatz oder die Richtung der Schallausbreitung, um die Lokalisation (Ortung) einer (virtuellen) Schallquelle zu beurteilen. Auch lässt sich das Schallfeld im gesamten Raum in seiner Frequenz- und Zeitabhängigkeit berechnen.

Vor dem Start des Moduls sind die Werte einzelner *Programmparameter* festzulegen. Das Dialogfeld für die Einstellung der Parameter zeigt Abbildung 8. Die Taste „Standard“ setzt alle Parameter auf die Grundeinstellung zurück. Diese Variante ist in den meisten Fällen sinnvoll. Mit der maximalen Spiegelungsordnung stellt man die Rechengenauigkeit ein, leider erhöht sich mit der Spiegelungsordnung auch die erforderliche Rechenzeit sehr deutlich. Wird der Raum durch viele, verschiedene Flächen begrenzt, so steigt die Rechenzeit dramatisch an. Man sollte dann die Spiegelungsordnung verringern oder einige Flächen (z.B. Möbel) aus der Konstruktion entfernen. Mit der Verwendung komplexer Wandimpedanzen wächst sowohl die Rechengenauigkeit als auch die Rechenzeit. Als Standard sind reelle Werte vorgegeben. Grundsätzlich gilt, je höher die Genauigkeit desto länger dauert die Berechnung!

Die Auralisationsparameter: „Maximale Länge“ und „Abtastrate“ gehen in die Berechnung der Raumimpulsantwort (RIA) ein. Für eine Auralisation (Abhören des virtuellen Raumes) wird die Raumimpulsantwort benötigt, um den klanglichen Raumeinfluss auf die Musikwiedergabe im Raum evaluieren zu können.

Eine spezifische Komponente von CARACALC behandelt die automatische Aufstellungsoptimierung. Hierbei werden mittels einer stochastischen Suchstrategie die bestmöglichen Plätze für die Lautsprecherboxen und den Hörer (innerhalb der definierten Verschiebereiche) ermittelt. Wie in Abbildung 9 erkennbar, startet man die Aufstellungsoptimierung über den Menüpunkt *Berechnen*. Vorher sollte aber noch die maximale Spiegelungsordnung festgelegt werden, z. B. 4 oder 5. Zusätzlich lassen sich für die Aufstellungsoptimierung Symmetriebedingungen festlegen. Hierzu kann man im Menü Optionen/Variationsbereiche für die beiden Hauptlautsprecher gleiche Abstände zur Stirn- und/oder zu den Seitenwänden erzwingen.

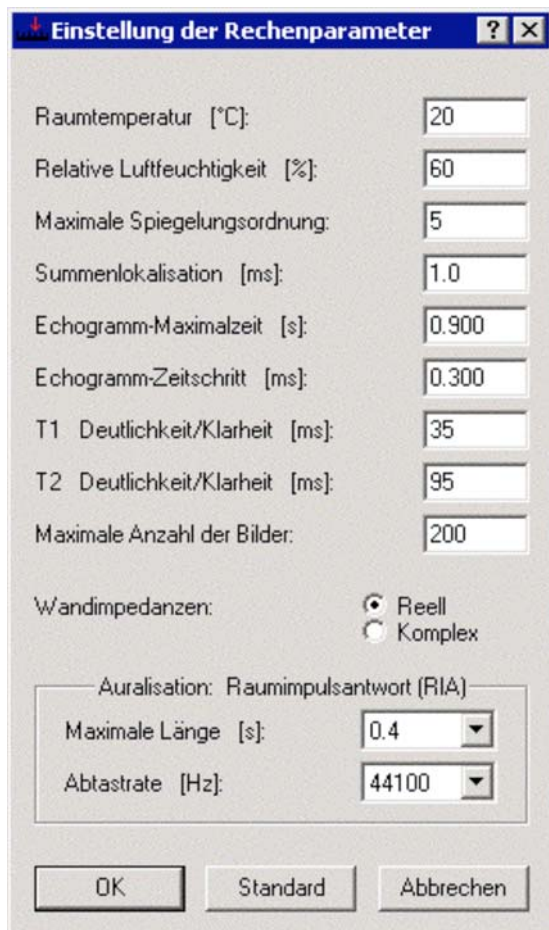


Abbildung 8

Startet man die Aufstellungsoptimierung werden im Anwendungsfenster während der Optimierung die Startaufstellung (grau) der Lautsprecher und des Hörers sowie deren Positionen für die bislang beste Aufstellungsvariante (blau, grün) angezeigt. Im sogenannten Tracer kann man die Optimierung verfolgen. Der Tracer informiert über den aktuellen Stand der Berechnung. Gleichzeitig werden die SPL-Frequenzgänge in den Ergebnisdarstellungen aktualisiert, wenn man diese über das Menü *Ergebnisse, Aufstellungsoptimierung* aufgerufen hat. Nach einigen 100 Versuchen kann die Berechnung abgebrochen werden. Wenn die Ergebnisse noch nicht zufrieden stellen, kann man die Startaufstellung der Boxen bzw. Hörerplätze variieren, die Verschieberegionen ändern oder eine andere maximale Spiegelungsordnung wählen.

Neben der automatischen Aufstellungsoptimierung ist die *Schallfeldberechnung* (Abbildung 10) die häufigste und wichtigste Anwendung aller raumakustischen Berechnungen in CARA. Zunächst legt man im Menüpunkt Rechenparameter (erreichbar unter Menü Optionen) die maximale Spiegelungsordnung fest, z.B. 4 oder 5; Steigerungen der Spiegelungsordnungen sind jederzeit möglich, soweit es die Rechenzeiten zulassen.

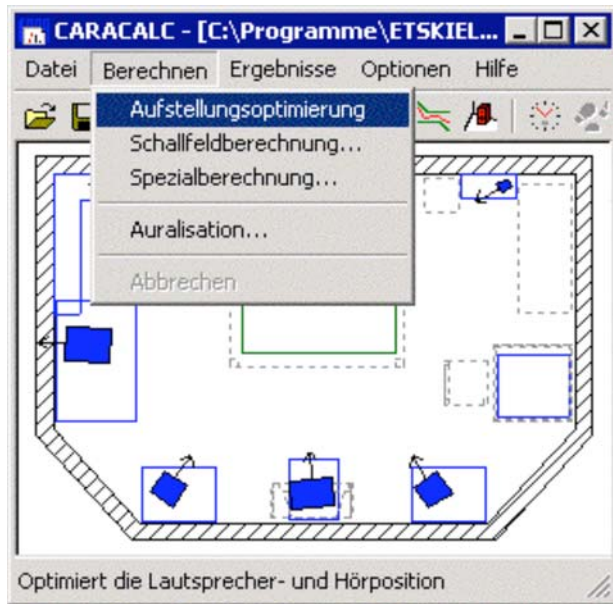


Abbildung 9

In den Schallfeldberechnungen werden an 1000-3000 gleichmäßig über den Raum verteilten Punkten (z.B. in Ohrhöhe) alle raumakustisch relevanten Daten berechnet. Dies betrifft den Schalldruck-Frequenzgang, die Ortung und Sprachverständlichkeit sowie das sequentielle Eintreffen aller Wellenfronten an der Position des Hörers.

Die Ergebnisse der Schallfeldberechnungen beziehen sich auf den aktuellen Standort der Boxen. So lassen sich für diese Boxenaufstellung die besten Hörplätze auf der Basis der Kriterien Klangfärbung (Linearität des Schalldruck-Frequenzganges), Ortung und Sprachverständlichkeit herausfinden. Dies ist insbesondere dann sehr hilfreich, wenn eine Änderung der Boxenaufstellung nicht möglich ist.

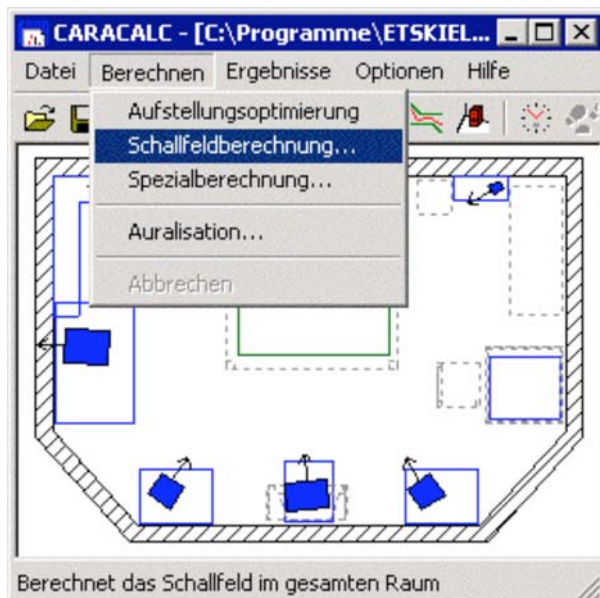


Abbildung 10

Vergleich Simulation/Messung

Abbildung 11 zeigt den Schalldruck-Frequenzgang einer CARA-Simulation (rot) im Vergleich mit einer entsprechenden Messung (grün).

Die Berechnung wurde mit einer maximalen Spiegelungsordnung von 12 durchgeführt. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Nach Angaben von CARA gibt es keine semiprofessionellen Raumakustik-Simulationsprogramme, die eine ähnlich gute Übereinstimmung aufweisen. Dies liegt in den meisten Fällen daran, dass bei den Berechnungen die Phasenlagen der direkten und reflektierten Schallwellen nicht berücksichtigt werden und dass die eingesetzten Lautsprechermodelle nicht genügend realistisch nachgebildet werden. CARA charakterisiert Lautsprecher durch insgesamt 4000 (komplexe) Frequenzgänge zwischen 5 Hz und 40960 Hz (Schrittweite: 1/3 Terz) in etwa 1000 Raumrichtungen und für jeweils 4 unterschiedliche Abstände zum Lautsprecher.

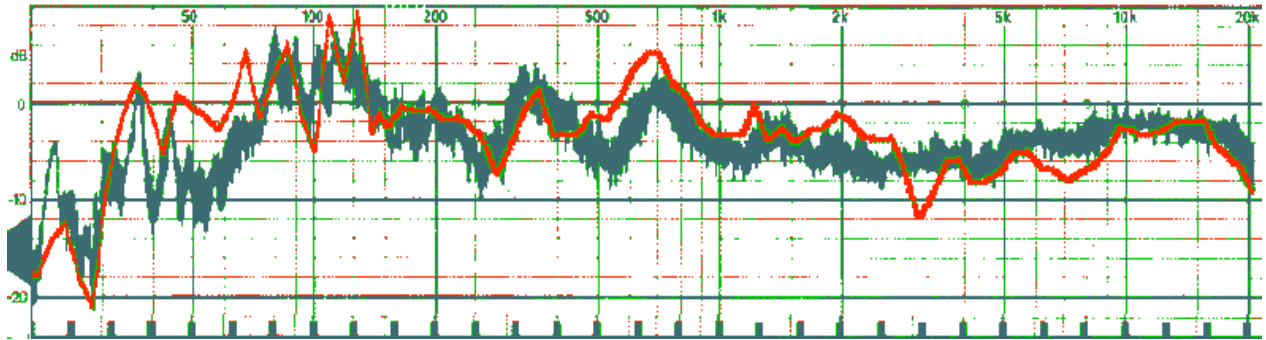


Abbildung 11

Ergebnisausgabe (Programmmodule ETS2DV, ETS3DV):

Die Darstellung der Ergebnisse zu diversen, raumakustischen Berechnungen erfolgt entweder über konventionelle Kurven (Schalldruck-Amplitudenfrequenzgang, Ortungsdiagramm oder Nachhallzeiten und Echogramm) bzw. in dreidimensionalen Diagrammen für die Frequenz- und Zeitabhängigkeit des Schallfelds im Raum.

Die bei den Berechnungen ermittelten raumakustischen Kennzahlen (Nachhallzeit, Ortung oder Sprachverständlichkeit) werden auch tabellarisch in Dialogboxen aufgelistet. Die durch die Aufstellungsoptimierung ermittelten neuen Boxen- und Hörpositionen werden mit Hilfe des Programmmoduls CARACAD dargestellt.

Die konventionellen Diagramme werden im Programmmodul **ETS2DView** angezeigt. Dazu startet man das Programmmodul CARACALC und ruft im Menü *Ergebnisse* das Dialogfeld für *Spezialberechnungen* auf. Hier lassen sich Ergebnisse für die Gesamtkonfiguration, für eine Lautsprechergruppe oder auch für einzelne Lautsprecher auswählen. Folgende Diagramme werden angezeigt:

- Frequenzgang
- Ortungsdiagramm
- Raumimpulsantwort, Echogramm
- Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeiten
- Frequenzabhängigkeit des mittleren Schallabsorptionsgrades

Der **Frequenzgang** zeigt den Schalldruckpegel am Hörplatz in Abhängigkeit von der Frequenz (Tonhöhe). Im Bild 12 sehen wir eine solche Frequenzgang-Kurve. Der Gesamtschall berücksichtigt dabei die Summe aller Schallwellen. Die erste Wellenfront enthält die Schallwellen, die sehr früh beim Hörer eintreffen. Der Direktschall gelangt direkt von den Lautsprechern zum Hörer, er enthält Reflexionsanteile. Die reflektierten Schallwellen bilden zusammen das Diffusschallfeld.

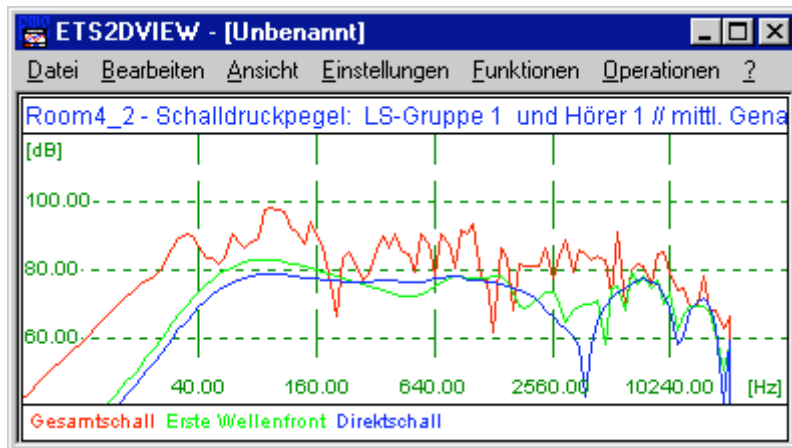


Abbildung 12

Das Gehör ortet eine Schallquelle über die Einfallsrichtung der ersten Wellenfront. Diese beinhaltet alle Schallwellen eines von der Schallquelle ausgesandten Schallimpulses, die innerhalb der ersten 1-2 Millisekunden eintreffen. Abweichungen dieser Einfallsrichtung von der Sollrichtung (Schallquelle → Hörer) werden in CARA durch die Ortungskennzahl beschrieben. Diese kann zwischen den Werten +1 und -1 schwanken. Die Ortungskennzahl +1 kennzeichnet die exakte Übereinstimmung von Einfalls- und Sollrichtung (von vorn); der Wert -1 charakterisiert die entgegengesetzte Einfallsrichtung (von hinten). Das **Ortungsdiagramm** (Abbildung 13) zeigt die Frequenzabhängigkeit der Ortungskennzahl am Hörplatz. Die Kurve für den Gesamtschall zeigt, dass im vorliegenden Beispiel keine feste Ausbreitungsrichtung mehr gegeben ist; der Gesamtschall ist diffus.

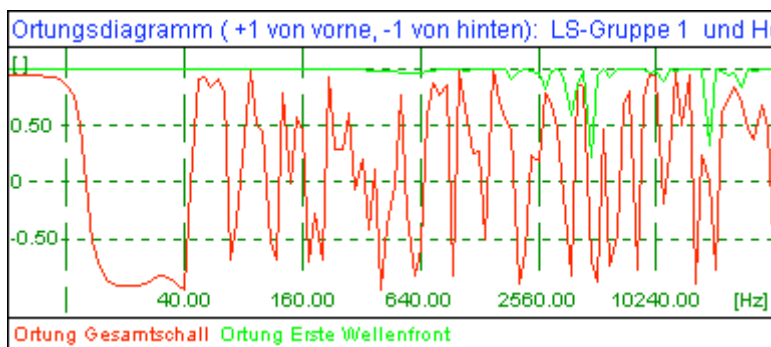


Abbildung 13

Zur Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des Schallfeldes im Raum betrachtet man die sequentielle Abfolge mit der ein von der Lautsprecherbox ausgesandter Dirac-Impuls (Nadelimpuls) sowie dessen Reflexionen eintreffen. Die Darstellung aller eintreffenden Impulse über der Zeit ist die **Raumimpulsantwort**. (Abbildung 14). Durch Quadrieren der Raumimpulsantwort erhält die Schallenergiedichte (Schallenergie pro Volumenelement) als Funktion der Zeit, das entsprechende Diagramm wird **Echogramm** genannt. Integriert man die Energiedichten über das gesamte Zeitintervall, so ergibt sich daraus die totale Energiedichte am Hörplatz. Das Integral wird zum Parameterintegral, wenn mit der Addition der Energiedichten erst ab einem bestimmten Zeitpunkt (t) begonnen wird. Aus dem zeitlichen Abfall dieses Parameterintegrals lässt sich die frühe Nachhallzeit (z.B. T_{10}) bestimmen.

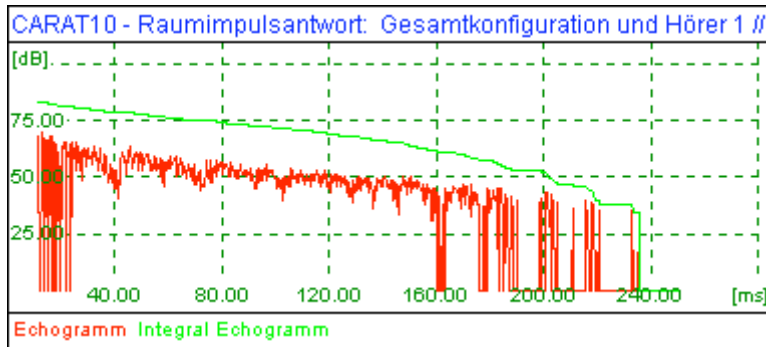


Abbildung 14

Die **Nachhallzeit** ist definiert als die Zeit, innerhalb derer der Schalldruckpegel des eingeschwingenen Schallfeldes nach dem Abschalten der Schallquelle um 60 dB abgefallen ist. In CARA wird als Maß für die Nachhallzeit, die frühe Nachhallzeit (Early Decay Time) T10, genutzt. Sie ist definiert als das Sechsfache des Zeitintervalls für einen 10 dB Abfall.

Die Nachhallzeit lässt sich aus dem in CARACALC berechneten Echogramm ableiten. Zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der aus dem Echogramm bestimmten frühen Nachhallzeit T10 werden in CARACALC zusätzlich zu dem Echogramm über das gesamte Frequenzspektrum noch weitere (ca. 40) Echogramme berechnet, wobei jedes nur ein bestimmtes Frequenzintervall beschreibt.

Die Frequenzabhängigkeit der auf diese Weise bestimmten Nachhallzeiten T10 ist im Diagramm der Abbildung 15 zu sehen. Zum Vergleich sind zusätzlich die klassischen Nachhallzeiten (nach Sabine, Eyring und Kuttruff) eingetragen, die insbesondere für Rechteckräume mit der Realität sehr gut übereinstimmen.

Die Nachhallzeiten CARA-T10 sind erst dann als realitätsnah zu betrachten, wenn der Parameter „Maximale Spiegelungsordnung“ für die rechnerische Simulation entsprechend hoch eingestellt wurde.

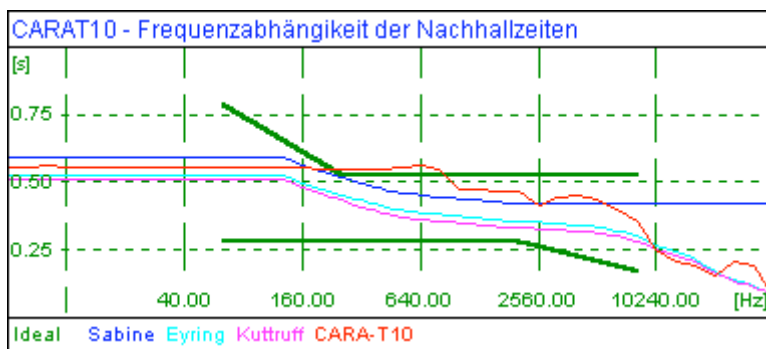


Abbildung 15

Die Nachhallzeit eines Raumes ist im Wesentlichen vom Raumvolumen und den akustischen Eigenschaften (Schallabsorption) der Oberflächen der Raumwände und der Gegenstände im Raum abhängig.

Die Schallabsorption einer Fläche wird durch ihren Schallabsorptionsgrad bestimmt. Der Schallabsorptionsgrad hängt vom Wandmaterial ab und ist i. Allg. frequenzabhängig; üblicherweise steigt er mit der Frequenz an.

Mittelt man die Schallabsorptionsgrade aller Oberflächen unter Berücksichtigung der jeweiligen Flächenanteile, so erhält man den **mittleren Schallabsorptionsgrad** des Raumes. Das Diagramm in Abbildung 16 zeigt die Frequenzabhängigkeit des mittleren Schallabsorptionsgrades.

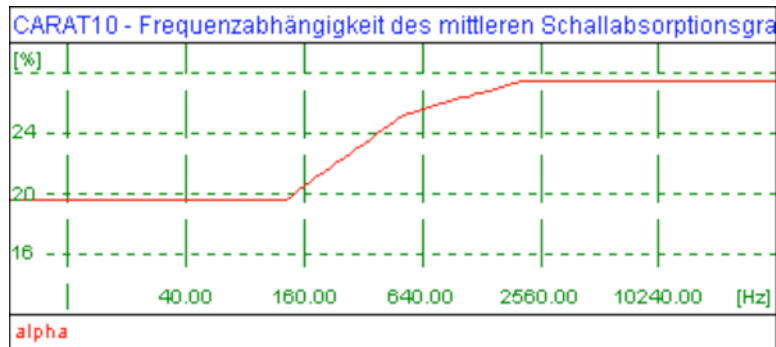


Abbildung 16

Das Programmmodul **ETS2DView** stellt die Werkzeuge zu grafische Darstellung der berechneten Daten und Kennwerte bereit. Es gibt verschiedene Zoomfunktionen, die per Maus eingestellt werden können. Alle Kurven können per Drag & Drop verschoben bzw. bzw. mit der Maus editiert werden. Es gibt lineare und logarithmische Skalen. Neben klassischen Darstellungsformen werden auch Polardiagramme und Ortskurven angeboten. Zum vergleich lassen sich mehrere Kurven in einem Diagramm anzeigen.

Folgende Operationen sind möglich:

- Glättung (gleitender Mittelwert)
- Spline Interpolation
- Ableitung
- Integration
- Regression
- Komplexe mathematische Operationen und Funktionen

Text- und Sounddateien (.wav) können importiert bzw. exportiert werden.

Mit dem Programmmodul **ETS3DView** werden Ergebnisse der Schallfeldberechnungen in 3D-Diagrammen dargestellt. Dazu startet man das Modul CARACALC und ruft im Menü *Ergebnisse* das Dialogfeld für *Schallfeldberechnungen* auf. Vor der Berechnung ist festzulegen, ob sich Ergebnisse auf die Gesamtkonfiguration beziehen, für eine Lautsprechergruppe gelten oder sogar nur einzelne Lautsprecher betreffen. Folgende Diagramme werden angezeigt:

- Frequenzabhängigkeit der Modenlandschaft
- Animation von zeitlichen Änderungen der Modenlandschaft
- Raumimpulsantwort als Animation
- Klangfärbungskarte
- Lokalisations-/Ortungskarte

CARA berechnet im Frequenzintervall zwischen 5 und 40960 Hz **Modenlandschaften** (stehende Wellenmuster) an **118 Frequenzwerten**. Die Modenlandschaften lassen sich 3-dimensional darstellen. Jede Grafik kann in ETS3DView gedreht, skaliert, verschoben, farblich verändert und animiert werden.

Abbildung 17 zeigt die eingeschwungene Schalldruckverteilung in einem nicht-rechteckigen Raum bei 86.4 Hz, angeregt durch fünf Lautsprecherboxen. Die Positionen der Lautsprecherboxen sind durch fünf blaue 'Stecknadeln' (B:1 ... B:5) markiert.

Man erkennt sehr deutlich stark ausgeprägte Überhöhungen (Bergrücken: helle Farbtöne) und Einbrüche (Täler: dunklere Farbtöne). Dieses „Gebirge“ wird als **Modenlandschaft** bezeichnet.

In den Tälern löschen sich die Schallwellen des Direktschalls und des Diffusschalls gegenseitig aus, d.h. dort sind Töne von 86.4 Hz praktisch kaum zu hören. Dagegen ist der Schallpegel auf den Bergrücken sehr hoch.

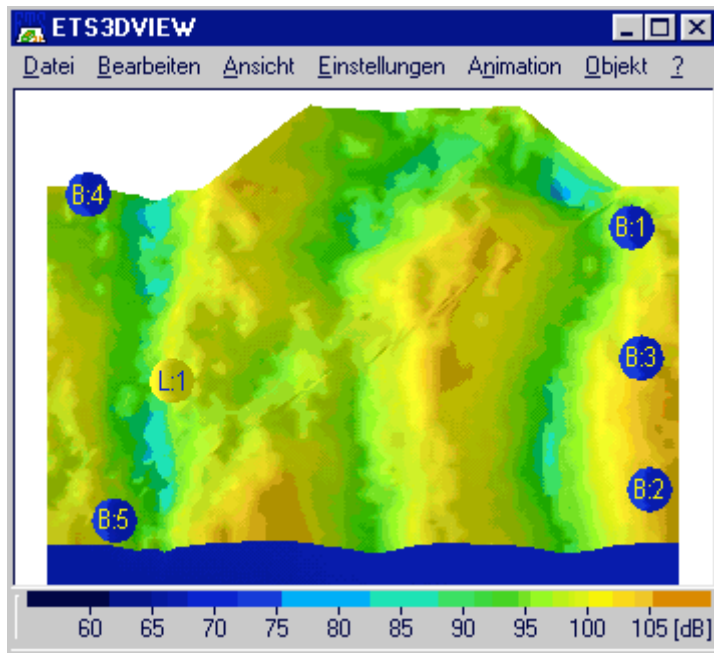


Abbildung 17

Um einen noch besseren optischen Eindruck von der Ausbreitung der Schallwellen zu erhalten, lässt sich bei jeder Frequenz die Darstellung der **Modenlandschaft** auch in eine **Zeitdarstellung** umschalten.

Das hier gewählte Beispiel (Abbildung 18) zeigt den Direktschall der beiden Hauptlautsprecher einer Surroundanlage. Das Interferenzmuster, das sich aus der Überlagerung der beiden von den Lautsprechern ausgesandten Schallwellen ergibt, ist deutlich zu sehen.

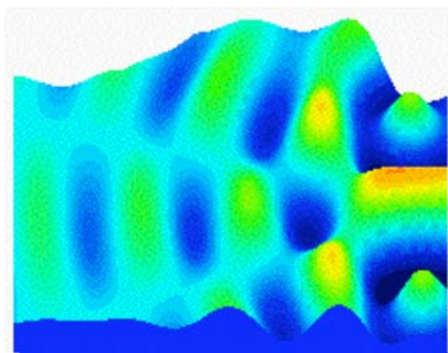


Abbildung 18

Um einen Eindruck über die Schallverteilung im Raum zu erhalten, werden die Schalldruckamplitude des **Gesamtschalls**, die **erste Wellenfront** und das **Echogramm** an ca. 1000 (optional auch ca. 3000) Netzpunkten im Raum über die Frequenz bzw. der Zeit berechnet. Das Netz dieser Raumpunkte wird in CARACAD festgelegt.

Mit diesen Daten lässt sich in 3D-Bildsequenzen z.B. die Orts- und Zeitabhängigkeit der **Schallenergiedichte** (s. a. Echogramm) für das Ein- und Ausschwingen eines von den Lautsprecher ausgesandten Dirac-Impulses darstellen.

Abbildung 19 zeigt die Ortsabhängigkeit von **Klangverfärbungen** in einem Raum, der keine Quaderform aufweist. Die Klangverfärbungen werden aus dem Frequenzspektrum an verschiedenen Positionen des Raumes dadurch abgeleitet, dass Abweichungen von einem idealen, linearen Frequenzspektrum angezeigt werden. Deutliche Einbrüche oder Überhöhungen im Frequenzspektrum zeigen eine starke Klangfärbung (helle, rote Farbtöne) an. Die dunklen Farbtöne (blau bis schwarz) charakterisieren Zonen mit geringer Klangverfärbung.

Die Positionen der Lautsprecherboxen sind durch fünf blaue Stecknadeln (B:1 ... B:5) markiert.

Man erkennt im Beispiel sehr deutlich, dass die Klangverfärbungen an den Raumwänden am stärksten sind, im Bereich direkt vor den Boxen und in der Umgebung der gelben Stecknadel (L:1 für Hörer) ist der Raumeinfluss auf die Klangverfärbung deutlich geringer.

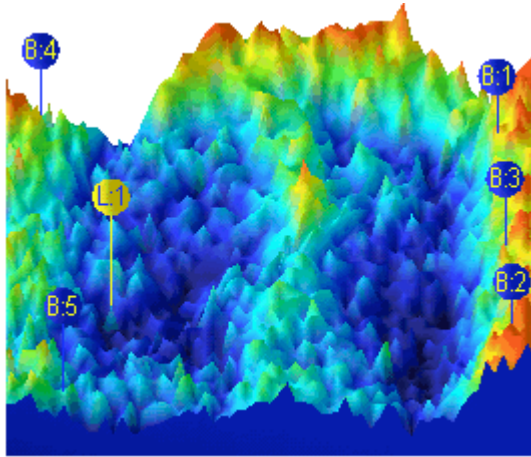


Abbildung 19

In Abbildung 20 ist die räumliche Variation der Qualitätskennzahl **Lokalisation/Ortung** wiedergegeben. Die Ortung oder Lokalisation eines Schallereignisses bestimmt sich aus der Einfallrichtung der ersten (Schall-)Wellenfront. Sie wird im menschlichen Ohr innerhalb 1-2 Millisekunden ermittelt. Dieser Vorgang wird in CARA nachgebildet und ausgewertet. Die Positionen der Lautsprecherboxen sind durch fünf blaue 'Stecknadeln' (B:1 ... B:5) markiert. Man erkennt sehr deutlich, dass die Ortung entlang der Mittelsenkrechten zur Verbindungslinie zwischen den Boxen am besten ist (dunkle Farbtöne, blau bis schwarz).

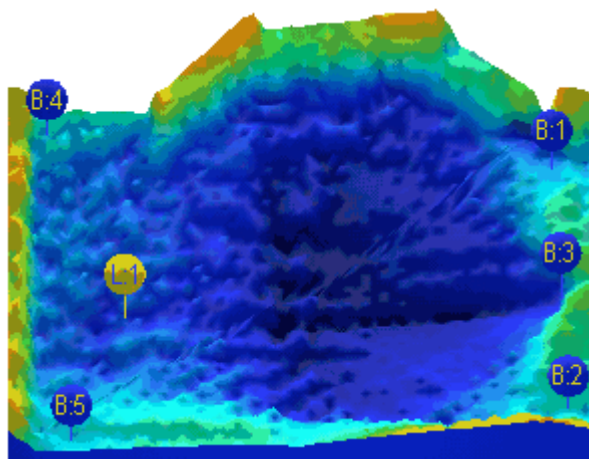


Abbildung 20

Sonderfunktionen der CARA PLUS-Versionen

Bisher existieren drei Versionen des akustischen Raumsimulationsprogramms CARA: CARA 2.0, CARA 2.1 PLUS und CARA 2.2 PLUS. Letztere unterscheiden sich wenig voneinander; der Vergleich beschränkt sich deshalb auf CARA 2.0 und CARA PLUS. CARA 2.0 forderte noch den kompletten Entwurf des Grundrisses. Die PLUS-Versionen werden durch einen „Konstruktionsassistenten“ ergänzt, der diverse Grundrissformen vorschlägt. Neu ist auch der Boxeneditor mit man 1-5 Wege-Boxen, aktive und passive Subwoofer sowie Dipol-Flächenstrahler selbst konstruieren kann. Bei der Arbeit mit CARA

PLUS 2.2 sind sogar komplexe Gehäuseformen mit mehreren Segmenten und Dipol-Hybrid-Lautsprecher (z. B. Elektrostaten mit Subwoofer) generierbar.

Bei der Suche nach idealen Positionen für die Lautsprecherboxen, kann nun auf Symmetrie-Optionen zugegriffen werden, z. B. in der Form, dass Lautsprecher gleiche Abstände zu Front- und Seitenwand haben sollen. Ein weiterer Vorteil der PLUS-Versionen ergibt sich daraus, dass die Rechenzeit für rein quaderförmige Räume ohne Möbel auf bis zu etwa 1/1000 verringert wird.

Die wichtigste Neuerung der PLUS-Versionen besteht jedoch in der Möglichkeit zur Auralisation eines Raumes sowie in der Auswertung des akustischen „Raumklimas“.

Bei der Auralisation simuliert CARA die Musikwiedergabe im zu berechnenden Raum. Grundlage hierfür ist die Berechnung der hochauflösenden Impulsantwort. Mit den Resultaten lassen sich unterschiedliche Aufstellungsvarianten der Lautsprecher und verschiedene Positionen des Hörers klanglich über einen Kopfhörer beurteilen, vorausgesetzt wird eine Soundkarte.

Die CARA PLUS-Versionen bieten als weitere Funktion die Auswertung des „Akustischen Raumklimas“ an. Auf der Grundlage der Raumkonstruktion, in der das Raum-Volumen und die Absorbermaterialien festgelegt wurden, berechnet CARA das Nachhallzeiten-Spektrum (nach den Formeln von Sabine, Eyring und Kuttruff). Damit kann die akustische Qualität des Raumes beurteilt werden. In Abbildung 21 umrahmen zwei dunkle Linien den ‚idealen‘ Bereich in dem die Nachhallzeiten liegen sollten. Sind die frequenzabhängigen Nachhallzeiten zu groß, d.h. übersteigen sie die obere Linie, wirkt der Raum unangenehm hallig. Sind die Nachhallzeiten sehr klein, liegen also unter der unteren dunklen Kennlinie, klingt der Raum zu trocken. Werte der Nachhallzeiten zwischen beiden Linien versprechen eine angenehme Akustik. Bei Nachhallzeitenspektren außerhalb des idealen Bereiches, schlägt CARA Verbesserung vor. Damit lassen sich virtuelle Veränderungen der Einrichtung, von Wandbelägen, Teppichen usw. prüfen.

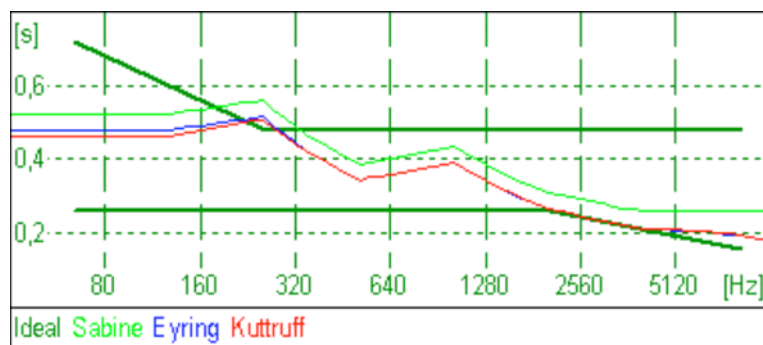


Abbildung 21

Der Vorteil der Funktion „Auswertung des akustischen Raumklimas“ liegt darin, dass sie direkt nach der Raumkonstruktion ausgeführt werden kann und wenig Rechenzeit benötigt. Man findet die Funktion direkt im Programmmodul CARACAD, dort wo auch die Raumkonstruktion stattfindet. So ist es möglich einen Raum bereits akustisch zu optimieren, bevor die zeitintensiven Schallfeldberechnungen durchgeführt werden.