



UNIVERSITÀ DI BRESCIA - FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA**  
VIA BRANZE, 38  
Codice Fiscale 98007650173

25123 BRESCIA  
Partita IVA 01773710171



## **KONSTRUKTION UND ANALYSE EINER OMNIDIREKTIONALEN SCHALLQUELLE MIT VARIABLER ABSTRAHLCHARAKTERISTIK**



Hersteller der Schallquelle

OUTLINE s.n.c.  
Forschungs- und Entwicklungsabteilung  
G.Noselli, F.Simeoni, F.Vezzoli

Studie in Zusammenarbeit mit:

Universität Brescia  
Lehrstuhl für "Mechanical Engineering"  
G.P. Beretta, G. Pedersini, E. Piana

Übersetzt aus dem Englischen von:

Schalltechnik Süd & Nord GmbH  
Nürnberger Str. 262  
93059 Regenbsurg  
0941/9455585

© Copyright der deutschen Übersetzung: Schalltechnik SÜD & NORD GmbH, ([www.akustiktest.de](http://www.akustiktest.de))  
Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung gestattet.

# INHALT

<b>Realisierung einer nahezu idealen isotropen Schallquelle .....</b>	<b>3</b>
<b>Konstruktive Überlegungen .....</b>	<b>6</b>
<b>Lautsprecherauswahl .....</b>	<b>8</b>
<b>Innovative Systemeigenschaften .....</b>	<b>12</b>
<b>Praktische Umsetzung .....</b>	<b>14</b>
<b>Geometrische Form .....</b>	<b>14</b>
<b>Tragwerk (Stütz und Stabilisierungselemente) .....</b>	<b>16</b>
<b>Anschlüsse .....</b>	<b>19</b>
<b>Lautsprechermontage.....</b>	<b>20</b>
<b>Montierte Gesamtstruktur .....</b>	<b>22</b>
<b>Powerhandling-Test gemäß AES-Standard .....</b>	<b>24</b>
<b>Elektrische und akustische Parameter des Gesamtsystems.....</b>	<b>24</b>
<b>Messtechnische Versuche.....</b>	<b>25</b>
<b>Prüfung der Richtcharakteristik.....</b>	<b>28</b>
<b>Fazit .....</b>	<b>34</b>

## ***Realisierung einer nahezu idealen isotropen Schallquelle.***

Für die Anwendung einer isotropen Schallquelle gibt es zwei Hauptanwendungsbereiche:

1. Messung der Nachhallzeit von Räumen und deren akustische Charakterisierung
2. Messung des Schalldämmmaßes zwischen versch. Räumen im Bereich der Bauakustik

Während der Entwicklungsphase unserer Schallquelle war es deshalb nötig, die hierfür geltenden nationalen und internationalen Standards zu berücksichtigen, die im wesentlichen in UNI EN ISO 140-X und ISO 3382 zusammengefasst werden.

### **Geltende nationale und internationale Standards**

Erster Ausgangspunkt für die Realisierung der Schallquelle war die geltende Norm zur Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen UNI ISO 140-1.

In manchen Anwendungsfällen ist es möglich, den Raum mit einem Pistolenschuß anzuregen. Obwohl diese Methode häufig sehr praktisch und preiswert ist, hat sie verschiedene Nachteile:

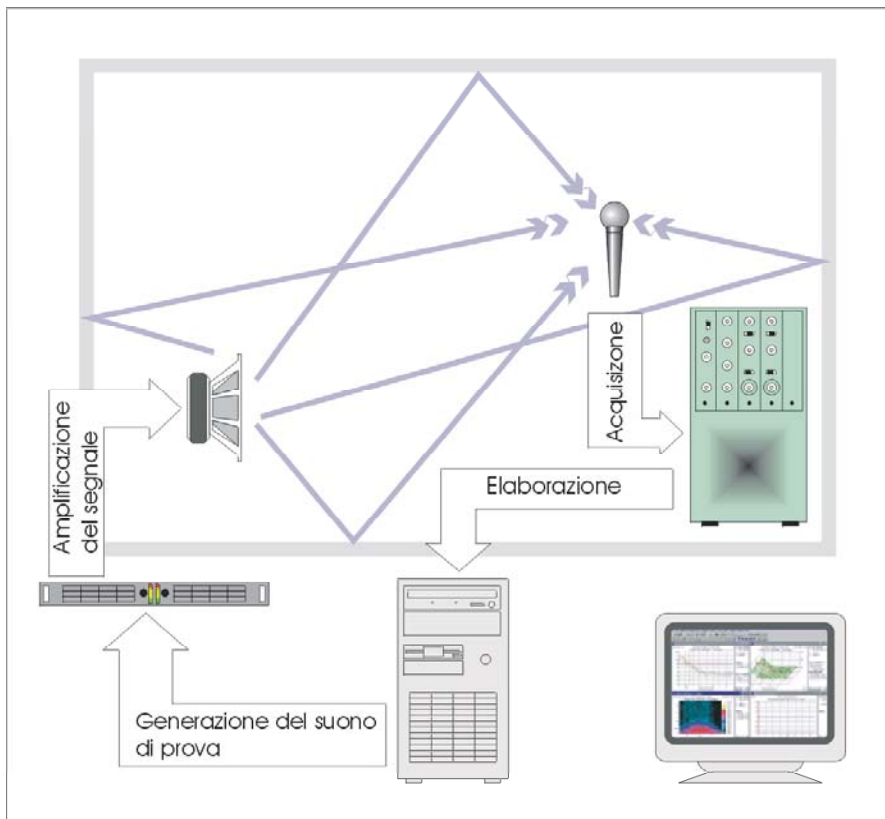
- ❑ Ein Pistolenschuß liefert häufig nicht genügend Energie im tiefen Frequenzbereich. Für die Messung der RT60 wird z.B. ein Schallsignal benötigt das 50 dB über dem Grundgeräuschpegel liegt (30dB+20dB mindest-Störabstand)
- ❑ Das Testsignal kann nicht mit hinreichender Genauigkeit wiederholt werden. Dies bedeutet aber auch, daß eine einzelne Nachhallzeit-Messung nicht ausreichend genau wiederholbar ist. Um für einen bestimmten Meßpunkt im Raum reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist also bereits für diesen einen Punkt eine größere Anzahl Mittelungen notwendig.
- ❑ Es ist grundsätzlich nicht möglich ein stationäres Schallfeld im Raum zu erreichen, man mißt stets nur die Antwort des Raumes auf einen Impuls.
- ❑ Das Meßsystem wird möglicherweise übersteuert. Dies wird durch den hohen Crestfaktor eines Pistolknalls noch begünstigt, der seitens des Meßsystems eine erhöhte Dynamikreserve erzwingt.

Bild 1 zeigt eine der möglichen Anordnung zur Messung der Nachhallzeit.

Um die Nachhallzeit eines beliebigen Raumes zu messen, muß die Quelle folgende Bedingungen erfüllen:

- (1) Ausreichend hohe Schallenergie (akustische Sättigung des Raumes).  
Ein ausreichend hoher Pegel aller Punkte des Raumes muß gewährleistet sein.  
Für eine einwandfreie Messung der Nachhallzeit (RT60) muß der Pegel für jeden Punkt des Raumes mindestens 50 dB über dem maximal auftretenden Ruhegeräusch-Pegel liegen. Da es nur in sehr kleinen Räumen möglich wäre 80dB Pegelerhöhung zu erreichen (60dB Meßsignal zzgl 20dB Störabstand), wird die Nachhallzeit RT60 üblicherweise durch Verdoppelung der tatsächlich gemessenen und für einen Pegelabfall von 30dB benötigten Zeit ( $T_{30}$ ) berechnet.
- (2) Erzeugung eines diffusen Schallfeldes.

Der Direktschall zwischen Mikrofon und Schallquelle darf, verglichen mit dem indirekten Schall durch Raumreflexionen, nicht dominieren. Um dies zu garantieren und den Raum möglichst in seiner Gesamtheit zu erfassen, sollte die Schallquelle möglichst keine bevorzugten Abstrahlrichtungen aufweisen (omnidirektional).



**Bild 1:**  
Beispiel-Meßkette zur  
Messung raumakustischer  
Parameter

Ob eine Quelle omnidirektional ist, und die Reflexionen im Vergleich zum Direktschall dominieren kann sehr leicht "in situ" geprüft werden: Variiert man die Mikrofonposition bei breitbandiger Anregung, so sollten für verschiedene Punkte ähnliche Messwerte auftreten. Dies kann erst dann der Fall sein, wenn sich das Mikrofon außerhalb einer Zone um die Schallquelle befindet, die nicht mehr durch Direktschall dominiert wird (Bei einem Kugelstrahler fällt der Schallpegel um 6dB bei Verdoppelung des Abstandes).

Für derartige Messungen setzt man in der Regel nicht wie hier abgebildet einen einzel-Lautsprecher, sondern einen Kugelstrahler ein, der aus gleichphasig betriebenen Lautsprechern, die sich ein gemeinsames Gehäuse teilen, zusammengesetzt wird. Auch wenn für das Gehäuse viele Arten von Polyedern (z.B. Ikosaeder) denkbar wären, so ist die üblichste Form ein Dodekaeder, da hier auf Grund der hohen Anzahl von strahlenden Flächen in sehr guter Näherung omnidirektionales Abstrahlverhalten erreicht wird.

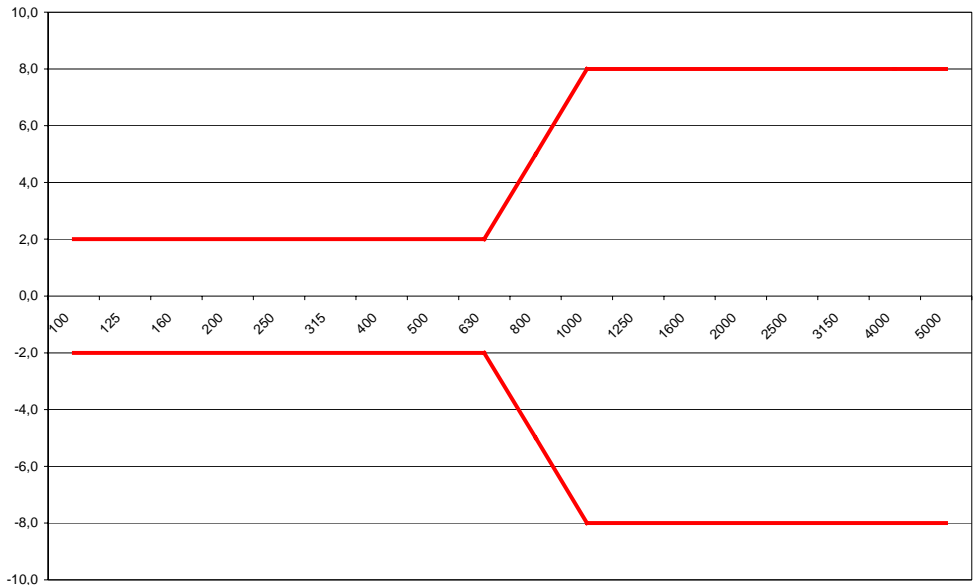
Um die Richtcharakteristik einer Quelle zu überprüfen werden folgende Standard-Meßbedingungen empfohlen:

- Freifeld-Bedingungen während der Messung
- Messung des Schalldruckpegels im Abstand von 1.5m.;
- Testsignal: Rauschen (weiß oder rosa);
- Analyse: Terz-(ISO 140) oder Oktav-Auflösung (ISO 3382)

Die Direktivitäts-Indizes werden durch Bildung der Differenz zwischen mittlerem Schallleistungspegel für eine komplette 360 Grad-Drehung  $L_{360}$  und den nacheinander durch Drehung in Schritten um jeweils 30 Grad ( $L_{30,i}$ ) aufgenommenen, gemittelten Einzelwerten bestimmt.

Die Direktivitäts-Indizes ergeben sich aus:  $DI_i = L_{360} - L_{30,i}$

Bezogen auf die ISO 140 kann die Abstrahlcharakteristik als omnidirektional angesehen werden, wenn die DI-Werte sich im Bereich von 100 Hz bis 360 Hz innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 2$  dB bewegen. Im Bereich zwischen 630Hz to 1000Hz wird dieser Toleranzbereich linear von  $\pm 2$  dB bis  $\pm 8$  dB aufgeweitet. Zwischen 1000Hz und 5000 Hz, ist eine Toleranz von  $\pm 8$  dB zu erfüllen. Bild 2 zeigt diese Toleranzkurve.

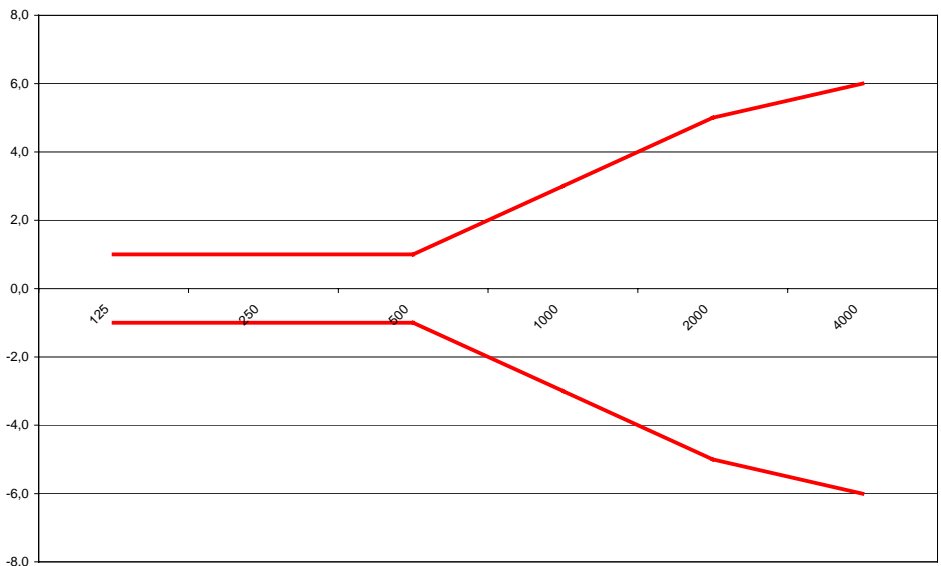


**Bild 2: Toleranzkurve für omnidirektionale Schallquellen gemäß ISO 140**

Im Vergleich zur ISO 140 sind in der ISO 3382 weitaus engere Toleranzen vorgesehen.

Die Abstrahlcharakteristik als omnidirektional angesehen werden, wenn die DI-Werte sich im Bereich von 125 Hz bis 500 Hz innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 1$  dB bewegen. Im Bereich zwischen 500 Hz to 2000 Hz wird dieser Toleranzbereich linear von  $\pm 1$  dB bis  $\pm 5$  dB aufgeweitet. Zwischen 2000 Hz und 4000 Hz erfolgt nochmals eine lineare Aufweitung des Toleranzbereiches von  $\pm 5$  dB auf  $\pm 6$  dB. Bild 2 zeigt diese Toleranzkurve.

Für polyedrische Quellen erlaubt die Norm eine Überprüfung in nur einer Meßebeene\*.



**Bild 3: Toleranzkurve für omnidirektionale Schallquellen gemäß ISO 3382 (verschärfte Anforderungen im Vergleich zu ISO 140)**

\*Beide Normen stehen für Quellen, die aus einem einzigen Lautsprecher bestehen und zwingen so mehrere Messebenen vor. Dies soll sicherstellen, daß nicht eine Symmetrieebene zufällig gewählt wurde.

(Anmerkung STSN: ein Einzel-Lautsprecher mit einer kugelförmigen Abstrahlcharakteristik ist wohl ein eher theoretischer Fall. Auch wenn es in der Vergangenheit Experimente mit Punktquellen, die mittels eines langen Rohres an ein Volumen angekoppelt wurden, in dem ein Einzellautsprecher seinen Dienst tat. Am Ausgang des Rohres ergab sich in erster Näherung eine Punktquelle.)

## **Konstruktive Überlegungen**

Wünschenswerte Ziele für den Bau einer ideal auf die Bedürfnisse der Anwender zugeschnittenen Schallquelle sind:

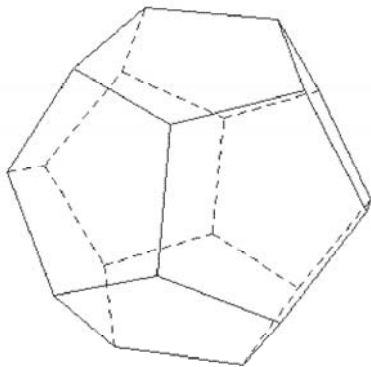
- Hohe Leistung
- Kompakte Abmessungen;
- omnidirektionale Abstrahlung.

Da diese Eigenschaften zum Teil nicht unabhängig voneinander optimiert werden können, muß vielmehr ein wohlüberlegter Kompromiß gefunden werden, der zu einer bestmöglichen Lösung für den Anwender führt.

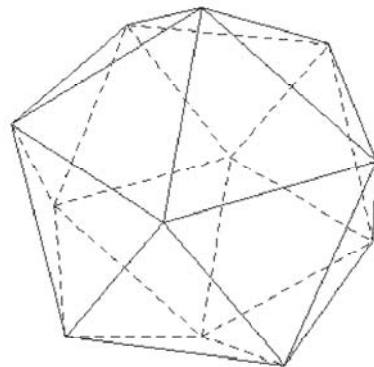
## **Die Form der Schallquelle**

Die Auswahl der idealen Form des Gehäuses, in dem die Lautsprecher montiert wurden, basierte auf theoretischen und praktischen Überlegungen, die nachfolgend durch akustische Simulation bestätigt wurden. Ausgehend vom Grundgedanken eines symmetrischen Abstrahlverhaltens wurden regelmäßige Polyeder in Betracht gezogen. Die regelmäßigen Körper sind Tetraeder (mit 4 dreieckigen Flächen), Würfel oder Hexaeder, Octaeder (acht dreieckige Flächen), Dodekaeder (zwölf pentagonale Seiten) und Isocsaeder (zwanzig dreieckige Seiten). Außer den genannten fünf Polyedern existieren keine regelmäßigen Formen, die man in der Praxis aus Einzelflächen zusammensetzen könnte. Die offensichtlich am optimal symmetrische Form wäre natürlich eine Kugel, die man als Polyeder mit unendlicher Anzahl von Flächen auffassen könnte. Auch, wenn man als Gehäuseform eine Kugel wählt, können hier nur 4, 6, 8, 12 and 20 etc.. Lautsprecher untergebracht werden.

Zunächst wurden die zwei Körper mit der größten Anzahl von Flächen für die weiteren Überlegungen herangezogen: der Dodekaeder (Bild 4) und der Ikosaeder (Bild 5).



**Bild 4: Dodekaeder (12 Teilflächen)**



**Bild 5: Ikosaeder (20 Teilflächen)**

Der Dodekaeder erscheint für eine Lautsprechermontage besser geeignet, da die Abmessungen des Pentagons im Vergleich zum Dreieck (Ikosaeder) besser zur runden Form eines Lautsprechers passen. Im Umkehrschluß ergibt sich bei gegebener Größe eines Lautsprechers hier kleinere Teilflächen und einen kompakteres Gesamtsystem (Bild 6).



**Bild 6: Vergleich Pentagon und Dreieckfläche bei gegebenem Lautsprecherdurchmesser.**

Im ersten Fall sind 86% einer einzelnen Seite vom Lautsprecher ausgefüllt, beim Ikosaeder reduziert sich dieser Prozentsatz auf 60%. Ein Dodekaeder verspricht also den Platz besser zu nutzen als ein Ikosaeder. Andererseits erlaubt ein Ikosaeder die Unterbringung von 20 an Stelle

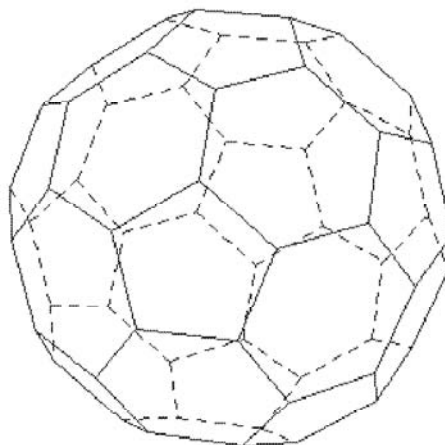
von 12 Lautsprechern. Bei gleichen Lautsprechern könnte man im Ikosaeder also 60% mehr Leistung als im Dodekaeder umsetzen, was sich in einer Erhöhung des Schalldruckpegels um 2,2 dB niederschlagen würde. Der Vorteil der höheren Leistung würde aber in der Praxis mit dem Nachteil größerer Abmessungen einhergehen. Würde man die beiden Polyeder in eine Kugel einpassen, so hätte diese Lösung einen 60% größeren Durchmesser und etwa 70% höheres Gewicht.

Ein anderer Aspekt, der von der Größe abhängt, ist das Phänomen "destruktive Überlagerung." Dieses Problem spielt bei tiefen Frequenzen eine geringere Rolle, solange die Teilschallquellen im Vergleich zur Wellenlänge nahezu im selben Punkt angenommen werden können (Wellenlänge ist sehr groß im Vergleich zum Abstand der Teilschallquellen). Deshalb ist für tiefe Frequenzen das Gesamtschallfeld, das sich aus der Überlagerung der Einzelschallquellen ergibt, tatsächlich nahezu kugelförmig. Erhöht man die Frequenz so wird zum einen der Einzelschallquellen an sich eine stärkere Richtwirkung entfalten, und zum anderen wird der Abstand zwischen den einzelnen Teilschallquellen/ Lautsprechern immer weniger vernachlässigbar.

Angenommen man befindet sich im Abstand von 1,5m vor einer Seite eines mit 133mm-Lautsprechern bestückten Dodekaeders. Wegen der 5 an dieser Fläche angrenzenden Lautsprechern ist auf Grund deren Abstand mit einem Einsetzen dieses Effektes oberhalb etwa 2800 Hz zu rechnen. Bei dieser Frequenz ist das Schallfeld der Lautsprecher bereits sehr gerichtet und am Punkt, an dem man sich befindet, überlagern sich die Teilschallfelder der einzelnen Lautsprecher in geringerem Maße.

Steht man in dem selben Abstand von 1,5m vor einer Seite eines mit den gleichen 133mm-Lautsprechern bestückten Ikosaeder, dann verursachen die Lautsprecher der drei angrenzenden direkt benachbarten Flächen (teilen sich jeweils eine Kante mit der Fläche auf die man schaut) erst ab einer Frequenz von etwa 3600 Hz Probleme. Darüber hinaus gibt es aber noch 6 Teilflächen, die sich mit der betrachteten Fläche nur einen Eckpunkt teilen. Da der Abstand, der dort montierten Lautsprecher zu der betrachteten Fläche größer ist, kann man für diese Flächen der Effekt bereits ab 1400 Hz beobachten.

Abgesehen von diesen beiden Formen wurde auch ein abgeschnittener Ikosaeder in Betracht gezogen (Siehe Bild 7). Diesen Körper erhält man durch abschneiden der Pyramiden mit pentagonaler Grundfläche.



**Bild 7: abgeschnittener Ikosaeder**

Das hieraus resultierende halb-regelmäßige Gebilde hat zwanzig hexagonale und zwölf pentagonale Seiten (ähnlich einem Fußball). Ein Vorteil dieser Form ist, daß nicht weniger als 32 Lautsprecher untergebracht werden können, und die Form eine sehr gute Einpassung der runden Lautsprecher in Hexagon und Pentagon erlaubt. Allerdings würde es eine optimale Nutzung dieser Form erfordern zwei Lautsprechertypen mit unterschiedlichen Durchmessern zu verwenden, was die Vorhersage des Systemverhaltens erschweren würde. Außerdem führt diese Form zwangsläufig auch zu höherem Gewicht und Durchmesser.

## **LAUTSPRECHER**

aus folgenden Gründen wurden elektrodynamische Lautsprecher (moving coil) ausgewählt:

**1) Großes Typenspektrum verfügbar:** Diese Wandler werden in den meisten Anwendungsfällen zur Schallreproduktion verwendet (HiFi-Systeme, Kinos, Computer, Radio, etc).

**2) Standard Kenngrößen:** Für diese Art von Lautsprechern werden auf Grund ihrer großen Verbreitung oft Standard-Kenngrößen wie *Thiele-Small Parameter*, Frequenzgang, Abstrahlcharakteristik, Polardiagramme etc.. meist bereits vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Das Verhalten des Lautsprechers an sich kann deshalb weitgehend vorhergesagt werden, ohne daß man diesen erst kaufen und vermessen muß.

**3) Hohe Schalleistung (bezogen auf das Gewicht):** Dynamische Lautsprecher bieten ein gutes Verhältnis von Abgegebener Leistung im Vergleich zum Gewicht. Abmessungen und Gewicht können durch Verwendung von Neodymmagneten an Stelle von gesintertem Ferrit weiter verringert werden (bis zu 50%). Insbesondere die Gewichtsreduktion ist in unserem Anwendungsfall ein wesentlicher Vorteil, da hier nicht ein, sondern 12 Lautsprecher Anwendung finden.

**4) Breitbandiger Frequenzbereich:** Es steht ein breites Spektrum von Lautsprechern für verschiedenste Frequenzbereiche zur Verfügung, was die Optimierung für unseren Anwendungsfall erlaubt (Mitteltöner, deren Frequenzgang sich bis weit zu tiefen Frequenzen erstreckt, erscheinen hier am geeignetesten).

**5) Kompakte Abmessungen:** Bei gleicher elektrischer Leistung variieren die Lautsprechergrößen, abhängig vom Frequenzbereich für den sie dimensioniert sind. Ein guter Tieftöner muß eine größere Menge Luft bewegen als ein Hochtöner. Hierzu benötigt er einen wesentlich größeren Membrandurchmesser und einen größeren Hub. Dafür ist er aber sehr schlecht geeignet höhere Frequenzen ab einer gewissen Grenzfrequenz wiederzugeben. Eine große Membran neigt für hohe Frequenzen auch zu Eigenresonanzen, die hier eine korrekte Reproduktion des Audiosignals gefährden. Die Wiedergabe höherer Frequenzen erfordert eine leichte, starre Membran mit kurzer Auslenkung. Für den Frequenzbereich, den wir mit unserer Quelle abdecken wollen, erscheinen 5-Zoll Lautsprecher (ca 130mm) am geeignetesten.

Fasst man diese Punkte zusammen, dann ergeben sich für unsere Lautsprecher folgende Anforderungen:

- Ausreichend breitbandiger Frequenzgang zur Erfüllung der Anforderungen, die sich aus den Normen ergeben (125÷6300Hz);
- 5-Zoll Lautsprecher zur Reduzierung der Abmessungen des Gesamtsystems;
- Spulendurchmesser von 32mm. Ferrofluid-Lautsprecher (magnetisches Öl im Luftspalt), um hohe Dauerbelastbarkeit bei 150 Watt zu gewährleisten (Gemäß AES standard im Frequenzbereich von 125Hz to 1250Hz);
- Neodym-Magnet zur Gewichtsreduktion

Der für den "OUTLINE-Dodekaeder" gewählte Lautsprecher ist ein kundenspezifisch angefertigter "extended range"-Lautsprecher mit optimierten Eigenschaften und hervorragender Leistung:

Der Ferrofluid-Lautsprecher OUTLINE S5WM16NPP (Bild 8).

Bei Betrieb wie im AES-Standard für "Power handling tests" vorgesehen, gewährleistet das Öl eine bessere Kühlung und sorgt dafür, daß der Lautsprecher mit nahezu der doppelten Leistung im Vergleich zu einem normalen Lautsprecher mit Luftspalt betrieben werden kann.

Die bessere Kontrolle des Temperaturzustandes bietet zusätzlich eine weitgehende Eliminierung des Leistungsabfalls (Fachbegriff: Power Compression), die durch den schnellen Anstieg der Spulentemperatur verursacht wird, wenn der Lautsprecher mit hoher Leistung getrieben wird.

Die verwendeten Lautsprecher weisen folgende technische Daten auf:

### Allgemeine Daten

Frequenzbereich	90-12500 Hz
Nennimpedanz	16 $\Omega$
IEC power	75 W <sub>RMS</sub>
Program power	150 W <sub>RMS</sub>
Maximum power	300 W <sub>Peak</sub>
Schalldruck (1W - 1m)	92.5 dB
Magnetische Feldstärke	1.1 T
Spulendurchmesser	32 mm

### Thiele-Small parameter

R <sub>E</sub>	10.03 $\Omega$
F <sub>S</sub>	91.75 Hz
Z <sub>MAX</sub>	24.99 $\Omega$
Q <sub>MS</sub>	1.20 -
Q <sub>ES</sub>	0.48 -
Q <sub>TS</sub>	0.34 -
V <sub>AS</sub>	4.72 dm <sup>3</sup>
BL	8.29 T/m

### Mechanische Daten

Konus-Material	Behandelte, wasserfeste Papiermembran
Sicke	Gummi
Magnetmaterial	Doppel-Neodym
Magnetgewicht	43+43 gr.
Gesamtgewicht	800 gr.
Maximaler Durchmesser	133 mm.
Maximale Einbautiefe	75 mm.



Bild 8: Outline S5WM16NPP Ferrofluid-Lautsprecher

Impedanz- und Phasenverlauf eines einzelnen Outline S5WM16NPP Lautsprechers.

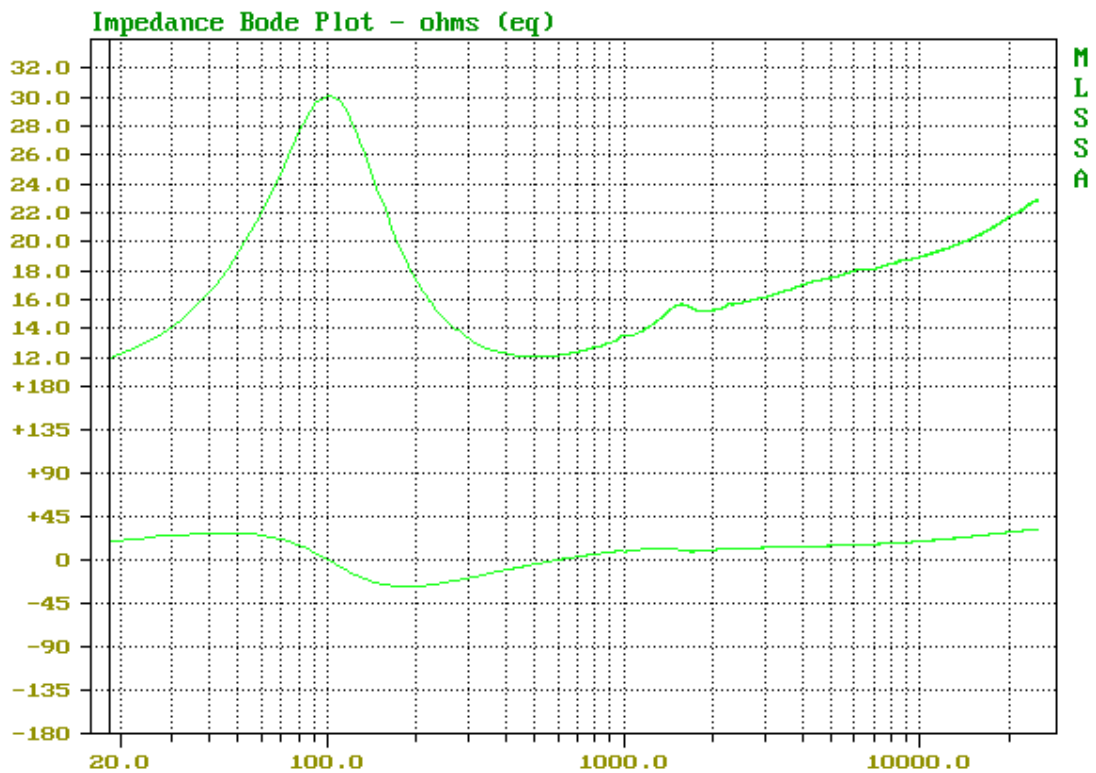


Bild 9: Impedanzverlauf eines einzelnen Outline S5WM16NPP-Ferrofluid-Lautsprechers

Die Bilder 10 und 11 zeigen den Frequenzgang eines einzelnen Outline S5WM16NPP Lautsprechers (1W – 1m, einmal schmalbandig, und einmal in Terz-Auflösung gemessen).

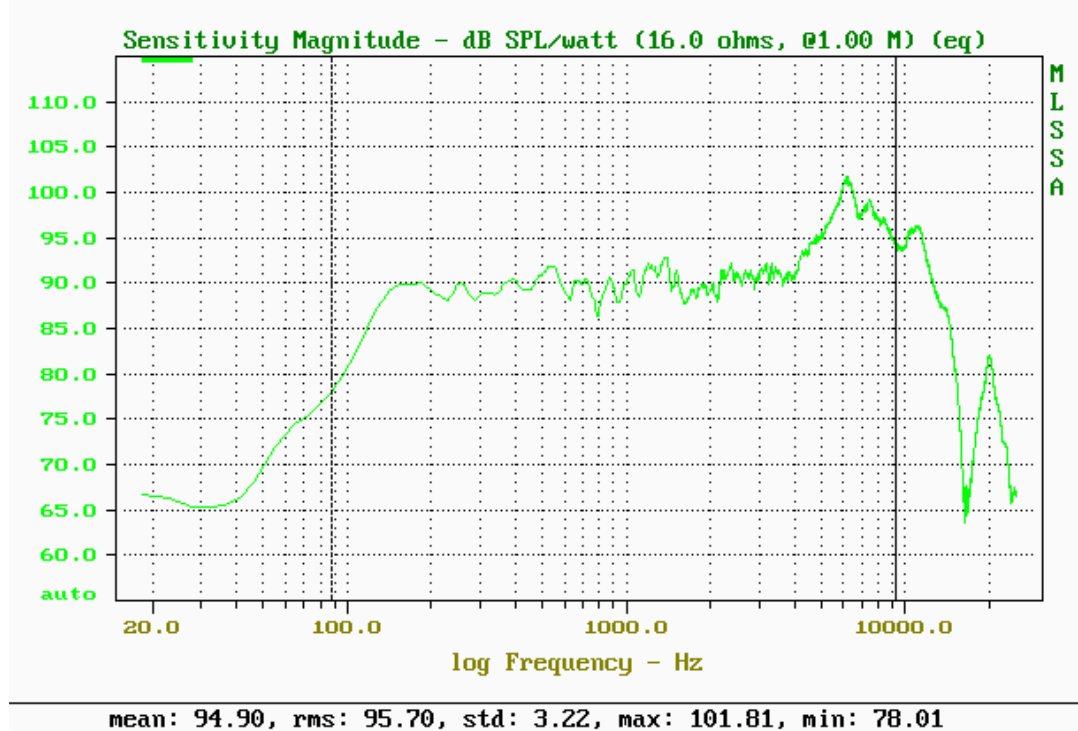
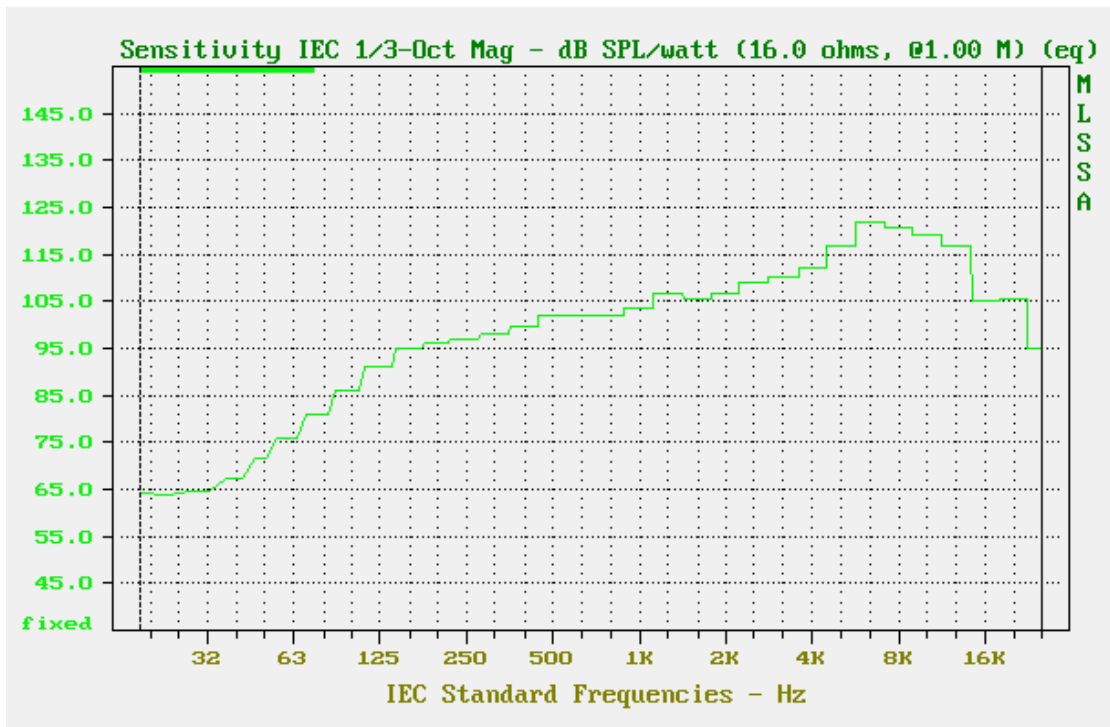


Bild 10: Frequenzgang in Haupt-Abstrahlrichtung eines einzelnen Outline S5WM16NPP Lautsprechers -1W/1m (Schallwandmontage, schmalbandig gemessen)



**Bild 11: : Frequenzgang in Haupt-Abstrahlrichtung eines einzelnen Outline S5WM16NPP Lautsprechers - 1W/1m (Schallwandmontage, mit Terzanalyse gemessen)**

#### GEHÄUSEMATERIAL

Bewegt sich die Lautsprechermembran aufgrund des Stromes durch die Spule, so wird die Luft auf der einen Seite des Konus komprimiert, während auf der Gegenseite ein Unterdruck entsteht.

Diese zwei Wellen tendieren dazu sich auszulöschen, da sie gegenphasig sind und praktisch den selben räumlichen Ursprung haben. Der Effekt ist bei tiefen Frequenzen stärker ausgeprägt, da hier z.B. die Wellenlänge im Vergleich zu den Abmessungen der Membran recht groß ist. Um zu verhindern, daß die rückseitig abgestrahlte Welle sich mit der vorderseitig abgestrahlten Welle überlagert, wird eine isolierende Wandfläche um den Lautsprecher herum gelegt. Dies ist auch der Grund warum die Lautsprecher in jeder Art von Audio-Wiedergabesystem stets in einem Holz- oder Plastikgehäuse montiert werden. Mancher wird meinen das Gehäuse hätte die Funktion eines Resonanzkörpers wie bei einer Gitarre oder einer Geige. Tatsächlich aber liegt die wesentliche Aufgabe des Gehäuses darin, die rückseitige Schallwelle auszuschalten. Diese Abschirmung muß folgende Charakteristik haben:

- 1) Gute Schalldämmeigenschaften. Es wäre kontraproduktiv ,wenn die Abschirmung Schall passieren ließe oder zu Vibrationen neigen würde.
- 2) Das Material muß eine hohe Steifigkeit besitzen. Wäre dies nicht der Fall, würde das Gehäuse eine Schallwelle, die in Phase mit der inneren Schallwelle ist, abstrahlen (=gegenphasig zur äußeren Schallwelle) .
- 3) Das Material sollte keine Resonanzerscheinungen zulassen. In der Praxis ist dies ein amorphes Material, das so wenig wie möglich schwingfähig ist. MDF-Platten oder Multiplexplatten sind hierzu auf Grund ihrer amorphen Struktur definitiv besser geeignet als Massivholz. Speziell im Bezug auf preiswerte Massenherstellung könnten auch spezielle Kunststoffe in Erwägung gezogen werden. In unser Fall wurde mehrfachverleimtes Spezial-Schichtholz gewählt ,ein Material, das mechanische Robustheit mit erträglichem Gewicht und Kosten verbindet und leicht maschinell verarbeitet werden kann.

Das Material soll, wie gesagt, keine Resonanzerscheinungen zulassen. Man kann kann aber das gesamte Gehäuse durch anbringen passender Bohrungen gezielt als Helmholz-Resonator nutzen. Hiermit lassen sich die Gesamtsystems-Eigenschaften deutlich verbessern; - bei Dodekaedern eine innovative Neuerung, deren Vorteile die kein anderer Hersteller bisher genutzt hat. (mehr dazu ab Seite 23)

## **INNOVATIVE SYSTEMEIGENSCHAFTEN**

Da auf dem Markt bereits vergleichbare Systeme verfügbar sind, war das Ziel dieser Entwicklung diese nicht einfach zu kopieren und die Erfüllung der Bauakustik-Normen mit besseren technischen Daten zu gewährleisten. Es wurde vielmehr versucht einige neue, innovative und weiterführende Ansätze zu finden.

### **Extrem hohe Schall-Leistung**

Wir hatten die Gelegenheit einige auf dem Markt befindliche Dodekaeder zu testen. Dabei fiel uns sehr schnell auf, daß einige recht schwach ausgelegt waren und in vielen Fällen nicht ausreichten, um größere Räume, deren Wände nicht besonders reflektiv waren, ausreichend stark anzuregen. Dies führte zu teilweise recht unpräzisen Nachhallzeit-Messungen: Da es in den meisten Fällen nicht bewerkstelligt werden kann eine breitbandige Anregung von "60dB über dem Grundgeräuschpegel" zu gewährleisten, wird die Nachhallzeit RT60 üblicherweise durch Extrapolation der Nachhallzeitkurve (Pegelabfall über der Zeit) ermittelt.

Um eine optimale Qualität der Raumakustikmessungen auch unter schwierigsten Meßbedingungen zu erreichen, wurde entschieden, sich auf die Entwicklung einer Quelle zu konzentrieren, die in der Lage ist extrem hohe Leistungen von über 900 W<sub>RMS</sub> zu verarbeiten. Gleichzeitig sollte auch ein besonders effektiver Speziallautsprecher entwickelt werden. Trotz der Abmessungen der Membran wurde dieser mit einem Neodym-Magnetkreis ausgestattet. Die mechanischen Parameter dieser Lautsprechermembran gestatten um 4-5dB höhere Pegelwerte als die der durchschnittlich auf dem Markt befindlichen Exemplare mit gleichen Abmessungen.

### **Variable Abstrahlcharakteristik**

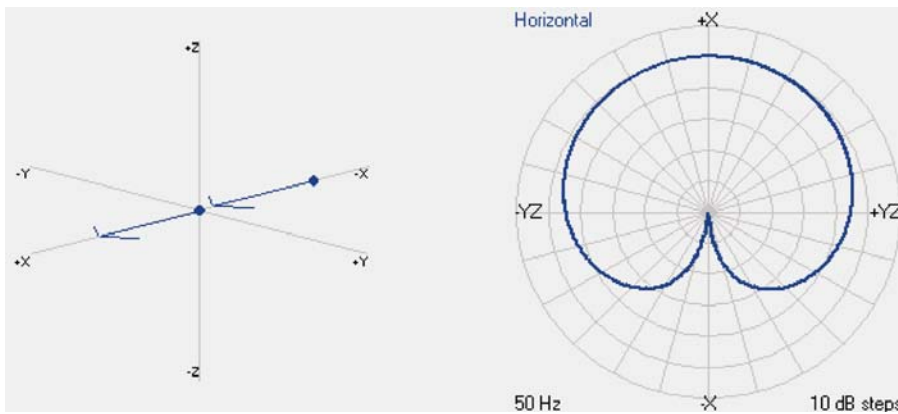
Der innovativste Aspekt besteht in der Möglichkeit Gruppen von jeweils drei Lautsprechern mit einem der 4 Kanäle eines Leistungsverstärkers anzusteuern. Dank einer mehrpoligen Steckverbindung und eines 4-Kanal-Leistungsverstärkers kann nicht nur frei gewählt werden, welche und wie viele der Lautsprechergruppen angesteuert werden, sondern man kann auch die Signale unabhängig voneinander steuern. Das Verstärkersystem bietet hierzu 4 Kanäle, die völlig unabhängig voneinander sind. Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Systeme werden allesamt lediglich über einen zweipolige Ansteuerung betrieben und sind intern als Reihen/-Parallel geschaltetes Netzwerk der Einzellautsprecher ausgeführt. Sie werden in der Regel über einen Einkanal-Verstärker (=Zweikanal-Verstärker im Brückenbetrieb) gespeist.

Durch die mehrkanalige Ansteuerung der OUTLINE-Quelle ist es möglich ihre Richtwirkung von außen sehr einfach zu beeinflussen.

Um z.B. die gesamte Schalleistung in eine Richtung zu konzentrieren muß lediglich die Phasenlage der einzelnen Kanäle so gewählt werden, daß diese sich im gewünschten Punkt maximal verstärken (durch Überlagerung der Lautsprechersignale). Dies kann technisch sehr einfach durch Verzögerungsglieder am Eingang des jeweiligen Verstärkerkanals gelöst werden und bietet z.B. für Fassadenmessungen einen zusätzlichen Dynamikgewinn bei gleichzeitig geringerer Belästigung der Anwohner.

Durch geeignete Verzögerungsglieder kann auch ganz gezielt z.B. die Richtcharakteristik von Musikinstrumenten nachgebildet werden. Dies kann z.B. sehr nützlich und aufschlußreich für die akustische Untersuchung von Konzertsälen sein. Auch Sprecher-Simulationen für Sprachverständlichkeitsmessungen können mit derselben Quelle unter realistischeren und reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden.

Eine spezielle Version der Quelle, bei der jeder der 12 Lautsprecher einzeln von außen angesteuert werden kann, ist ebenso verfügbar.

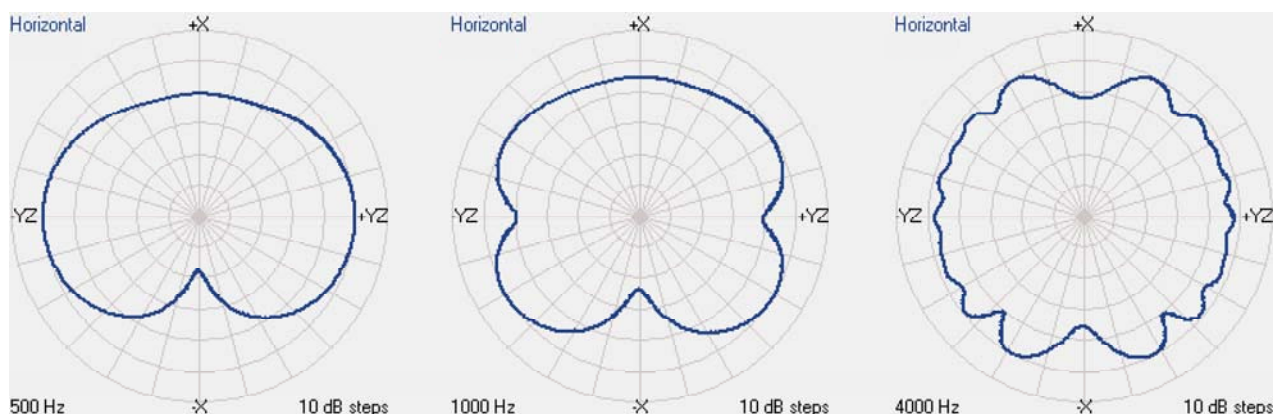


**Bild 12**  
Räumliche Anordnung und resultierendes Schallfeld zweier nahezu gegenphasiger Quellen

Bild 12 zeigt das Beispiel eines gerichteten Schallfeldes mit zwei nicht-gerichteten Quellen. Zur vereinfachten Erklärung des Wirkprinzips werden die Quellen hier als Punktquellen **A** und **B** angenommen. Diese werden im Abstand von 0.34m positioniert. Das Signal, das die Quelle **B** ist verglichen mit dem in Quelle **A** eingespeisten Signal um 0.001 sec. verzögert und invertiert. Das resultierende Schallfeld ist in einem Frequenzbereich von 50 to 400 Hz *cardioid*, hat also die typische Form eines Schallfeldes für eine gerichtete Quelle.

Aufgrund der Phasendifferenz und des Abstandes zwischen den Schallquellen kommt es vor dem Schallwandler in positiver Richtung der X-Achse zur Verstärkung (durch Überlagerung der beiden Schallwellen), während es in negativer Richtung der X-Achse, auf Grund der gegenphasigen Signale zur Auslöschung.

Die Parameter für Abstand und Verzögerung hängen von der betrachteten Frequenz ab. Wie Bild 13 zeigt, ist die Form für höhere Frequenzen, auf Grund anderer Interferenzerscheinungen hier nicht so ausgeprägt.



**Bild 13: Schallfelder für für Frequenzen oberhalb der Idealfrequenz**

### UNABHÄNGIGE SIGNALE

Verstärkung und Auslöschung durch Interferenzerscheinungen sind unvermeidbar wenn verschiedene Einzelquellen, zwar mit dem selben Signal gespeist, aber an räumlich unterschiedlichen Orten betrieben werden. Mit Hilfe der beschriebenen Verzögerungsglieder können diese Phänomene für einen gewünschten Punkt im Raum gezielt beeinflusst werden, nicht aber für Alle Punkte im Raum.

Für Bauakustik-Messungen ist die Leistungsverteilung des Testsignals im Raum von größter Bedeutung, nicht aber die Art des Signals selber. in der Regel verwendet man hier (nichtperiodisches) rosa Rauschen als Testsignal.

Prinzipiell kann man jeden Verstärkerkanal durch einen separaten Rauschgenerator ansteuern, hierdurch werden Verstärkung, Auslöschung und Interferenzeffekte zufällig im Raum verteilt auftreten, was ein homogeneres Schallfeld zur Folge hat; ein weiterer Vorteil einer mehrkanaligen Ansteuerung.

## Praktische Umsetzung

Die Vorgaben für dieses Projekt wurden bereits im vorherigen Kapitel definiert.

- Kleinstmögliche Abmessungen
- Dodekaeder-förmiger Aufbau;
- Mehrfach verleimtes Spezial-Schichtholz;
- speziell für diesen Zweck entwickelte OUTLINE S5WM16NPP Ferrofluid-Lautsprecher;
- Multi-Kontakt Steckverbindungen für mehrkanalige Ansteuerung.

Nun folgte die praktische Realisierung:

## Geometrische Form

Ein Dodekaeder ist ein regelmäßiger Polyeder mit 20 Eckpunkten, 30 Kanten and 12 Flächen. um ihn perfekt bauen zu können, muß seine Geometrie exakt bekannt sein. Alle geometrischen Eigenschaften können aus der Kantenlänge  $l$  eines Fünfecks berechnet werden.

Seitenlänge:

$l$

Fläche:

$$S = 3\sqrt{5}(5 + 2\sqrt{5})l^2$$

Volumen:

$$V = \frac{1}{4}(15 + 7\sqrt{5})l^3$$

Radius der eingepassten Kugel:

$$r = \sqrt{\frac{5}{8} + \frac{11}{8\sqrt{5}}}l$$

Radius der umschließenden Kugel:

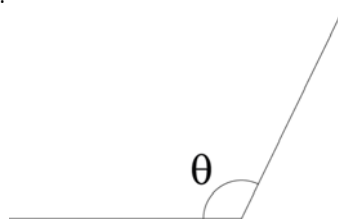
$$R = \sqrt{\frac{9}{8} + \frac{3\sqrt{5}}{8}}l$$

Kanten-winkel:

$$\theta = \cos^{-1}\left(-\frac{1}{\sqrt{5}}\right) = 116.56505$$

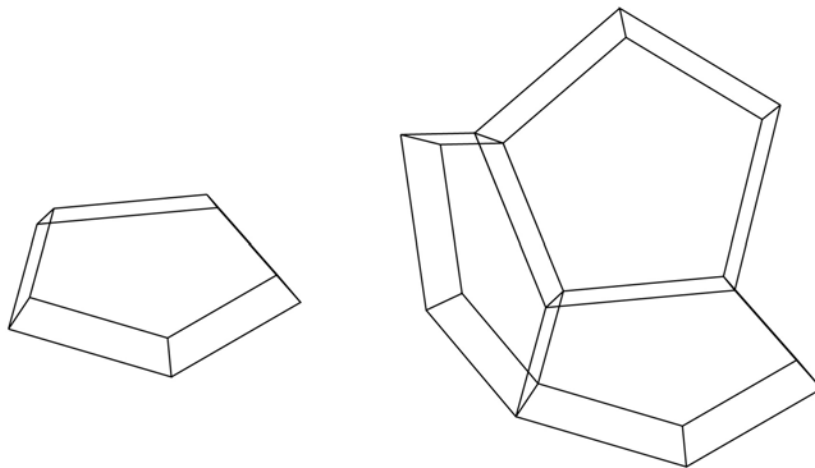
Da es sich um einen regelmäßigen Körper handelt, sind alle zwölf Flächen gleich. Allerdings sind zur Montage der Mehrfachsteckverbindung, der Stativaufnahme, eines Tragegriffes etc. einige geringfügige Modifikationen zu berücksichtigen.

Der Kantenwinkel  $\Omega$  ist der Winkel zwischen 2 aneinander grenzenden Flächen des Polyeders (Zweiflächen-Winkel/ Siehe Bild 14).



**Bild 14: Kantenwinkel-Winkel**

Wie in Bild 15 zu erkennen ist es zur passgenauen Montage im korrekten Winkel notwendig in einen Winkel von  $\theta/2$  abzuschrägen.



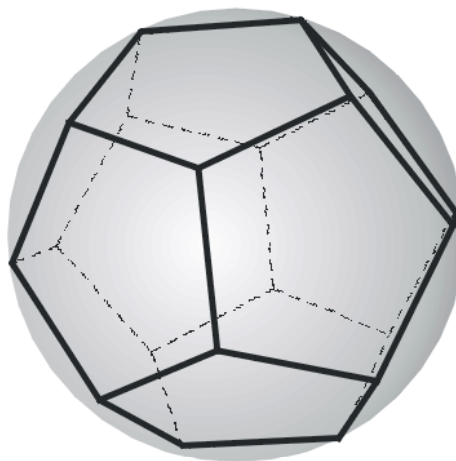
**Bild 15: Eine Abschrägung im Winkel von  $\theta/2$  ermöglicht die passgenaue Montage**

Dies bedeutet, daß die einzelnen Bauteile Pyramiden-Schnitte mit pentagonaler Grundfläche sind, deren (virtuellem) Gipfelpunkt sich im Zentrum des Körpers befindet.

Die Formel:

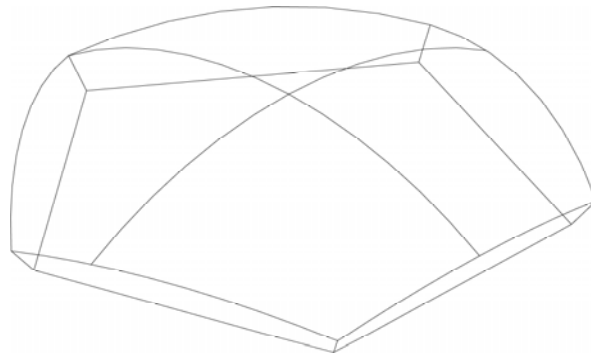
$$R = \sqrt{\frac{9}{8} + \frac{3\sqrt{5}}{8}} l$$

gibt den Radius der den Dodekaeder umschließenden Kugel an (Bild16). Sämtliche 20 Eckpunkte des Dodekaeders sind Punkte auf dieser Kugel.



**Bild 16: Umschließende Kugel**

Deshalb ist es ohne weiteres möglich die Außenflächen der 12 Fünfecke als Kugelsegmente auszuführen. (Bild 17). Bei der Montage der 12 Bauteile wird hierdurch eine Kugel geformt.



**Bild 17: Einzelbauteil für eine Kugelstruktur**

Diese neue Form ist bezüglich der Positionierung der einzelnen Schallwandler identisch mit der zuvor beschriebenen, bietet jedoch einige Vorteile:

#### **VORTEILE DER KUGELFORM**

- **Keine reflektierenden ebenen Flächen**
- **Keine Beugungserscheinungen an Kanten**
- **Homogenere Abstrahlung**
- **Gewichtseinsparung** bei gleichzeitig höherer Stabilität (Kugelsegment kann höhere Kräfte aufnehmen als gleich starkes flaches Fünfeck)
- **Reflex-Bohrungen** können leicht angebracht werden (Siehe Seite 23)
- Bauweise für Kunden attraktiver und deshalb auch kommerziell interessanter.

#### ***Tragwerk (Stütz-, Trag- und Stabilisierungselemente)***

Für eine praktische Anwendung der Schallquelle müssen einige Komponenten hinzugefügt werden:

1. Stativaufnahme (passend für handelsübliche Hochlast/ Beleuchtungs-Stativ);
2. Griffaufnahme

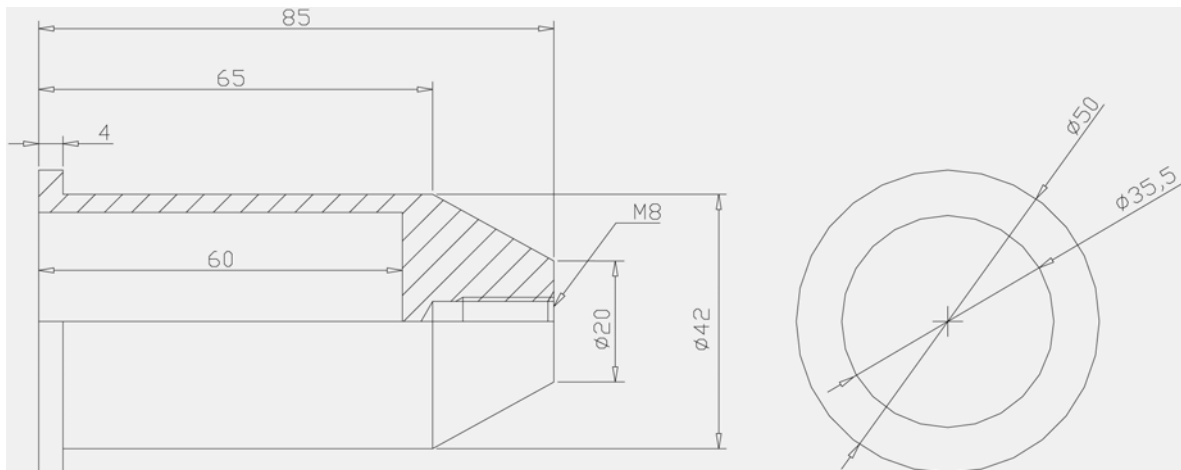
Beide Komponenten müssen im wesentlichen das Gewicht der Struktur tragen. Es bot sich also an, sie auf der selben Wirkungslinie zu positionieren. Von den unendlich vielen Geraden, die durch den Schwerpunkt des Körpers führen, ist es am zweckmäßigsten, eine zu wählen, die durch zwei entgegengesetzte Eckpunkte des Körpers führt..

Da diese Punkte auch die am weitesten von dem nächsten Lautsprecher entfernten Punkte sind wird das Schallfeld an dieser Stelle durch die beiden hinzugefügten Komponenten auch am wenigsten gestört.

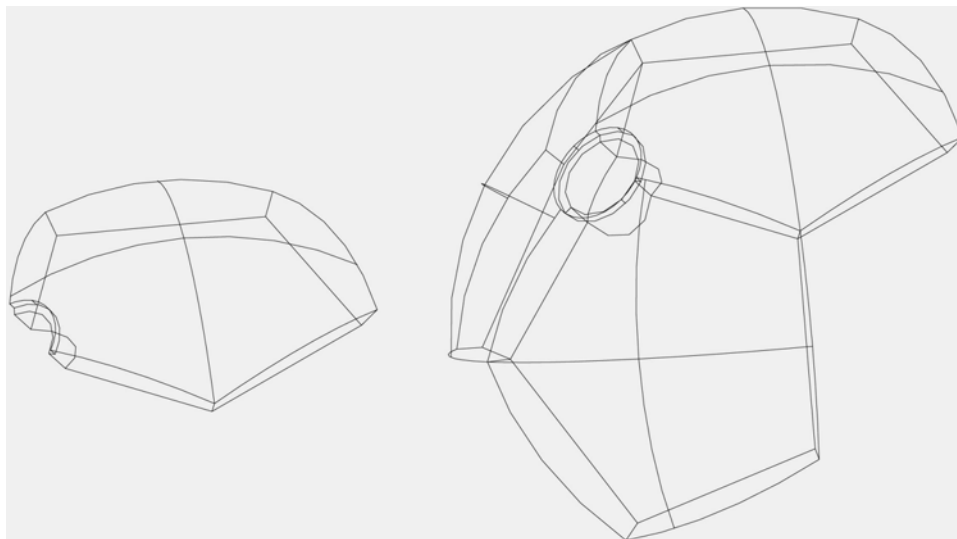
Beide Komponenten wurden über eine M8-Gewindestange miteinander verbunden um eine höhere mechanische Steifigkeit, sowie eine gleichförmigere und höhere mechanische belastbarkeit zu gewährleisten. Die Gewindestange wurde fest mit den beiden Komponenten verschraubt und mit Scheiben und Kontermuttern gesichert

#### **Stativaufnahme**

Das Verbindungselement besteht aus einem zylindrischen Bolzen auf dem Stativ selbst, und einer Aufnahme (gleichen Durchmessers) im Dodekaeder. Bild 18 zeigt das betreffende Bauteil. Ein Eckpunkt muß wie in Bild 19 gezeigt bearbeitet werden um das Bauteil aufzunehmen.



**Bild 18: Stativaufnahme in der Schallquelle**



**Bild 19: Montagepunkt für die Stativaufnahme**

Wie auf den Bildern zu erkennen bildet die Montagefläche der Stativaufnahme ein Kreis, dessen Mittelpunkt in einem der Eckpunkte des Dodekaeders liegt. Dies muß bereits bei der Herstellung der Einzelbauteile berücksichtigt werden um nicht in Konflikt mit den eingebauten Lautsprechern zu geraten. Um eine ausreichende Standsicherheit zu gewährleisten muß der Aufnahmebolzen auch einige Zentimeter in das Gehäuse hineinragen, weshalb im Gehäuse ein gewisses Maß an Platz benötigt wird. Auch die Tatsache, daß der Aufnahmebolzen an seinem im Inneren der Quelle befindlichen Ende ein Sackloch zur Befestigung der Gewindestange aufnehmen sollte, war zu berücksichtigen.

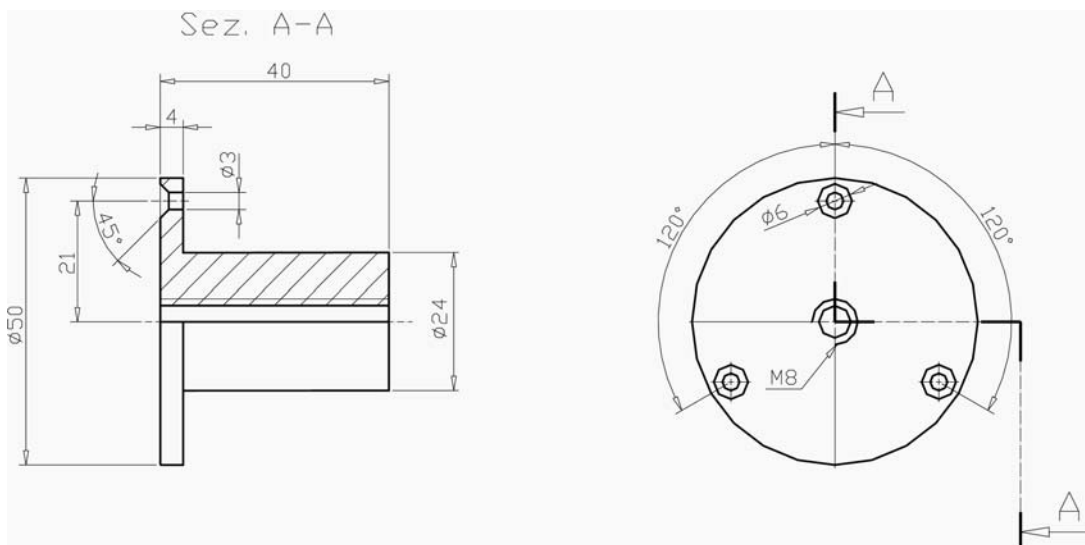
Der Bolzen wurde deshalb am oberen Ende konisch abgeschragt. Hierdurch wurde zum einen maximale Stabilität für die Gesamtkonstruktion bei gleichzeitig minimalem Platzbedarf und maximalem Platzgewinn für die Lautsprecher erreicht (Bild 20.)



**Bild 20: Optimierung der Bauteilabmessungen innerhalb des Gehäuses**

### Aufnahme für Handgriff oder Flugöse

Die in Bild 21 gezeigte Komponente wird am oberen, der Stativaufnahme gegenüberliegenden Eckpunkt montiert und mit Hilfe einer durchgehenden Gewindestange fixiert. Diese "Befestigungskappe" hat eine Doppelfunktion:



**Bild 21: Cap**

1. Aufnahme eines abnehmbaren Tragegriffs. Alternativ kann hier auch eine Flugöse für hängende Montage der Schallquelle angebracht werden
2. Erhöhung der Steifigkeit und Robustheit des Gesamtsystems, um auch bei harten Alltagsbelastungen wie dem harten Aufsetzen auf dem Stativ ausreichende Reserven zu gewährleisten, ohne das System durch zu hohe Materialstärke unnötig schwerer zu machen.

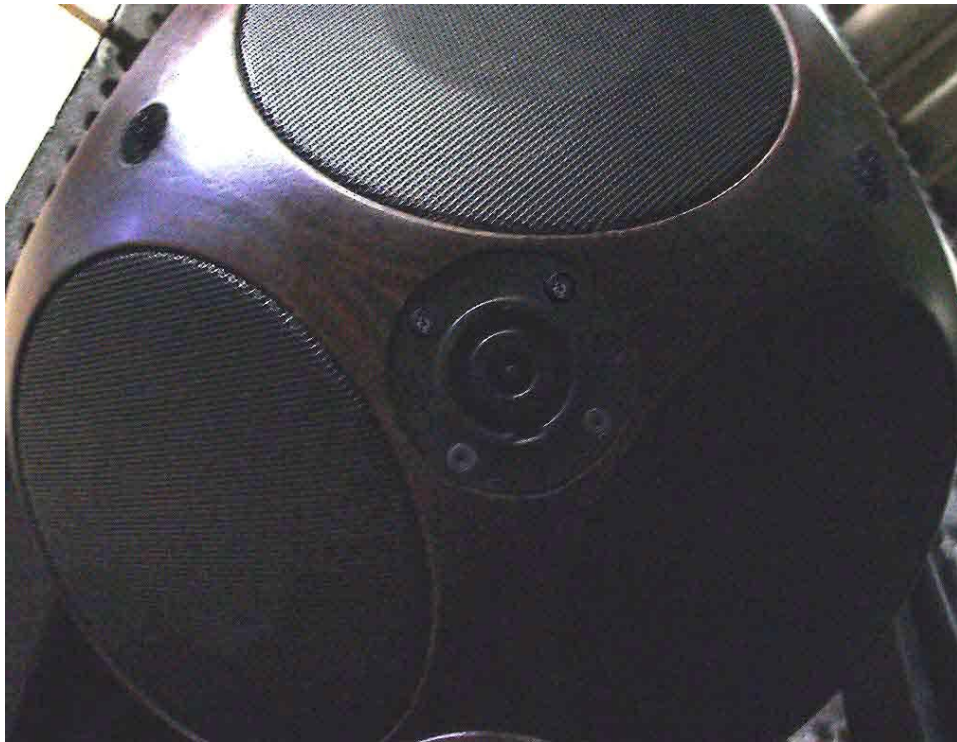
Sowohl Befestigungskappe als auch Stativaufnahme sind achsensymmetrisch mit der Struktur verbundene Körper von hoher Stabilität, die zusätzlich die Gesamtstruktur verstärken und destruktive Deformationen in der Haupt-Belastungsrichtung wirksam verhindern.

### **Elektrischer Anschluß**

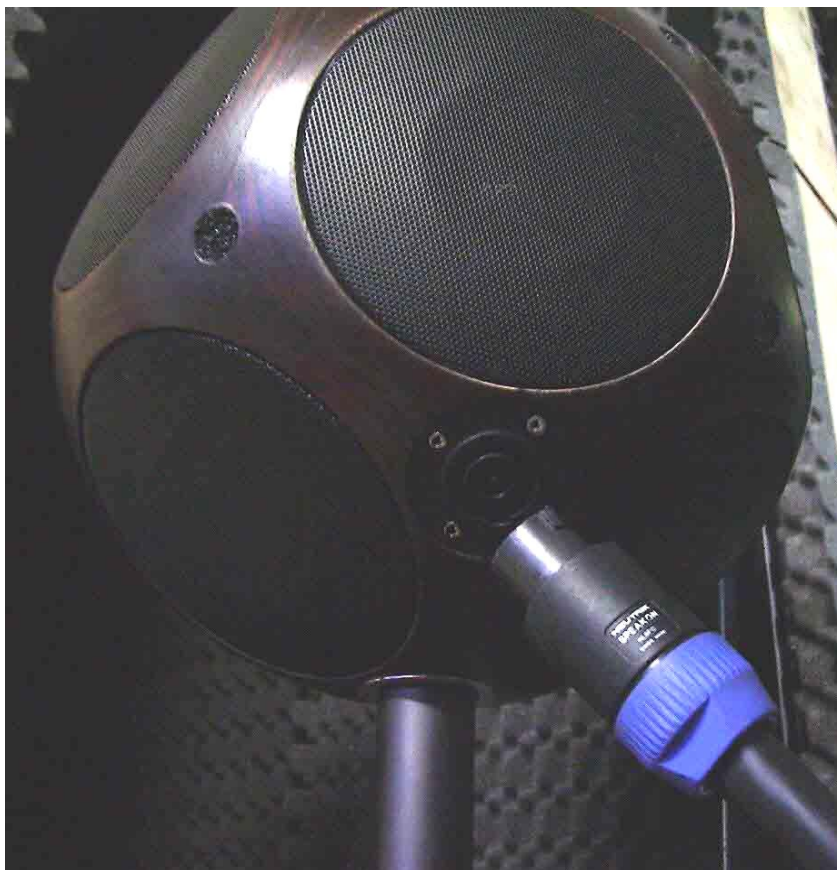
Ausgangspunkt war die Notwendigkeit vier unabhängige Eingangskanäle zur Speisung bereitzustellen, um damit Gruppen von jeweils drei Lautsprechern separat anzusteuern. Dies war gewünscht um die Richtwirkung beeinflussen zu können. Die Anschlüsse wurden deshalb als Speakon-8-Steckern ausgeführt. Diese sind leicht und werkzeuglos zu verarbeiten, was die praktische Anwendung und Kabelfertigung vereinfacht.

Die im Prototyp eingebauten Lautsprecher waren für eine maximale Dauerleistung von  $75 W_{RMS}$ , ausgelegt. An einer an einer Gesamtimpedanz von  $1 \Omega$  (alle Lautsprechern in Parallelschaltung betrieben), entspricht das einer elektrischen Gesamtleistung von  $900W$ .

Um die Schallquelle so kugelförmig und homogen wie möglich zu gestalten, wurde die Speakonbuchse in das Gehäuse etwas vertieft eingelassen (Bild 22). Der Prototyp mit einem Systemstecker (AMP), der es erlaubt sämtliche Lautsprecher getrennt anzusteuern ist in Bild 23 zu sehen.



**Bild 22: in die Oberfläche vertieft eingepasster Lautsprecheranschluß**



**Bild 23: Speakon-8-Anschluß**

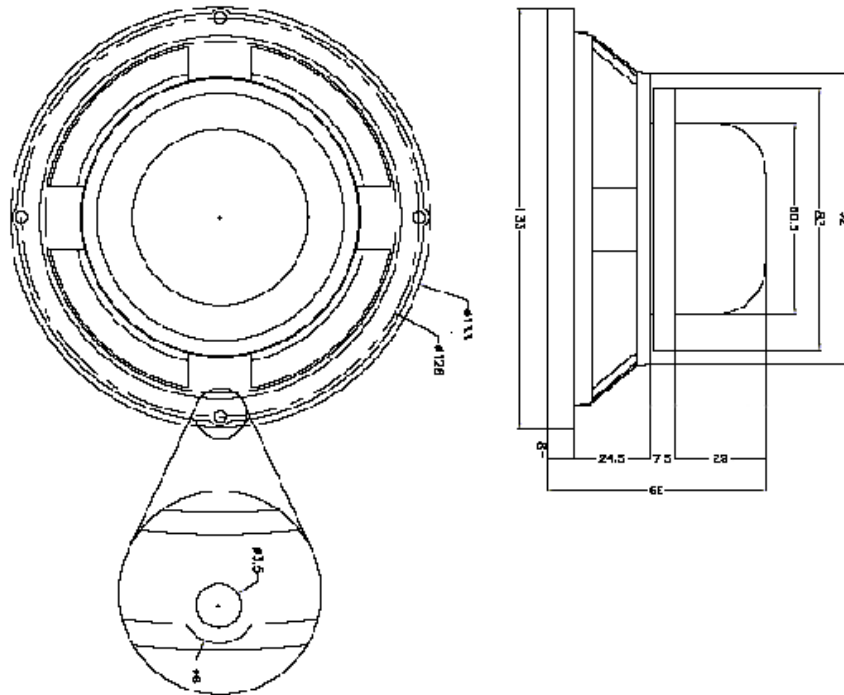
Zur ultimativen Kontrolle der Richtcharakteristik kann alternativ ein AMP 24-Anschluß montiert werden. (auf Anfrage lieferbar, siehe Bild 24)



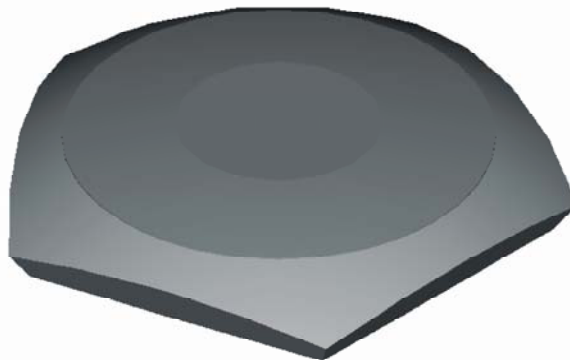
**Bild 24: AMP 24-Anschluß**

### ***Lautsprechermontage***

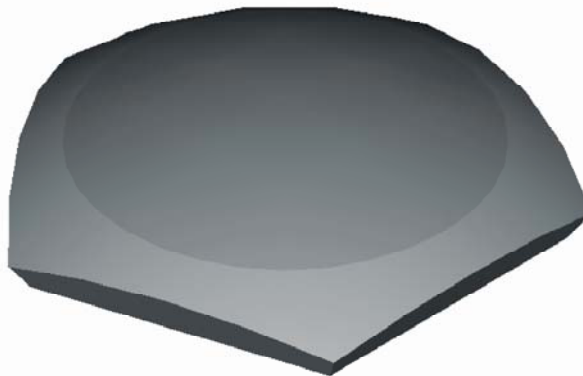
Die Abmessungen der Einzelbauteile des Dodekaeders hängen vor allem von den Lautsprecherabmessungen ab. Das Design des Druckguss-Aluminium-Korbs der speziell für diesen Anwendungszweck entwickelten Lautsprecher ist in Bild 25 dargestellt. Um möglichst wenig Platz mit Montagelöchern in der Umfassung des Lautsprechers zu verschwenden wurden auf Montagebohrungen verzichtet. Dies ermöglicht eine größere effektive Membranfläche bei gleichen Abmessungen. Die notwendigen Schutzgitter über den Lautsprechern wurden mit Hilfe von Polyethylen-Kleber an den Gehäusekanten befestigt. Der Schlitz zwischen Gehäusekante und Lautsprecherkorb, sowie Gehäusekante und Lautsprechergitter kann beide Komponenten mühelos aufnehmen und auf Grund der seitlich angebrachten großen Klebeflächen sicher halten, ohne daß hierzu Schrauben verwendet werden müßten. Hierdurch wird eine "maximale Ausbeute" an Membranfläche erreicht.



**Bild 25: Lautsprecherkorb des Outline S5WM16NPP -Ferrofluid-Lautsprechers**



**Bild 26: Ansicht einer Teilfläche Standard-Lautsprechergitter**  
Die Abflachung ermöglicht ein sicheres Ablegen der Quelle und beeinträchtigt das Abstrahlverhalten nicht.



**Bild 27: Ansicht einer Teilfläche mit einem Sphärischen Lautsprechergitter**

Die verwendeten Lautsprechergitter sind in Bild 26 dargestellt. Es wurde eine leicht abgeflachte Form gewählt um die Quelle ablegen zu können, ohne das diese wegrollt. Es sind aber auch Lautsprechergitter mit vollständig sphärischen Design und gleichem Durchmesser (Bild 27) lieferbar.

Vom akustischen Standpunkt aus gesehen beeinflusst die Form des Lautsprechergitters die Richtcharakteristik der Quelle jedoch nicht.

### ***Montierte Gesamtstruktur***

Mit den bekannten und optimierten Gesamtabmessungen der Lautsprecher, sowie der Tragelemente war es möglich die Abmessungen des Gesamtsystems zu optimieren.

Oberstes Ziel war hierbei den vorhandenen Platz optimal zu nutzen, ohne unnötige Freiflächen. Auf diese Weise konnte sowohl der Durchmesser minimiert, als auch Gewicht gespart werden! Der resultierende Gesamtdurchmesser beträgt lediglich **310 mm**.

Die dreidimensionalen Modelle der gesamten Gehäusestruktur, sowie ein Schnitt (der die Tragelemente hervorhebt) sind in den Bildern 28 und 29 dargestellt. Der Prototyp aus mehrfach verleimten Schichtholz (im gemaserten Walnuß-Finish) ist in Bild 30 dargestellt. Für spätere Seriengeräte ist ein stoß- und kratzfestes Schwarzes design mit gehärteter Oberfläche gemäß Industriestandard vorgesehen.

**Bild 28: Gehäuse**



**Bild 29: Schnittbild mit Tragelementen**



**Bild 30: Fertiger Prototyp**

Der Prototyp weist zusätzliche Bohrungen auf, die mit einem luftdurchlässigen Material gefüllt sind und sich an den Eckpunkten der Einzelflächen des Dodekaeders befinden. Die Bohrungen sind Bestandteil eines Reflex-Systems (für Dodekaeder ebenfalls eine innovative Neuerung).

#### **VORTEILE DES REFLEX-SYSTEMS:**

1. **Wesentlich höhere Dauerleistung** im Vergleich zum geschlossenen System (Pneumatisches Luft-Feder-System). Beim Reflex-System sind die Lautsprecher im Bereich der Resonanzfrequenz nahezu stationär, und deshalb mechanisch gesehen in einem sicheren Bereich. Praktischerweise ist dies genau der Bereich in dem man diese Sicherheit am meisten benötigt. Auf grund der großen Membranauslenkung wäre hier das Risiko einer mechanischen Beschädigung am größten. Dieser Vorteil wird ohne Nachteile erkauf, da mit dem Dodekaeder Frequenzen ,unterhalb der Resonanzfrequenz, nicht wiedergegeben werden müssen. Dieser Frequenzbereich kann (auch elektronisch) gefiltert werden um die Arbeitsweise der Reflex-Last weiter zu verbessern und um unkontrollierte Membranbewegungen unterhalb der Resonanzfrequenz zu vermeiden.
2. **Erhöhter Wirkungsgrad** Ein Reflex-System verhält sich im Vergleich zu einem geschlossenen System (Pneumatisches Luft-Feder-System) wie ein Hochpass höherer Ordnung. Hierdurch erhält man einen **Gewinn von 3dB** im Bereich der Grenzfrequenz, gefolgt von einer steileren Filterflanke.
3. **Niedriger Klirrfaktor** Auf grund der geringeren Membranauslenkung bei einem Reflexsystem treten geringere Verzerrungen auf. Der Klirrfaktor ist reduziert.
4. **deutlich verbesserte Kühlung.** Aufgrund der zusätzlichen Bohrungen kommt es zu einem verbesserten Luftaustausch im Gehäuse. In Verbindung mit dem höheren Wirkungsgrad des Reflexsystems und den besseren Kühleigenschaften der Ferrofluidlautsprecher kann die Quelle auch über sehr lange Zeiten extrem hohen Dauerleistungen standhalten.

### **POWER HANDLING-TEST gemäß AES-Standard**

um die Leistungsabgabe der Quelle charakterisieren zu können wurden "power handling tests" gemäß AES2-1984-(r1997) (ANSI S4.26-1984) – "AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement". durchgeführt.

Hierzu ist die Schallquelle mit Rosa Rauschen zu betreiben, das sich oberhalb der unteren Grenzfrequenz über 10 Bänder (90-900Hz) erstreckt. Das Rauschen muß mit einem Butterworthfilter (Flankensteilheit von 12dB/Oktave) gefiltert werden. Außerdem muß das Verhältnis zwischen Spitzen zu Effektivwert der angelegten Spannung gleich Zwei sein (eine maximale Abweichung von 6dB zwischen diesen beiden Größen ist erlaubt). Die Schallquelle muß hierbei mit immer größeren Leistungen betrieben werden, die Schritt für Schritt gesteigert werden. Die Leistung wird wie folgt berechnet:

$$W = \frac{V_{RMS}^2}{Z_{Min}}$$

Mit dieser Leistung ist die Quelle 2 Stunden lang zu betreiben. Der Test gilt als bestanden, wenn sich die akustischen Parameter weniger als 10% ändern. Während des Tests muß die Temperatur der Lautsprechermagnete überwacht werden. Danach wird die Leistung gesteigert und der Test wiederholt

### **Elektrische und akustische Parameter des Gesamtsystems**

Für die Durchführung des Powerhandling-Tests war es zunächst notwendig die elektrischen Eigenschaften des Gesamtsystems (insbesondere  $Z_{min}$ ) zu bestimmen. Auch für die Auswahl des Verstärkersystems mußten zunächst die elektrischen Eigenschaften feststehen.

Im Gesamtsystem sind jeweils Gruppen von 3 Lautsprechern parallel geschaltet. Die quantitative Ermittlung der benötigten Werte wurde mit Hilfe eines MLSSA/SPO Meßsystems durchgeführt. Der Wert der gemessenen Minimal-Impedanz betrug für eine Dreiergruppe von Lautsprechern 3.96  $\Omega$  bei einer Frequenz von 165Hz (Bild 31). Gemäß den Vorgaben der AES-Empfehlung wurde die Leistung mit diesem Wert und der gemessenen Spannung berechnet.

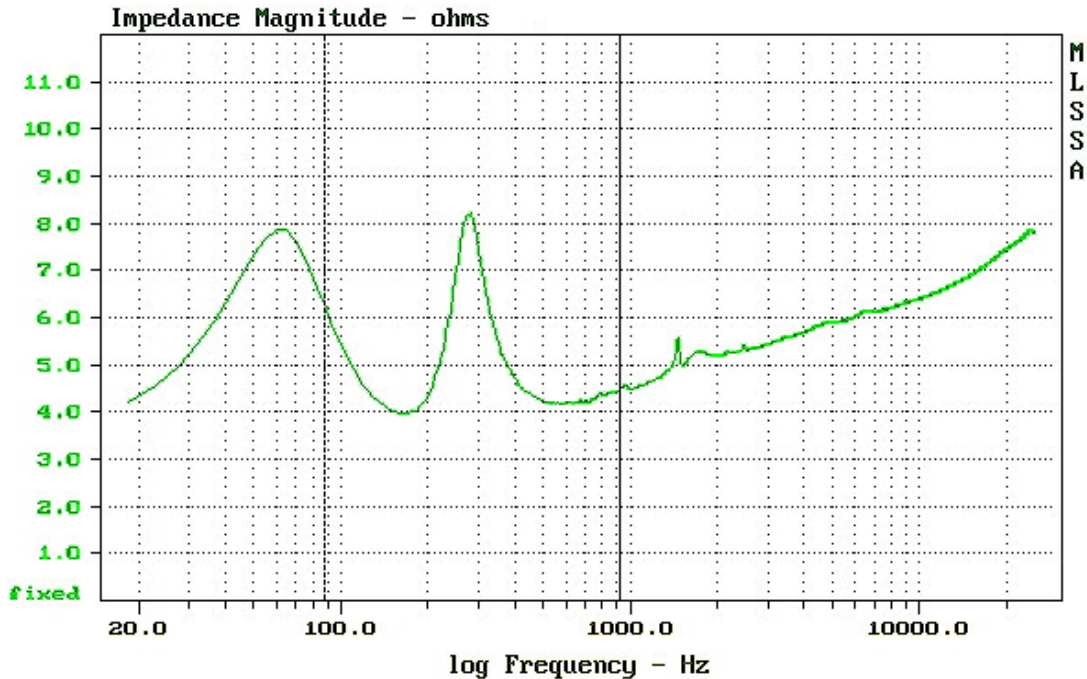
Nach einer Reihe von Voruntersuchungen erschien es zunächst vernünftig jeden der 4 Kanäle im ersten Ansatz mit einer Spannung von 23,7 V zu betreiben. Jeder der 4 Kanäle wurde somit mit der folgenden Leistung gespeist:

$$W_{RMS} (3 \text{ Lautsprecher}) = \frac{V_{RMS}^2}{Z_{Min}} = \frac{23,7^2}{3,96} = 141,8W$$

Hierbei wurde die Schallquelle im Meßaufbau von zwei Outline EX 1500 Verstärkern gespeist, die eine Gesamtleistung  $W_{RMS}$  von etwa 567.2 W an die 12 Lautsprecher lieferten (über 4 Kanäle, die jeweils für 4  $\Omega$  Nennimpedanz ausgelegt waren).

*Die wesentlichen Eigenschaften der beiden EX 1500 -Verstärker sind:*

Leistung, beide Kanäle im Betrieb (8/4 Ohms)	450/ 730 WRMS
Eingangsimpedanz	100 k $\Omega$ (symmetrisch)
Bandbreite (Hz)	10 - 80000 +0dB /- 3dB
	20- 20000 - 0.5dB
Maximale Dauerleistung:	730 W <sub>RMS</sub> pro Kanal an 4 $\Omega$




---

mean: 4.774, rms: 4.877, std: 1, max: 8.207, min: 3.96

---

**Bild 31: Impedanz einer Gruppe von jeweils 3 Lautsprechern**

( Werte bezogen auf den interessierenden Frequenzbereich von 90-900Hz)

### **MESSTECHNISCHE VERSUCHE**

Die Versuche wurden am 30.10.2003 im halbrelexionsarmen Raum der Firma Outline in Flero (BS) durchgeführt. Es wurden folgende Meßgeräte verwendet

- Bruel & Kjaer PULSE 3560-System
- Bruel & Kjaer 3015 Messkarten
- Bruel & Kjaer 4190 Mikrofon
- B&K 4228 Kalibrator
- Versatherm 707 L.C.D. Thermometer
- Typ K Thermoelement
- 2 Outline EX 1500 Verstärker
- Outline MX 405 Mischpulte
- Outline ET2-ST2 Drehtisch
- Cool Edit 2000 software
- AGEMA 590 PAL Thermografie-Kamera

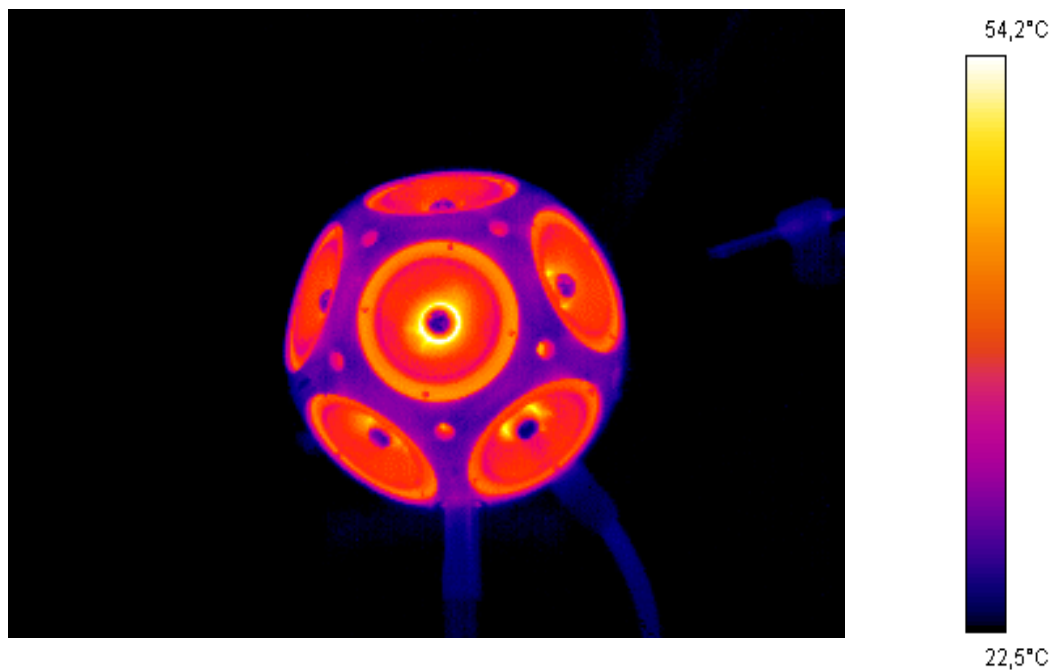
Die akustischen Meßsysteme wurden vor- und nach jeder Messung kalibriert, wobei die festgestellte Abweichung stets kleiner 0,1dB war. Zur Messung des Schalldruckpegels während einer 360°-Drehung der Quelle um die Vertikalachse wurde eine B&K 3015 Messkarte verwendet. Hierbei wurden die Spektren in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet. Die zweite B&K 3015-Messkarte wurde zur Überwachung der Lautsprecher-Speisespannung verwendet um eventuelle "power compression"-Probleme zu überwachen. Die Innentemperatur wurde durch Aufkleben eines "Typ K -Thermoelementes" auf dem Magnetkreis des Lautsprechers überwacht.

Die Temperatur während der verschiedenen Testphasen, die Spannung an jeder Lautsprechergruppe und der mittlere Schalldruckpegel während einer Drehung der Quelle sind in Tabelle 1 aufgeführt:

**Tabelle 1: Temperatur, Spannung and Schalldruckpegel während der Testdurchführung**

Zeit [min]	Temperatur [°C]	Spannung[V]	Schallpegel Lp [dB(L)]
0	25.3	23.7	128.0
30	42.5	23.7	127.8
60	44.2	23.7	127.7
90	44.6	23.7	127.7
120	44.9	23.7	127.7

Der Meßpunkt zur Messung des Schalldruckpegels wurde so gewählt, daß sich dieser auf einer Kugeloberfläche um den Dodekaeder (gleicher Mittelpunkt wie der Dodekaeder selbst) mit der Fläche von 1m<sup>2</sup> befand. Während des Powerhandling-Test wurden Thermografieaufnahmen der Quelle gemacht (siehe Bild 32)



**Bild 32: Thermografie-Aufnahme am Ende des Powerhandling-Test nach 2 Stunden Dauerbetrieb**

In Übereinstimmung mit den Kriterien des AES standard wurden, nach einer Kühlphase von 4 Stunden (die Innentemperatur war auf 19.0°C abgesunken), überprüft ob die Quelle beschädigt ist. Hierzu wurde geprüft ob sich die akustischen Parameter um mehr als 10% geändert hatten. Der unter diesen Bedingungen bei einer Spannung von 23.7V gemessene Schalldruckpegel betrug 128.1 dB (Table 2).

**Tabelle 2: Prüfung der Quelle nach der Abkühlphase**

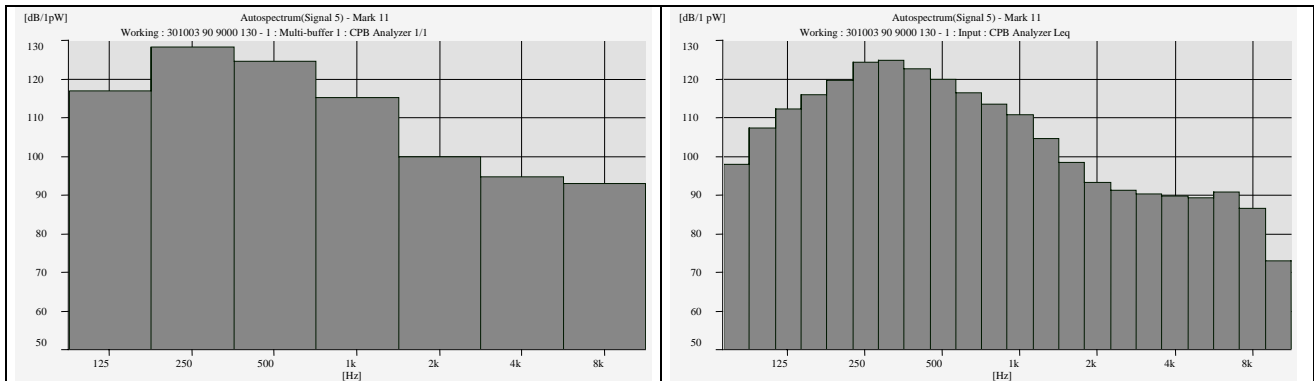
Time passed [min]	Temperature [°C]	Voltage [V]	Lp [dB(L)]
120 ON + 240 OFF	19.0	23.7	128.1

Es wurden zwei Schrittweise Versuche unternommen die Leistung gemäß AES-Testvorgaben weiter zu erhöhen, die bei sehr langer Durchführung beide zur Zerstörung eines der beteiligten Lautsprechers führten. Die Leistungsgrenze gemäß AES-Standard liegt also bei 128 dB.

Der Prototyp der Outline-Kugelschallquelle konnte also gemäß AES-Powerhandling-Test, dauerhaft eine Schalleistung von 128 dB re 1pW , ohne Performance-Verlust liefern.

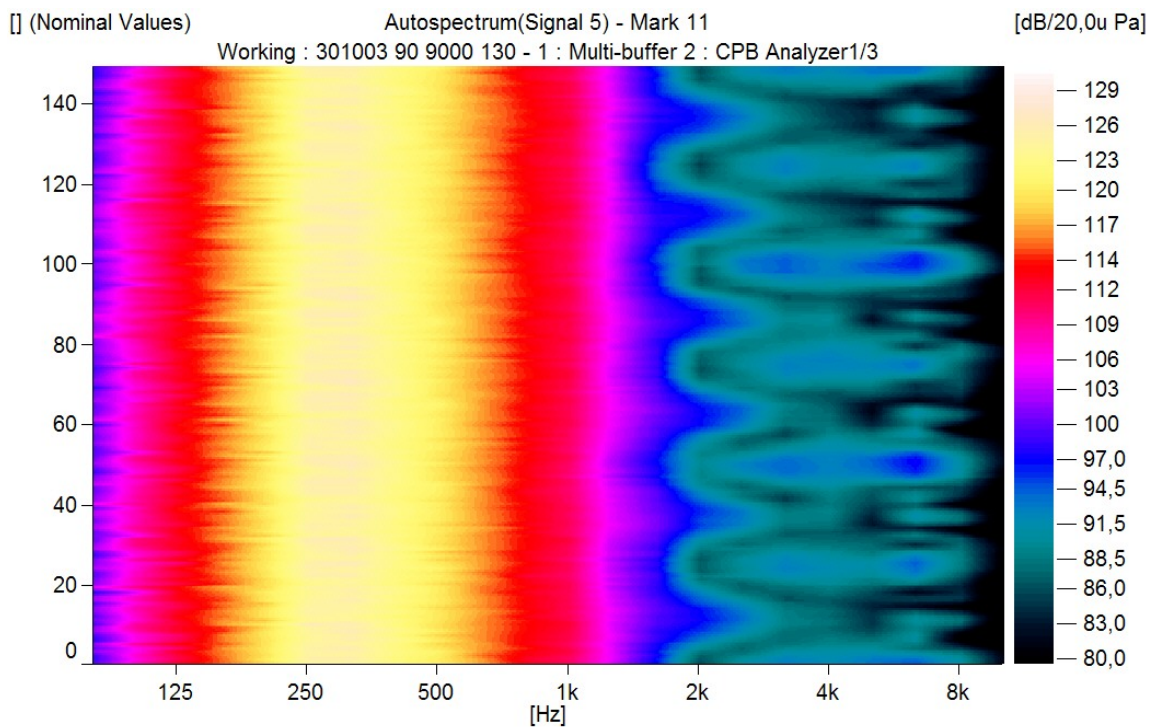
Die Schallquelle kann auch mit deutlich höheren Leistungen betrieben werden: Günstige Voraussetzung hierfür wären z.B.: daß die Leistung über einen breiteren Frequenzbereich als 90-900 Hz verteilt ist, (was bei Bauakustik-Messungen der Fall ist) und die Einschaltdauer nicht gerade zwei Stunden beträgt (auch das ist bei Bauakustik-Messungen der Fall)

Um dies zu verifizieren wurde die Leistung auf das 90-9000 Hz Band verteilt (An Stelle von 90-900 Hz gemäß AES) und ein weiterer Test durchgeführt bei dem die Quelle für mehrere Minuten mit einem Schalleistungspegel von 130.3 dB (1pW) betrieben wurde. Hierbei wurde die spektrale Verteilung der Schalleistung gemessen und festgehalten (Bild 33). Die verwendeten Verstärker waren hierbei "bis zum Anschlag aufgedreht" und konnten nicht mehr Leistung zur Verfügung stellen.



**Bild 33: Spektrale Verteilung der Schalleistung (gemessen in Oktav und Terzen)**

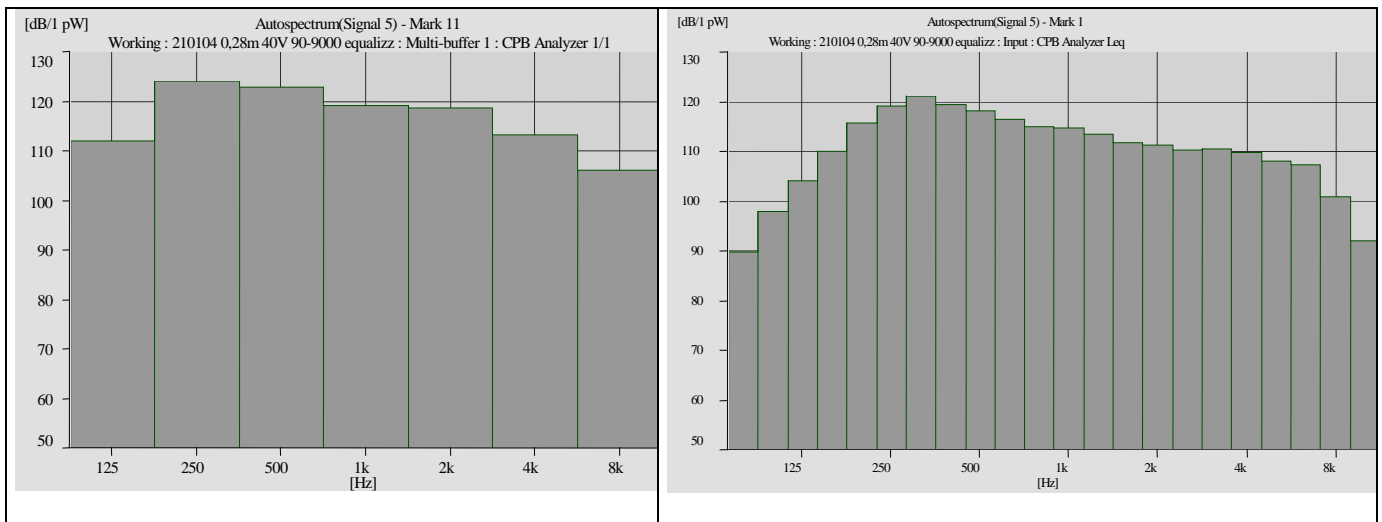
Zusätzlich wurde ein Farbspektrogramm für eine komplette Drehung der Quelle gemessen. Man erkennt bereits hier die außergewöhnlich perfekt kugelförmige Abstrahlcharakteristik der Quelle.



**Bild 34: Farbspektrogramm (Terzanalyse) während einer kompletten drehung der Kugel mit Maximalleistung in einem Abstand von 0,28m gemessen.**  
 Teilung Linke Skala: 144 Schritte 1 Schritt entspricht 2,5 Grad

Im Hinblick auf eine Verbesserung des Frequenzganges der Quelle wurde ein weiterer Test durchgeführt. Hierbei wurde das anregende Signal mit dem die Quelle betrieben wurde gefiltert,

um ein Schalleistungs-Spektrum wie in Bild 35 zu erreichen. Bei diesem Versuch waren vor allem die verwendeten Outline EX1500-Verstärker der begrenzende Faktor, da auf Grund des gefilterten Signals Clipping-Effekte stärker auftraten, weshalb hier nur eine minimal geringere Schalleistung von 127 dB (1pW) erreicht wurde.



**Bild 35: Schalleistungspegel der Quelle bei betrieb mit optimiertem, gefilterten Rauschen**

Eine Serienversion des Systems wird nicht mit den verwendeten zwei EX1500-Verstärkern, sondern mit einem speziell angepassten leistungsfähigeren 4-Kanal-Verstärkern ausgerüstet sein. Dies bietet den Vorteil, daß auch bei einem speziell angepassten gefilterten Rauschen ausreichende "Clipping-Reserven" vorhanden sind. Bei einem ausgewogeneren, ebenen Gesamt-Frequenzgang wird sich durch leistungsfähigere Verstärker auch der Gesamt-Schalleistungspegel noch erhöhen.

Für kurzzeitige Belastungen (wie sie in der Bauakustik üblich sind) wird werden die Lautsprecher, auch im Falle einer Filterung nicht beschädigt, da die Filterung erst ab etwa 1000 Hz aufwärts erfolgt. Das magnetische Öl im Lautsprecher begrenzt hier den Temperaturanstieg, durch verbesserte Wärmeübertragung. Die höheren Speisespannungen treten bei Filterung vor allem im Bereich höherer Frequenzen auf.

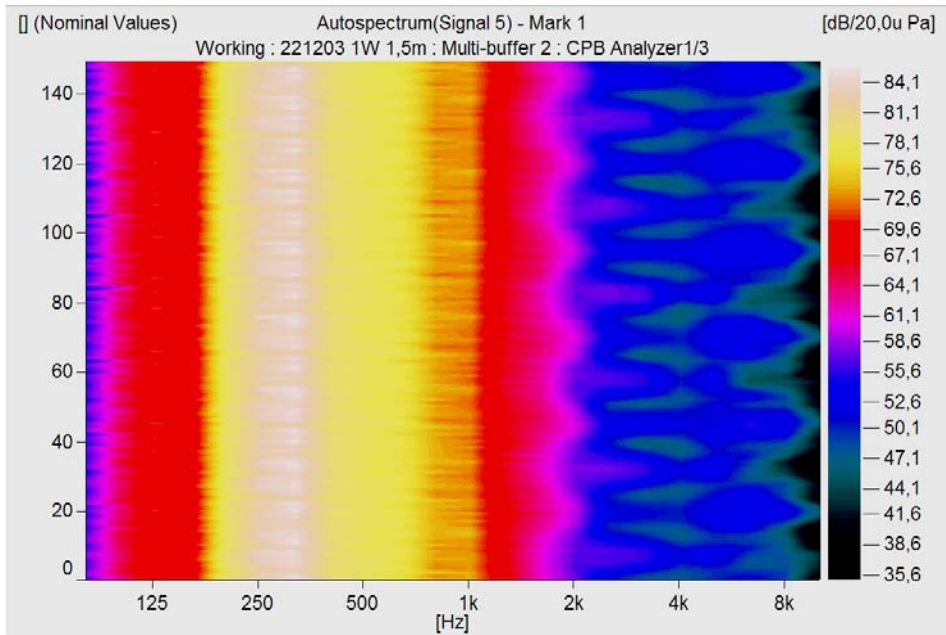
Für die Serienversion ist ein speziell optimierter 4-Kanal-Verstärker geplant. Die für die Lautsprecher auf Grund ihrer elektromechanischen Kenngrößen maximal zulässige Dynamik soll mit diesen Verstärkern voll ausgereizt werden. Außerdem sollen die Filterung und ein Rauschgenerator bereits integriert werden, um eine optimale spektrale Verteilung der Schalleistung für Bauakustikzwecke zu erreichen

In Anbetracht dieser bisher noch nicht durchgeführten Optimierungen liefert das System bereits jetzt Phantastische Schall-Leistungswerte die etwa 20 dB über den Marktüblichen und etwa 10dB über den Werten von Nischenprodukten wie dem DO12 von Schalltechnik SÜD & Nord liegen Hierbei ist das System sogar deutlich leichter und wesentlich kleiner als die der Wettbewerb!

### **Prüfung der Richtcharakteristik**

Die Richtcharakteristik wurde gemäß ISO 140, DIN 52210 and ISO 3382 überprüft Hierzu wurde die Quelle im halbreflexionsarmen Raum von Outline mit einer elektrischen Leistung von 1W betrieben. Die Mikrofone wurden im Abstand von 1,5m von der Achse eines Drehtisches positioniert, mit dessen Hilfe die Quelle motorisch gedreht wurde.

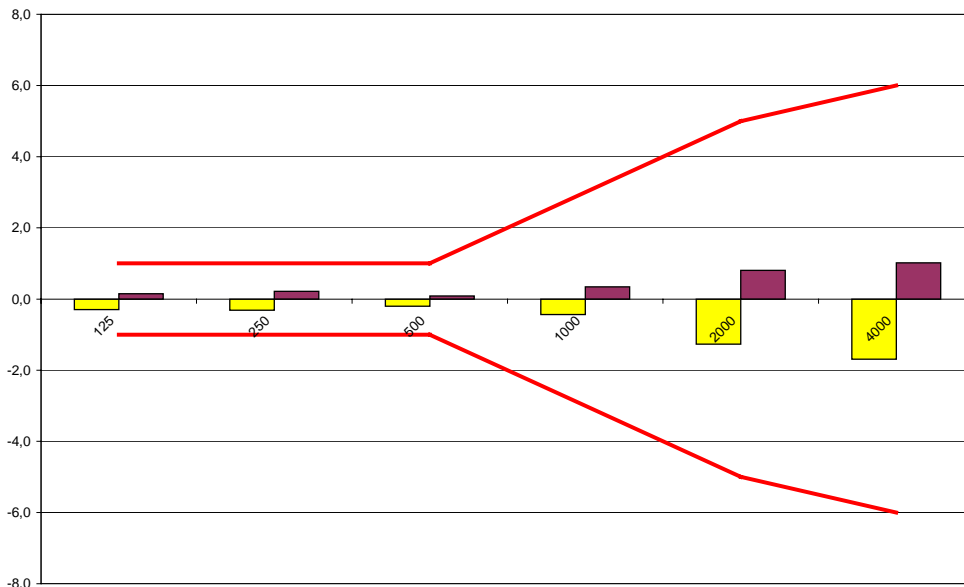
Die Messungen wurden am 22.12.2003 durchgeführt. Die Raumtemperatur betrug 21°C, der Luftdruck 999 hPa. Der sonstige Meßaufbau wurde bereits zuvor beim Power-Handling Test beschrieben. In der mittleren Quellebene im Abstand von 1,5 Meter wurde kontinuierlich der Schalldruckpegel gemessen und als Farbspektrum aufgetragen (Bild 36). Die linke Skala zeigt die Drehung der Quelle in einer Skala von 0-144 Schritten entsprechend 0-360 Grad. Ein Schritt entspricht also 2.5° Drehung um die vertikale Achse. Die Toleranzkurven gemäß ISO 3382 und ISO 140 sind in den Bildern 37 und 38 dargestellt.



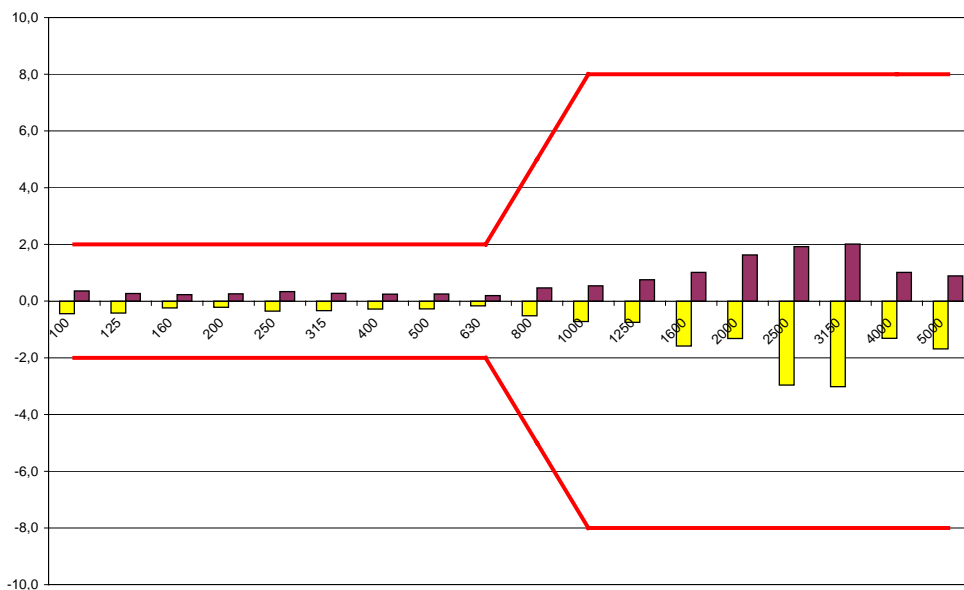
**Bild 36:**

Farbspektrum (Terzanalyse) während einer kompletten Drehung der Kugel mit 1 Watt elektrischer Leistung in einem Abstand von 1,5m gemessen.

Linke Skala: 144 Schritte  
1 Schritt entspricht 2,5



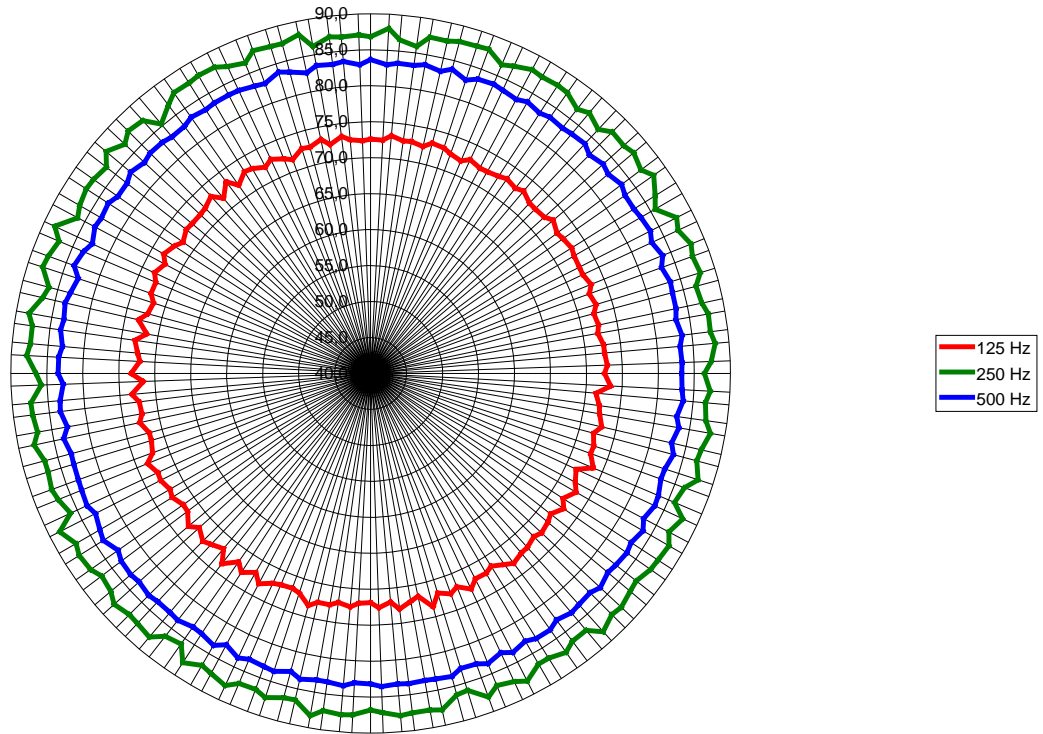
**Bild 37:**  
Gemessener Direktivitäts-Index gemäß ISO 3382



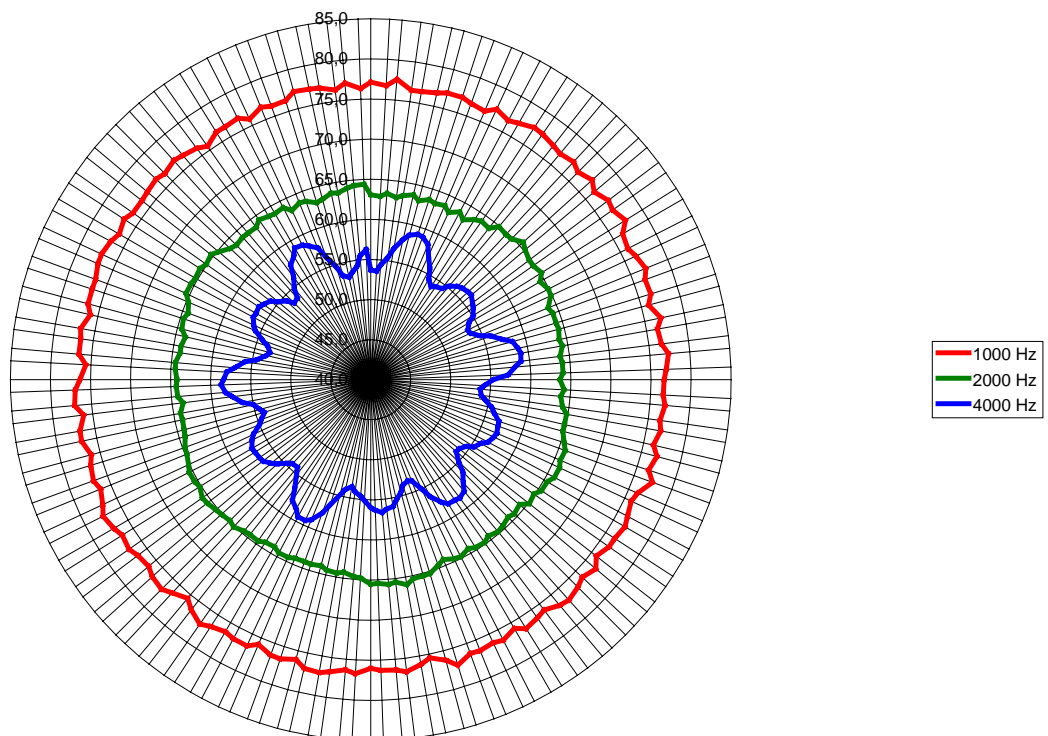
**Bild 38:**  
Gemessener Direktivitäts-Index gemäß ISO 140

Zur Vervollständigung der Beschreibung sind die Messergebnisse zusätzlich als Polardiagramm dargestellt (Bilder 49-46).

Man erkennt hier noch wesentlich besser die perfekte Kugelcharakteristik der Quelle die auch im ungünstigsten Bereich mit einer Toleranz von nur 2 dB (statt der erlaubten 8dB gemäß ISO 140) Die verschärften Anforderungen der ISO 3382 werden ebenfalls weit übertroffen



**Bild 39: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (Oktavbänder 125 +500Hz)**



**Bild 40: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (Oktavbänder 1000 +4000Hz)**

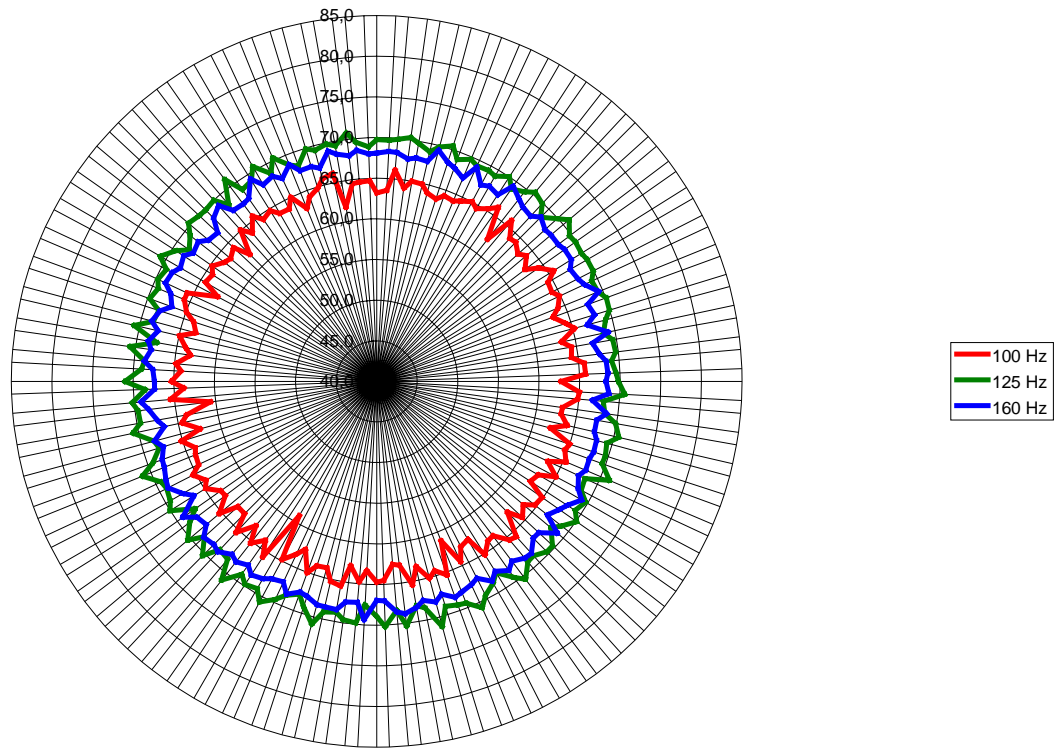


Bild 41: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (1/3 Oktavbänder 100 +160Hz)

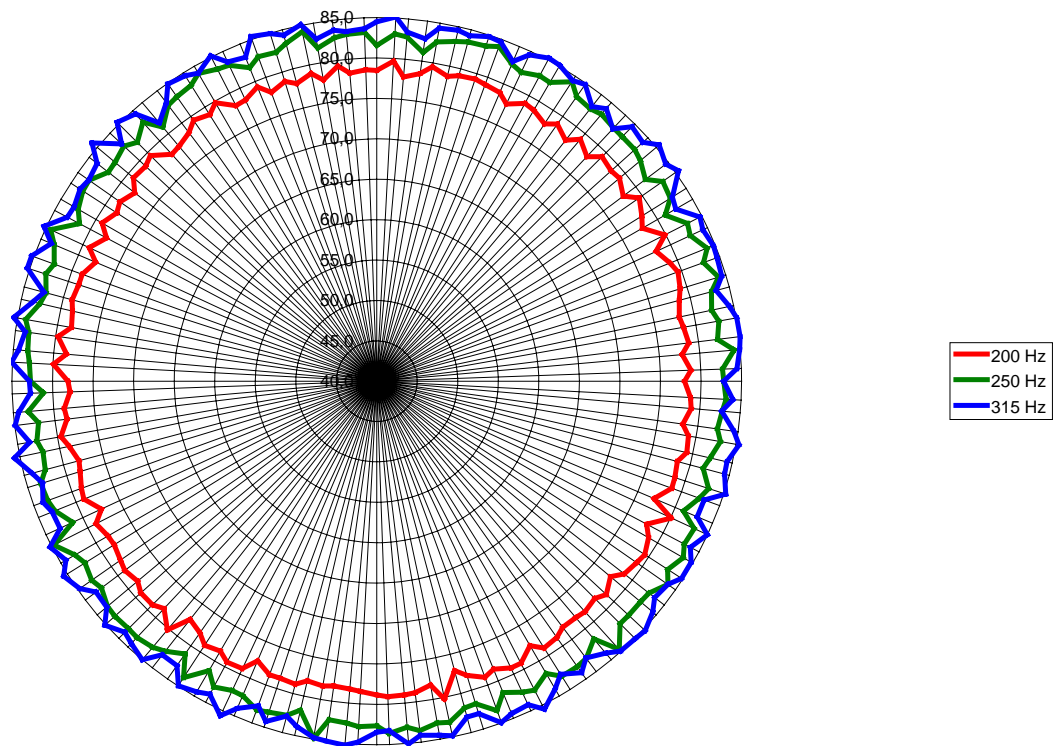


Bild 42: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (1/3 Oktavbänder 200+315Hz)

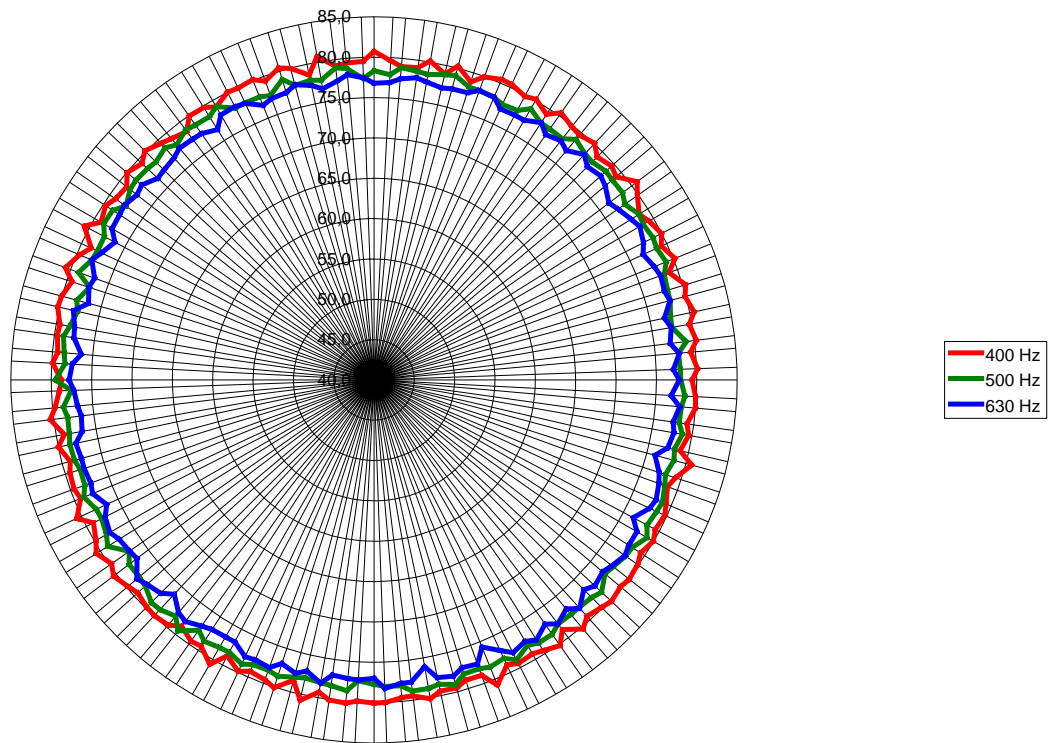


Bild 43: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (1/3 Oktavbänder 400+630Hz)

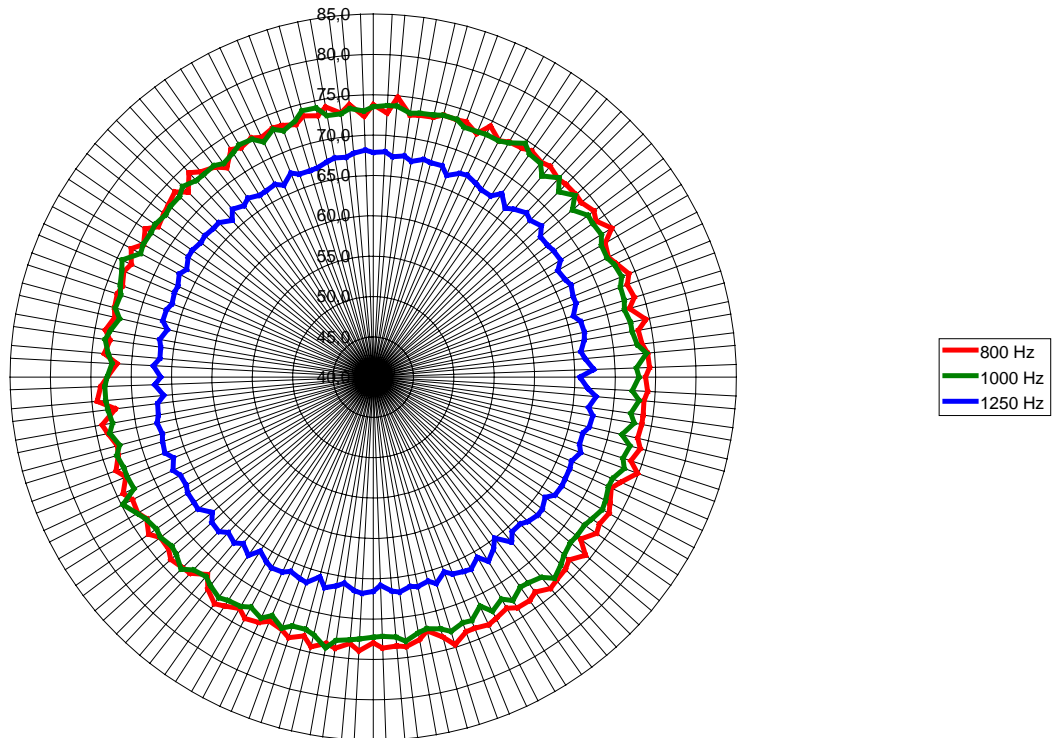
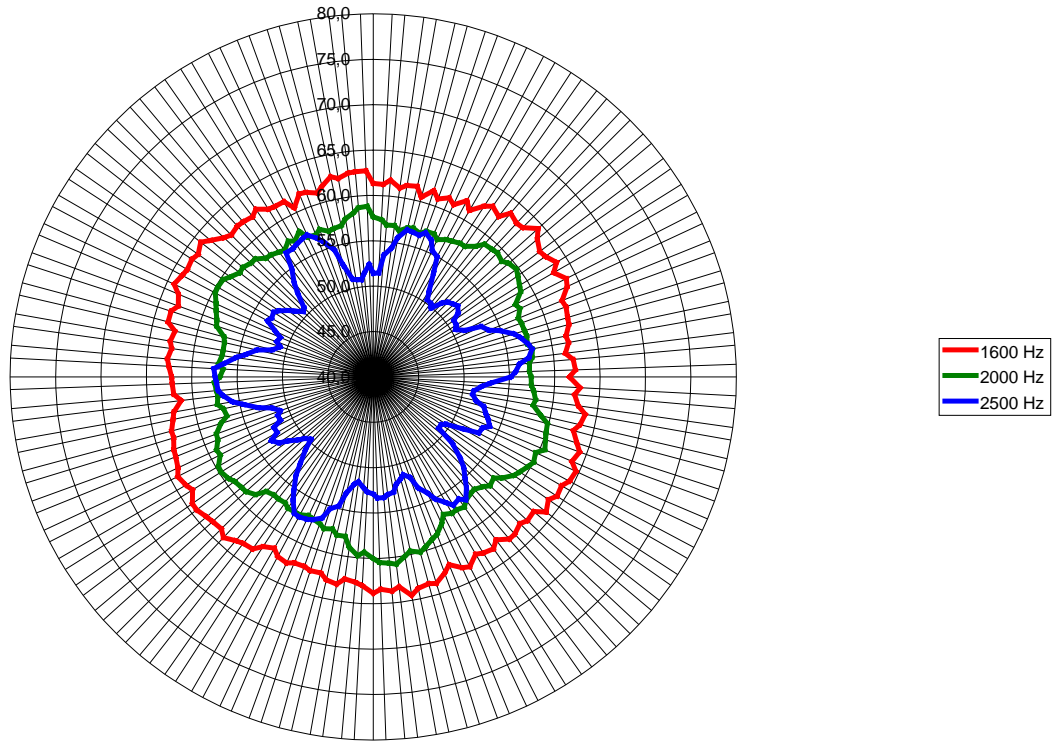
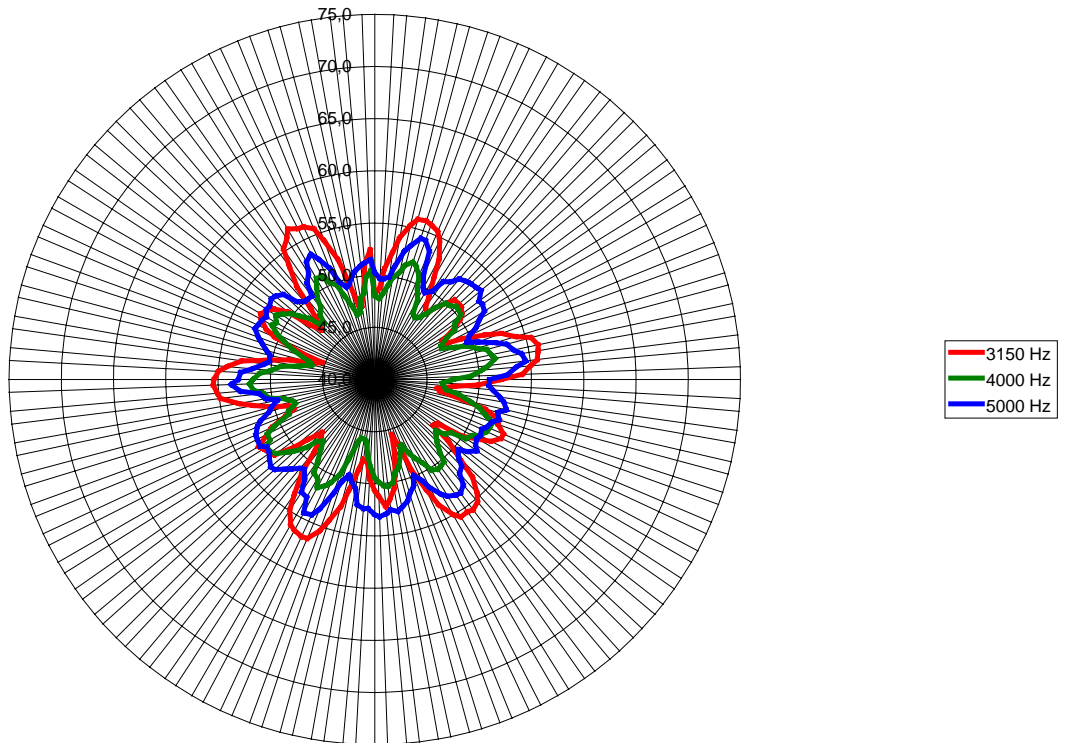


Bild 44: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W@ 1,5m (1/3 Oktavbänder 800+1250Hz)



**Bild 45: Polardiagramm des Schalldruckpegels - 1W @ 1.5m (1/3 Oktavbänder 1600 +2500Hz)**



**Bild 46: Polardiagramm des Schalldruckpegels – 1W @ 1.5m (1/3 Oktavbänder 3150 +5000Hz)**

## FAZIT

Auf Grund der durchgeführten Messungen konnte festgestellt werden, daß die Outline-Quelle zum einen ungewöhnlich hohe Schall-Leistungspegel liefert, Sehr klein und leicht ist, und ein außerordentlich homogenes Schallfeld mit perfekter Kugel-Charakteristik liefert.

Die Quelle dürfte deshalb nach momentanem Stand der Technik die mit Abstand beste und leistungsfähigste Kugelschallquelle für den professionellen Einsatz im Bereich der Bauakustik darstellen.

Brescia, 1.3.2004

### Technische Ausführung

Edoardo Piana (engineer)	Giuseppe Pedersini (engineer)
--------------------------	-------------------------------

Wissenschaftliche Leitung  
Prof. Gian Paolo Beretta

### Bibliographie

UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI EN ISO 140 - Acoustic - Misurazione dell'isolamento acoustico in edifici e di elementi di edificio, 1999.

DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 52210 - Testing of acoustics in buildings; airborne impact and sound insulation, 1989.

ISO International Organization for Standardization. ISO 3382 - Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997.

AES (ANSI S.4.26-1984) - AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement, 1984.

University of Brescia. Studio, realizzazione ed analisi di una source sonora omnidirezionale - Tesi di Laurea, A.A. 2000/2001.

### Aus dem Englischen übersetzt durch:



#### **Schall- und Schwingungsmesstechnik Akustische Qualitätssicherungs-Systeme**

##### **Zentrale und Vertrieb Süd:**

Schalltechnik SÜD & NORD GmbH  
Nürnberger Straße 262  
93059 Regensburg  
Tel.: 0941/94 555 85  
Fax.: 0941/94 555 83

[www.schalltechnik-sued.de](http://www.schalltechnik-sued.de)  
[info@schalltechnik-sued.de](mailto:info@schalltechnik-sued.de)

##### **Vertriebsbüro Nord**

Schalltechnik SÜD & NORD GmbH  
Heckstraße 61  
45239 Essen  
Tel.: 0201/54 56 980  
Fax.: 0201/54 56 981

[www.schalltechnik-nord.de](http://www.schalltechnik-nord.de)  
[info@schalltechnik-nord.de](mailto:info@schalltechnik-nord.de)

© Copyright der deutschen Übersetzung: Schalltechnik SÜD & NORD GmbH, ([www.akustiktest.de](http://www.akustiktest.de))  
Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung gestattet.

Das Zertifikat einer Schallquellen-Einzelprüfung der Universität Brescia (nächste Seite), kann optional auch für Endkunden-Geräte angeboten werden.



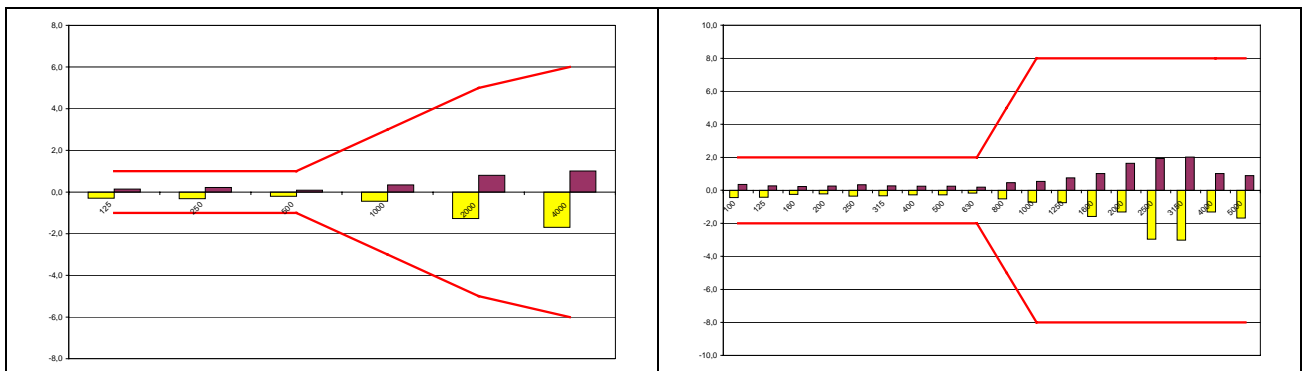
### STATEMENT OF CONFORMITY

It is hereby stated that the OUTLINE omnidirectional sound source model GSR Globe - Source - Wide Band Isotropic Radiator, **S/N: FACSIMILE** is in compliance with the characteristics defined according to the procedure and instruments indicated in the document "Study, realization and analysis of a variable directivity omnidirectional sound source" and satisfies the indicated Standards.

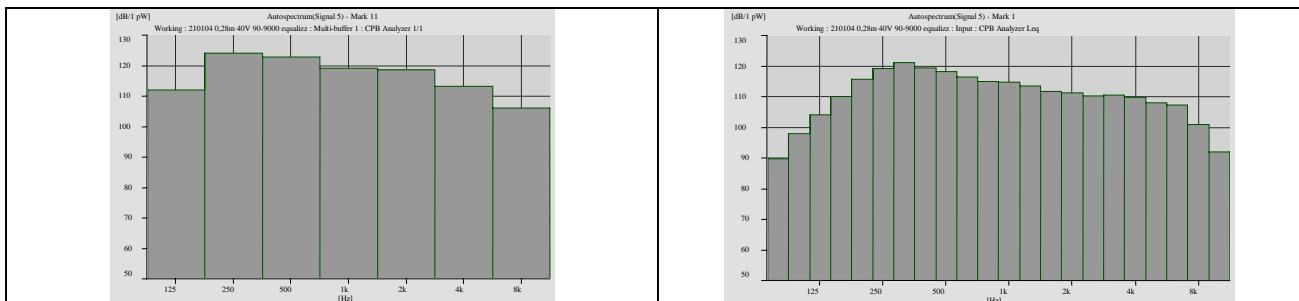
### TECHNICAL SPECIFICATIONS

- **Nominal impedance for each of 4 channels:** 4 Ohms
- **Operating frequency field:** 90 – 9000Hz
- **Power handling:** 128 dB re 1pW 90 – 900 Hz (Standard AES2-1984-(r1997))
- **Maximum sound power level:** (with two Outline EX 1500 twin-channel amplifiers, signal: pink noise 90 – 9000 Hz).
- **Broad band:** 130dB re 1 pW
- **Spectral:** Min. 98 dB re 1 pW in each 1/3-octave band
- **Connector:** Speakon Neutrik NL8
- **Diameter:** 310 mm
- **Weight:** 12.5 kg.

Frequency directivity index according to ISO 3382 and ISO 140 standards:



Maximum sound power levels at 1/1 octave and 1/3 octave (achievable with two Outline EX 1500 twin-channel amplifiers, or others with the same or better performance, fed pink noise equalized in the 90-9000 Hz band):



The source is in compliance with the following standards: ISO 140-3, ISO 3382, DIN 52210.

Brescia, 9<sup>th</sup> March 2004

Head of the Acoustic Laboratory  
Prof. Gian Paolo Beretta

Chief Technician  
Edoardo Piana