

Zeitrichtig, was ist das?



Kirchner elektronik



Die Lautsprecher
Analog.on Richtig
und
Analog.on Richtig S mit TQWT Gehäuse Subwoofer

Autor: Dipl.-Ing. Leo Kirchner

Inhaltsverzeichnis

1.	Der Begriff „zeitrichtig“	2
2.	Die Messungen	2
2.1	Die Sprungantwort	2
2.2	Die Sprungantwort aus dem Impuls abgeleitet	3
2.3	Die Sprungantwort aus Amplituden- und Phasenfrequenzgang berechnet	3
2.4	Die Sprungantwort mit dem Oszilloskop gemessen	6
2.5	Die Rechteckmessung	7
2.6	Die Sinus-Burst Messung	7
2.7	Der ATB Wasserfall	8
2.8	3D Step-Response	10
3.	Der Phasenausgleich	12
3.1	Das akustische Zentrum	12
3.2	Der gemessene Phasenausgleich	14
3.3	Der durch Hören ermittelte Phasenausgleich	17
4.	Der zeitrichtige Lautsprecher	19
4.1	Vergleich von zwei Lautsprecherkonzepten	19
4.2	Der Lautsprecher Richtig	22
4.3	Der Lautsprecher Richtig S	23

© 2007 Copyright Kirchner elektronik

1. Der Begriff „zeitrichtig“

Die Wiedergabe von Musik soll so unverfälscht wie möglich erfolgen. Dies bedeutet, dass bei der Übertragung Eingangss- und Ausgangssignal die gleiche Form besitzen. Ist diese Bedingung erfüllt entspricht die Wiedergabe dem Original.

Die Form eines Musiksignals, mit dem Oszilloskop gemessen, setzt sich aus den einzelnen Tönen und deren zeitlicher Zuordnung zusammen. Änderungen in der zeitlichen Zuordnung verändern auch die Signalform.

Der Amplitudenfrequenzgang zeigt uns ob die einzelnen Töne mit der richtigen Lautstärke, der Amplitude, wiedergegeben werden. Die wichtige Information der zeitlichen Zuordnung wird mit dem Phasenfrequenzgang gemessen.

Die Signalform bleibt nur identisch, wenn die Amplitude der Einzelfrequenzen und deren zeitliche Zuordnung nicht durch die Übertragung verändert werden. Bei der elektrischen Übertragung stimmen Amplituden- und Zeitverhalten. Beim Lautsprecher, der das elektrische in ein akustisches Signal wandelt, ist das Zeitverhalten fast immer schlecht. Da das Zeitverhalten für die Wiedergabe eine entscheidende Bedeutung besitzt, eignet es sich zur Beurteilung eines Lautsprechers.

Bei einer unverfälschten Wiedergabe sind die Form von Eingangss- und Ausgangssignal weitgehend identisch und der Lautsprecher besitzt die Eigenschaft „zeitrichtig“.

2. Die Messungen

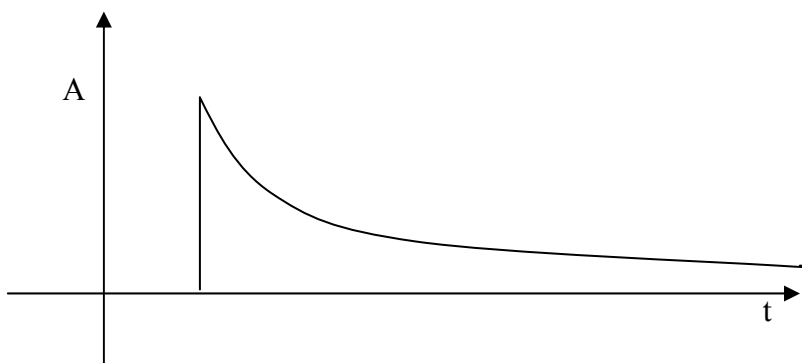
2.1 Die Sprungantwort

Die Sprungantwort zeigt das Zeitverhalten. Das Bild der Sprungantwort liefert wichtige Erkenntnisse über Amplitude und Phase. Es enthält alle wichtigen Informationen über die Eigenschaften einer Übertragungsstrecke.

Bild der Sprungantwort einer idealen Übertragungsstrecke



Sprungantwort des Lautsprechers



Das Signal steigt steil an und fällt exponentiell ab. Der Abfall entsteht durch den Strahlungswiderstand der Luft. Dieser hat eine differenzierende Übertragungsfunktion. Das Bild zeigt die Sprungantwort eines idealen Lautsprechers. Der steile Anstieg der Sprungantwort deutet auf eine hohe obere Grenzfrequenz hin. Bei einem linearen Frequenzgang fällt die Kurve exponentiell ab, wobei die untere Grenzfrequenz ist aus der Steilheit des Abfalls zu erkennen ist. Das Entscheidende bei der Messung ist aber die Aussage über das Phasenverhalten. Da die Sprungantwort nur einen Anstieg und Abfall zeigt, liegen alle Einzellautsprecher auf der akustischen Ebene und sind gleich gepolt. Auch ist die Phase des Lautsprechers linear. Übliche Lautsprecher zeigen je nach Anzahl der Einzelchassis mehrere Berge und Täler.

2.2 Die Sprungantwort aus dem Impuls abgeleitet

Viele günstige Messsystemen verwenden für die Messung ein Rauschsignal. Die Sprungantwort wird durch eine Mittelung der Impulsantwort dargestellt.

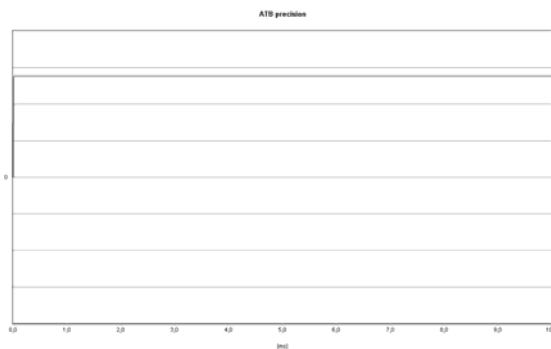


Bild 2.1

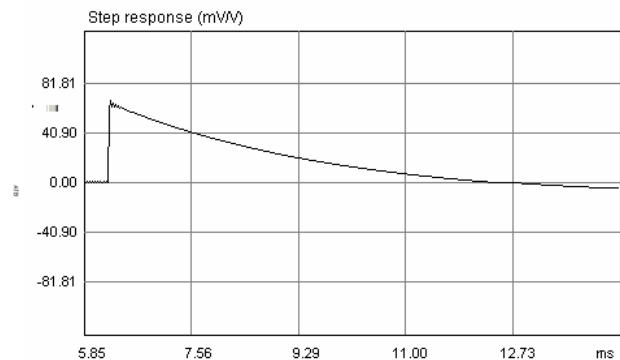


Bild 2.2

Das Bild 2.1 zeigt eine elektrische Messung der Sprungantwort. Diese zeigt die Reaktion eines Systems auf die sog. Sprungfunktion. Die Sprungfunktion beginnt bei Null und steigt sofort auf ihren Endwert (Bild 2.1). Bei dieser Testmessung ist der Ausgang des Messgeräts mit dem Eingang kurzgeschlossen und Sprungfunktion und Sprungantwort identisch.

Das Bild 2.2 zeigt die elektrisch gemessene Sprungantwort der MLS Messgerätes. Hier wird die Sprungantwort aus der Impulsantwort berechnet. Bei dieser Messung sind Sprungfunktion und Sprungantwort nicht identisch. Das Bild zeigt die Funktion vom Hochpass, der die tiefen Frequenzen unterdrückt. Der Übertragungsbereich des Tiefpasses ist von der Einstellung des Zeitfensters abhängig und nicht mehr eindeutig. Diese Messung ist eine Hilfsfunktion, die nicht der Definition der Sprungantwort in der Mess- und Regeltechnik entspricht.

2.3 Die Sprungantwort aus Amplituden- und Phasenfrequenzgang berechnet

die Sprungantwort kann auch aus dem Amplituden- und Phasenfrequenzgang einer Messung mit dem Rauschsignal berechnet werden.

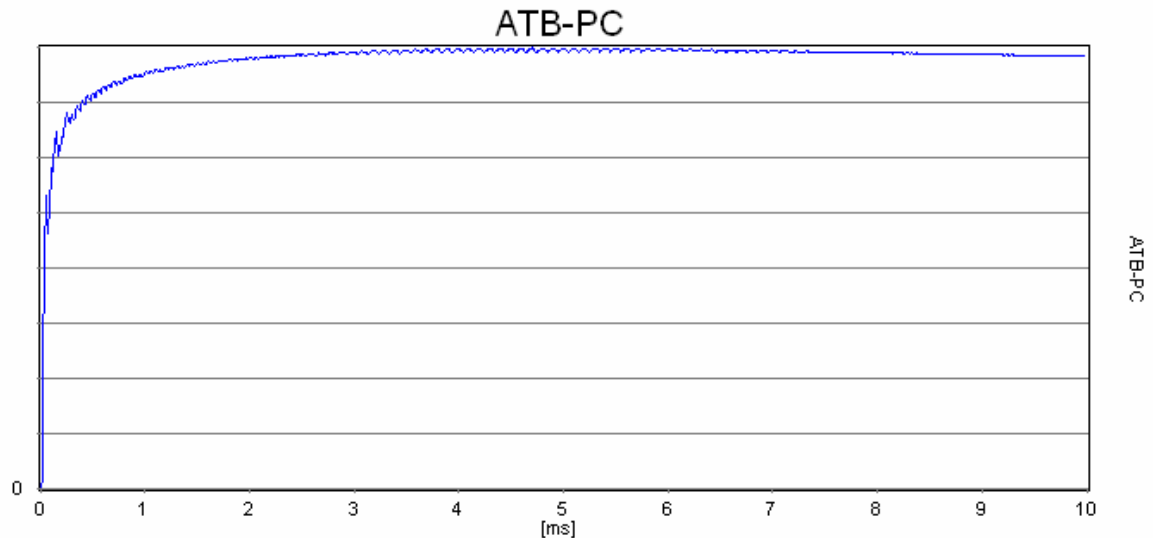


Bild 2.3

Bild 2.3 zeigt die Sprungantwort, hier Step genannt, wenn Aus- und Eingang des ATB PC kurzgeschlossen sind. Beim ATB PC wird die Sprungantwort aus Amplituden- und Phasenfrequenzgang berechnet. Dieses Verfahren ist richtiger als die MLS Messung, da die Hochpassfunktion nicht besteht. Der Anstieg der Kurve entspricht nicht ganz dem idealen Sprung, da die Frequenzen größer 20kHz im Signal fehlen. Dies ist für die Lautsprechermessung nicht bedeutend.

Beispiele für die Step Messung:

Die folgenden Bilder zeigen eine Lautsprecherkombination mit Mitteltöner und Hochtöner und deren zeitliches Verhalten zueinander mit dem Step gemessen werden.

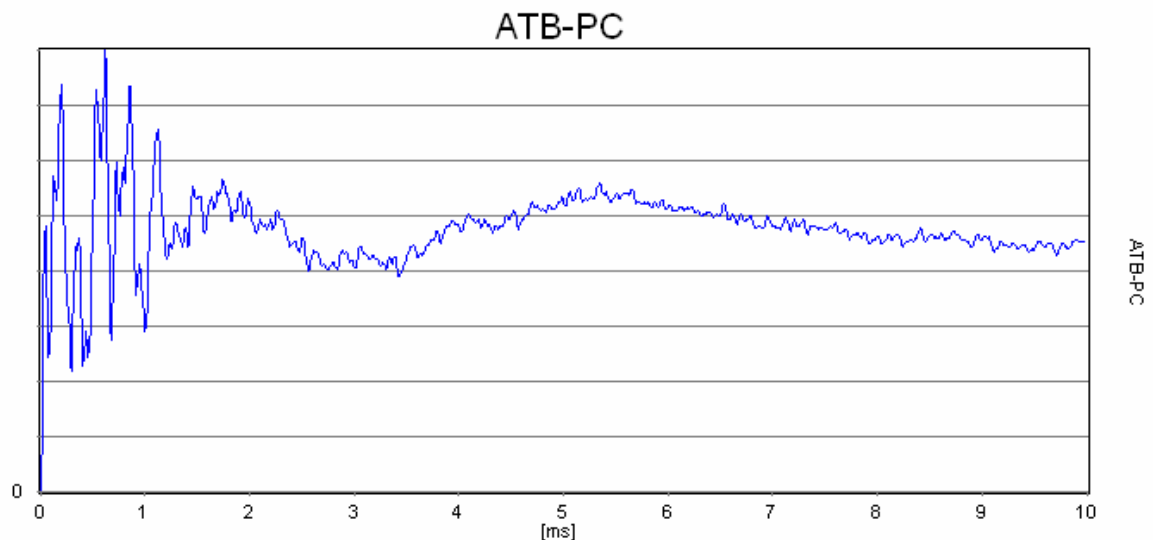


Bild 2.4

Hier liegt der Hochtöner hinter dem Mitteltöner. Der Mitteltöner muss verzögert werden

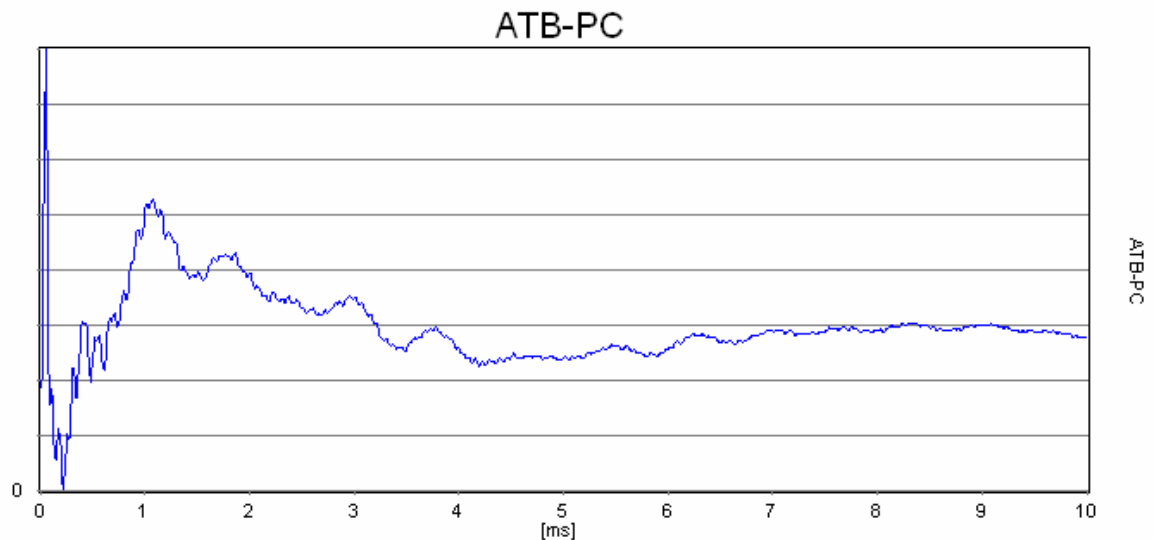


Bild 2.5

Hier liegt der Hochtöner vor dem Mitteltöner. Der Hochtöner muss verzögert werden.

In beiden Fällen wird der ungefähre Laufzeitunterschied als Strecke S in Metern gemessen und in die Laufzeit T in Sekunden umgerechnet.

Die Schallgeschwindigkeit c beträgt etwa 340m/s. Die Laufzeit T erhält man durch Division der Strecke mit der Schallgeschwindigkeit

$$T = S / c$$

Die Feineinstellung erfolgt mit der Step Messung.

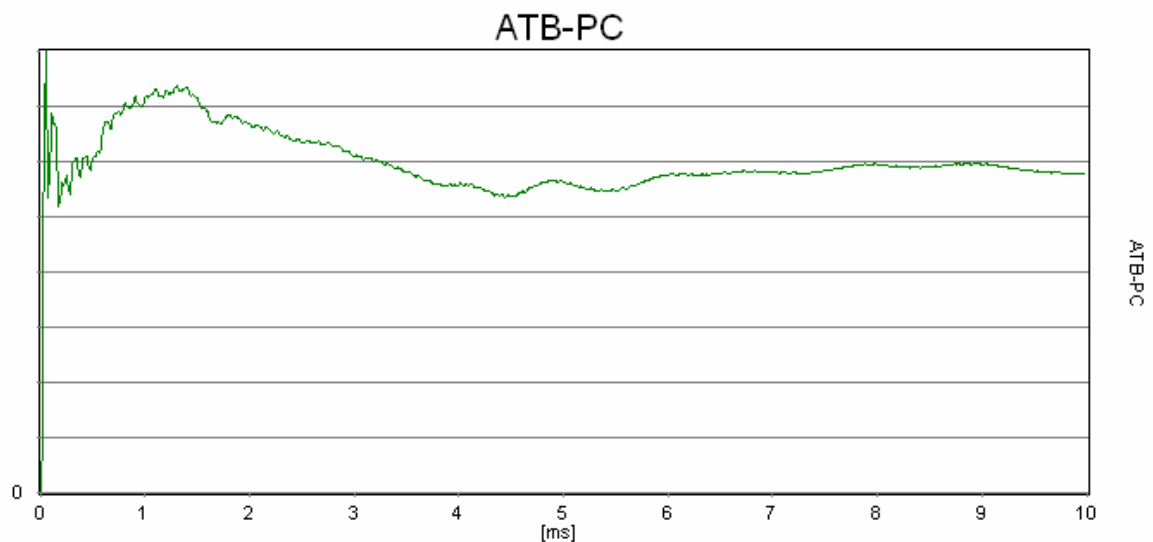


Bild 2.6

Bild 2.6 zeigt die beiden Lautsprecher mit korrektem Laufzeitausgleich. Beide Signale, das Vordere vom Hochtöner und das Folgende vom Mitteltöner besitzen die gleiche Amplitude und liegen eng zusammen. Die Weiche ist noch nicht optimiert. Dies zeigt der Einbruch zwischen der ersten Signalspitze und dem folgenden Signal des Tiefmitteltöners.

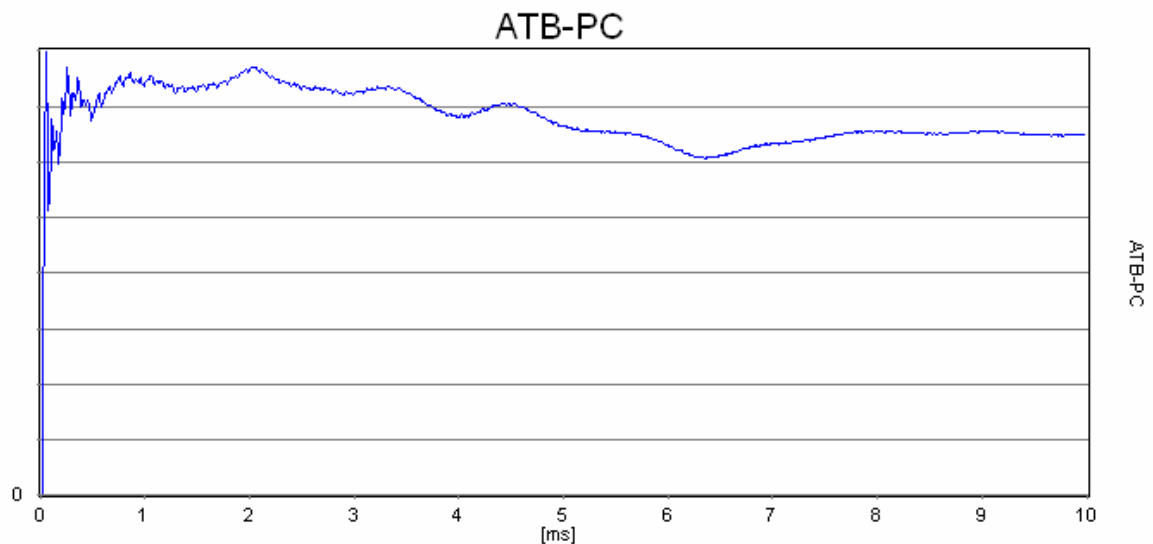


Bild 2.7

Bild 2.7 zeigt den Step eines zeitrichtigen Lautsprechers, der Analog.on Richtig. Das Signal steigt steil an. Nach einem geringen Einbruch ist der Tiefmitteltöner zu sehen. Bei diesem Lautsprecher ist die Weiche optimiert.

2.4 Die Sprungantwort mit dem Oszilloskop gemessen

Bei dem ATB precision wird die Sprungantwort mit der Sprungfunktion im Zeitbereich gemessen. Diese ist die physikalisch richtige Messung.

Beispiel für die Sprungantwortmessungen:

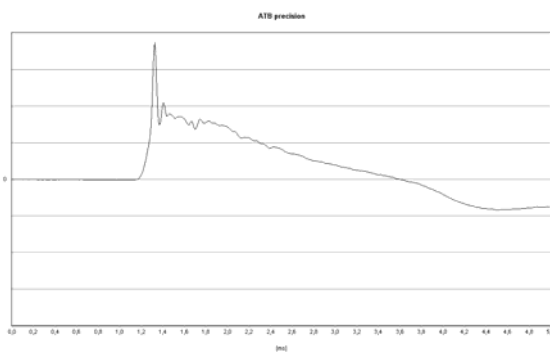


Bild 2.4

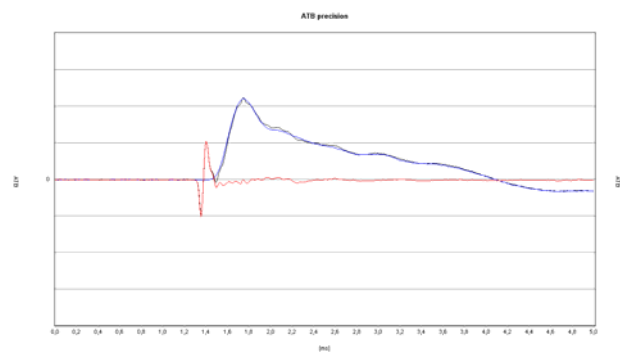


Bild 2.5

Bild 2.4 zeigt die vorbildliche Sprungantwort der Richtig. Das Signal steigt steil an und fällt nach einer Spitze gleichmäßig ab. Der Abfall entsteht durch die Hochpassfunktion der Lautsprecher.

Bild 2.5 zeigt die Sprungantwort eines nichtzeitrichtigen Lautsprechers. Das Sprung wird in drei Teilsignale zerstückelt.

2.5 Die Rechteckmessung

Zeitmessungen werden immer mit dem Oszilloskop durchgeführt. Ein bekannter Test ist die Messung des Rechteckverhaltens.

Der Lautsprecher wird mit einem Rechtecksignal angesteuert.

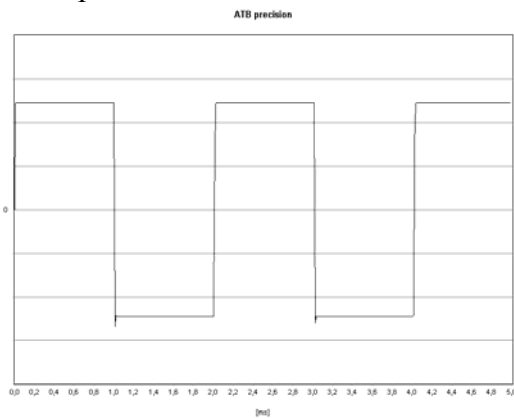


Bild 5.3

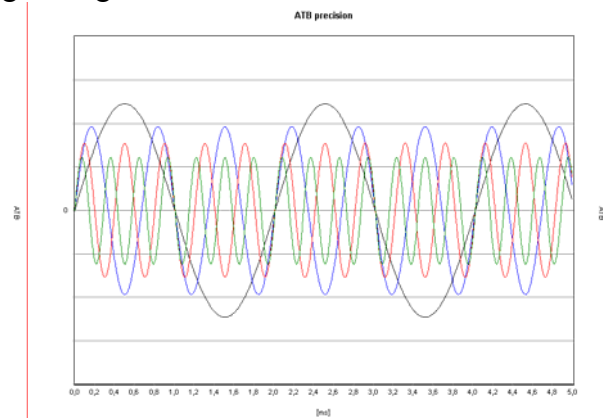


Bild 5.4

Bild 5.3 zeigt den zeitlichen Verlauf eines Rechtecksignals.

In Bild 5.4 wird gezeigt, dass das Rechtecksignal aus einer Überlagerung von Sinus-Schwingungen besteht. Es enthält die Grundschwingung=schwarz, und die ungeradzahigen Oberschwingungen 3=blau, 5=rot, 7=grün und weitere nicht gezeigte Oberschwingungen. Die Messung zeigt den eingeschwungene Zustand.

Beispiel für die Rechteckmessung

Richtig

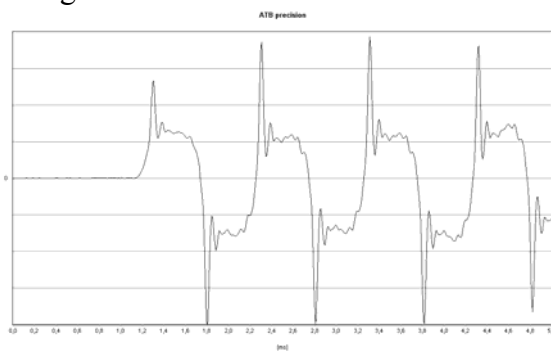


Bild 2.7

Demo

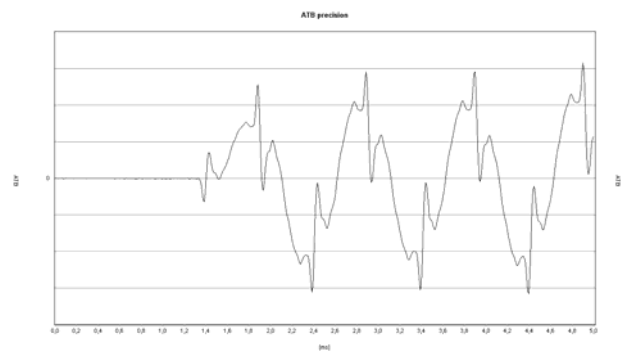


Bild 2.8

Bild 2.7 zeigt eine gute Wiedergabe des Rechtecksignals. Die Spitzen im Signal entstehen durch eine Resonanz des Messmikrofons, die oberhalb 20kHz liegt.

In Bild 2.8 ist kein Rechtecksignal zu erkennen.

2.6 Die Sinus-Burst Messung

Elektrische Zeitmessungen mit Sinus-Burst

Der Sinus-Burst eignet sich hervorragend, um die Eigenschaften einer Übertragungsstrecke für eine Frequenz zu zeigen. So kann das Verhalten einer Frequenzweiche gezielt bei der Grenzfrequenz ermittelt werden. Es wird ein langer Burst benutzt, da es hier auf das Einschwingverhalten ankommt.

Die 24dB Weiche des Beispiellautsprechers „Demo“ besitzt 4 Energiespeicher. Die 4 Energiespeicher sind ideal, um das Zeitverhalten der Weiche mithilfe einer elektrischen Messung zu zeigen.

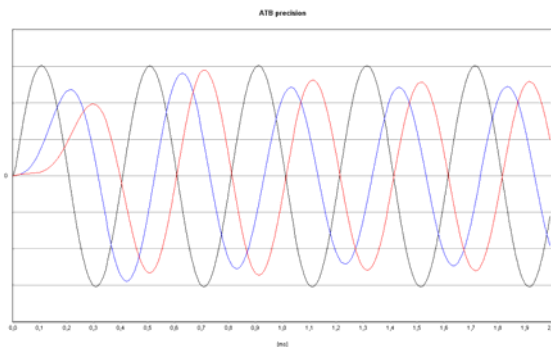


Bild 2.9

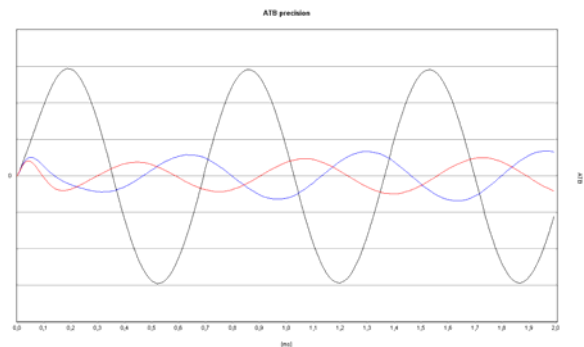


Bild 2.10

Bild 2.9 zeigt die Reaktion des Tiefpasses auf einen Sinus-Burst. Im Oszillogramm werden das Eingangssignal vom Verstärker (schwarz) das Signal zwischen den Spulen (blau) und das Signal am Ausgang des Filters (rot) gezeigt. Die blaue und die rote Kurve zeigen die Verzögerung des Signals durch die Energiespeicher. Die Verzögerung kann durch eine günstigere Anordnung der Lautsprecher ausgeglichen werden. Das Einschwingverhalten der Weiche verändert den Klang am meisten. Der Burst des Ausgangssignals (rote Kurve) fängt mit einer kleinen Amplitude an und schwingt dann mit einer überhöhten Amplitude über, um danach die Amplitude, die bei der Frequenzgangmessung gemessen wird, zu erreichen. Die niedrige Amplitude der ersten Halbwelle zeigt das schlechte Impulsverhalten. Ein kurzes Signal ist mit der ersten Halbwelle vergleichbar und wird entsprechend mit reduzierter Amplitude übertragen. Hierdurch geht im Übergangsbereich ein Teil der Signale verloren.

Das Bild 2.10 zeigt den Hochpass. Der Hochpass besitzt eine vorlaufende Phase, wie das Ausgangssignal (rot) zeigt. Durch die Stauchung des Signals am Anfang werden neue Frequenzen gebildet, auch Einschwingverzerrungen genannt.

Bei der 6dB Weiche der Richtig sind Verzögerung und Einschwingen kaum zu messen.

2.7 Der ATB Wasserfall

Der ATB Wasserfall wird mit dem Sinus-Burst gemessen. Dieses Verfahren entspricht dem des TEF Analyzers. Die Darstellung zeigt im Vergleich zu der bei einigen Messprogrammen üblichen FFT Methode das richtige Zeitverhalten. So kann auch das Einschwingen gezeigt werden.

Bei den Sinus-Burst Messungen wird nur eine Frequenz gezeigt. Um das Verhalten für einen Frequenzbereich zu zeigen, wird die 3D-Darstellung benutzt. Der Frequenzbereich wird in einzelne Frequenzen unterteilt. Für jede Frequenz wird eine Oszilloskop Messung durchgeführt. Die einzelnen Oszillogramme werden in einer Grafik gezeigt, deren Achsen folgende Bedeutung haben:

y-Achse = Amplitude, x-Achse = Frequenz und z-Achse = Zeit oder Periode.

Die Wasserfall Darstellung benutzt als Generator Signal den Cosinus-Burst und zeigt das Verhalten für den eingeschwingenen Zustand.

Der Wasserfall soll für die Beispielboxen gezeigt werden. Hierbei ist besonders das unterschiedliche Zeitverhalten interessant. Deshalb wird das Einschwingverhalten gezeigt.

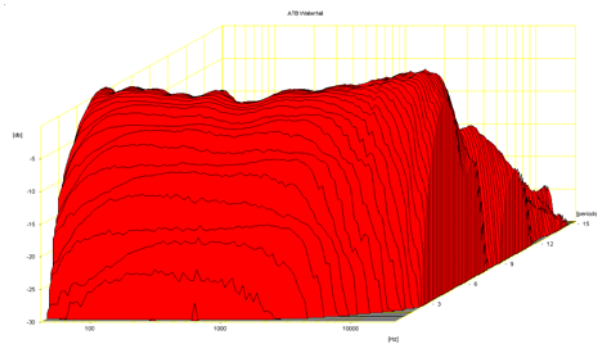


Bild 2.11

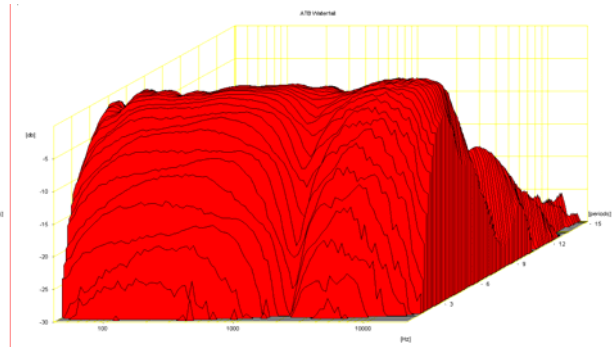


Bild 2.12

Der Lautsprecher Richtig zeigt in Bild 2.11 für fast alle Frequenzen das gleiche zeitliche Verhalten. Die Linien der gleichen Zeit laufen parallel. Im Hochtonbereich ab 10kHz tritt eine leichte Verzögerung durch den langsamer werdenden Hochtöner auf.

Der Lautsprecher Demo zeigt in Bild 2.12 bei der Übergangsfrequenz vom Mittel- zum Hochtöner eine starke zeitliche Verzögerung. Der Mitteltöner ist nicht an den Hochtöner angepasst. Der Einbruch führt auch, wie bei der elektrischen Sinus-Burst Messung gezeigt, zur Unterdrückung von kurzen Impulsen. Deshalb klingen die Mitten auch sehr sauber, weil die Anteile der Stimme oder die Obertöne von Instrumenten, die in den Bereich fallen, nicht richtig wiedergegeben werden. Der Hochtöner dagegen ist zeitlich ganz vorn und die Höhen werden dadurch sehr prägnant. Sie haben keine Verbindung zu den Mitten.

Das Ausschwingverhalten

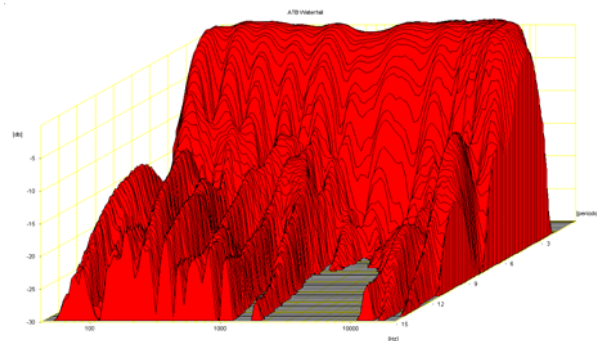


Bild 2.13

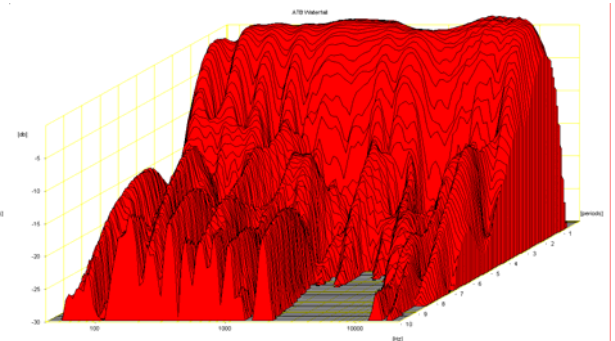


Bild 2.14

Auch das Bild 2.13 des Ausschwingverhaltens der Richtig zeigt den nicht zu erkennenden Übergang vom Mittel- zum Hochtöner. Es ist keine Beugung des Schalls an den Gehäusekanten zu erkennen. Durch die Rundung über dem Tiefmitteltöner werden die Beugungen in das Abstrahlverhalten des Lautsprechers einbezogen. Die Theorie hierzu kommt von den Hornlautsprechern. Diese lassen sich mit den Messungen des Wasserfalls hervorragend entwickeln.

Bild 2.14 zeigt das Ausschwingverhalten der Demo. Im Übergangsbereich ist eine zusätzliche Resonanz zu sehen. Hier stimmt das zeitliche Zusammenspiel der Signale von Tiefpass und Hochpass nicht.

In beiden Bildern sind für tiefe Frequenzen nach vorne laufende Gebirge zu sehen. Dies sind Reflexionen, die durch die für die Messung gewählte Aufstellung entstehen. In Bild 5.20 der Demo ist bei 2kHz noch ein zusätzliches Gebirge zu sehen. Dies ist, da beide Boxen mit genau der gleichen Aufstellung gemessen wurden, eine Reflexion der glatten Schallwand. Da

die akustisch optimierte Schallwand der Richtig diese Reflexion nicht zeigt, sollte das den Verfechtern der glatten Schallwand zu denken geben.

2.8 3D Step-Response

In der 3D Step-Response (Dynamic-Measurement) Messung wird das Verhalten des Lautsprechers im nicht eingeschwungenen Zustand gezeigt. Diese Messung ist sehr wichtig, um die Wiedergabe von Impulsen beurteilen zu können. Als Messsignal wird die Sinusschwingung mit halber Periodenlänge benutzt. Dieses Signal entspricht den Impulsen in der Musik.

Einschwingverhalten

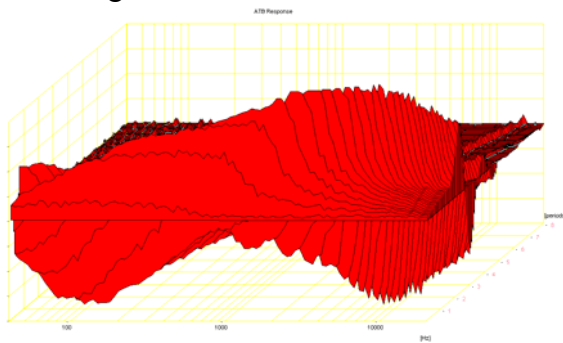


Bild 2.15

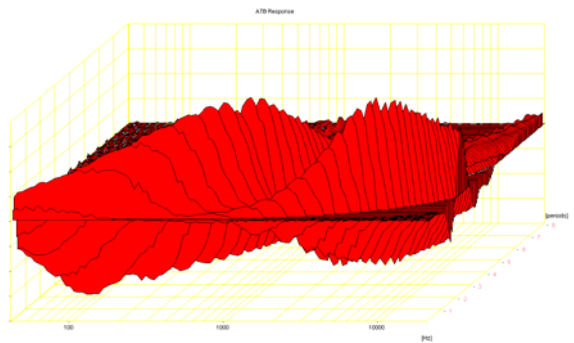


Bild 2.16

Die Bilder zeigen das Einschwingverhalten der beiden Lautsprecher.

Bei der Richtig im Bild 2.15 ist nur ein positiver Gebirgszug zu sehen. Dies bedeutet, dass alle Impulse zur gleichen Zeit übertragen werden. Die leichte Verzögerung für hohe Frequenzen stört nicht die gleichmäßige Wiedergabe. Das negative Gebirge zeigt das Durchschwingen. Es entspricht der Hochpassfunktion des Lautsprechers. Sie kann physikalisch nicht vermieden werden.

Bild 2.16 zeigt die Demo. Es ziehen sich zwei positive Gebirgszüge durch das Bild. Einer zeigt den Tieftöner und der andere den Hochtöner. Die Impulse im Bereich der Übergangsfrequenz werden erst vom Hochtöner und dann vom Mitteltöner übertragen.

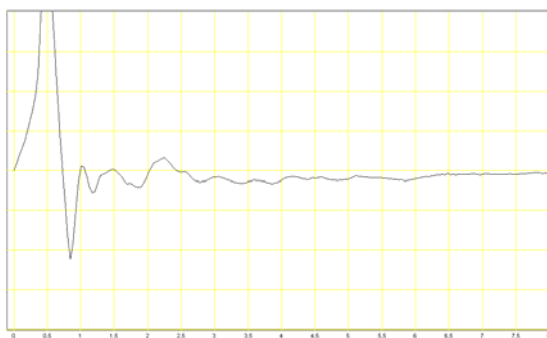


Bild 2.17

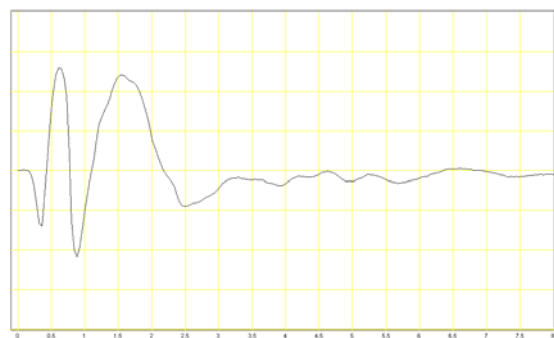


Bild 2.18

Die Bilder der Analysefunktion des Dynamic-Measurement Programms zeigt eine Scheibe aus dem 3D Bild der Demo. Die Frequenz beträgt 3700Hz. Das Bild 2.17 der Richtig zeigt nur einen Impuls mit einem leichten Durchschwingen. Das Bild 2.18 der Demo zeigt den zerstückelten Impuls. Das Einschwingen beginnt mit einer negativen Amplitude, gefolgt von einem positiven Überschwinger. Nach dem nächsten negativen Überschwinger geht das

Signal in die positive Amplitude des Mitteltöners über. Da beide Impulse zeitlich nicht zusammenpassen, zeigt das Bild eine Schwingung von doppelter Breite. Hierbei wird das Signal noch zusätzlich verfälscht.

Ausschwingverhalten

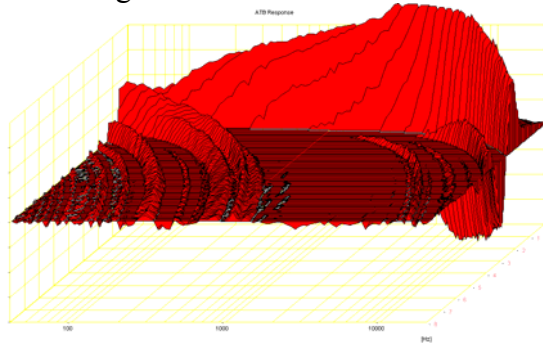


Bild 2.19

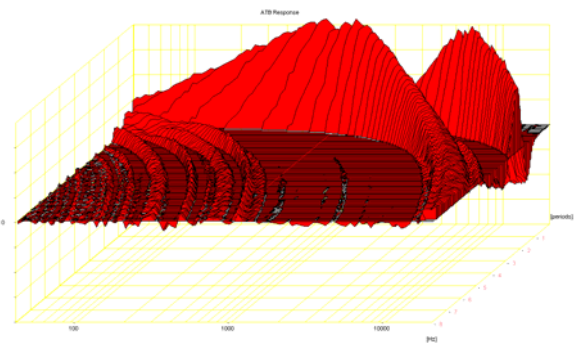


Bild 2.20

Bei den Bildern wird das Ausschwingverhalten der Lautsprecher gezeigt. Bild 2.19 zeigt die Richtig. Der Gebirgszug im Tieftonbereich zeigt den Schalldruck des Bassreflexrohres. Bei der Demo, Bild 2.20, ist noch deutlicher als in der Frontansicht, die Zerstückelung des Impulses zu erkennen. Der langgezogene Gebirgszug des Mitteltöners zeigt eine andere Eigenschaft der Weiche. Für hohe Frequenzen bildet sie mit dem Lautsprecher ein Resonanzsystem, das von Impulsen, die außerhalb des Übertragungsbereiches liegen, angeregt werden kann.

3. Der Phasenausgleich

3.1 Das akustische Zentrum

Ohne Weiche

Zum zeitrichtigen Aufbau einer Lautsprecherbox müssen die Phasenlagen der Chassis übereinanderliegen. Für die Simulationsprogramme muss das Akustische Zentrum, oder der Schallentstehungort (SEO), bestimmt werden.

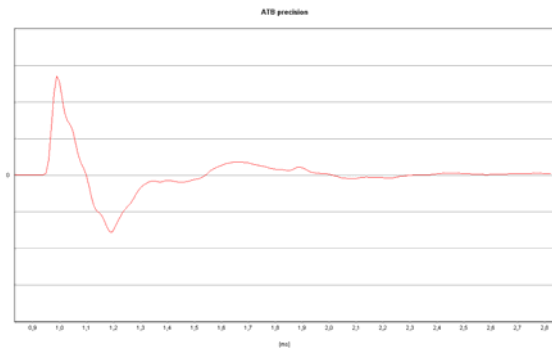


Bild 3.1 Sprungantwort vom Hochtöner
Aus der Sprungantwort lässt sich der Mikrofonabstand von 30,7cm errechnen.

Die rote Kurve in Bild 3.2 zeigt die Phase für den mit der Sprungantwort gemessenen Abstand von 30,7cm. Die grüne Kurve zeigt die für den SEO entscheidende Phasenlage um 0°. Diese wird mit dem korrigierten Abstand von 32,5cm gemessen. Zur Bestimmung des SEO wird die Entfernung von der Frontplatte des Hochtöners zum Mikrofon von dem Wert für den Abstand abgezogen.

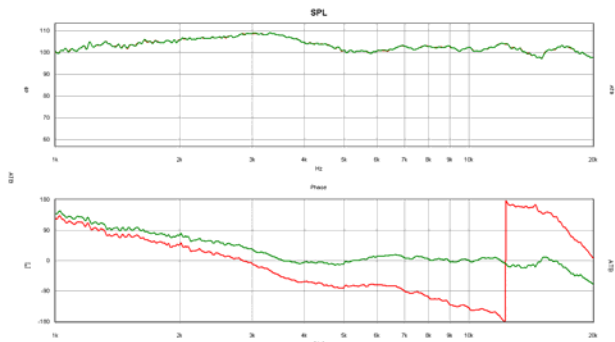


Bild 3.2 Akustische Phase
Phasenmessung mit verschiedenen eingestellten Mikrofonabständen.

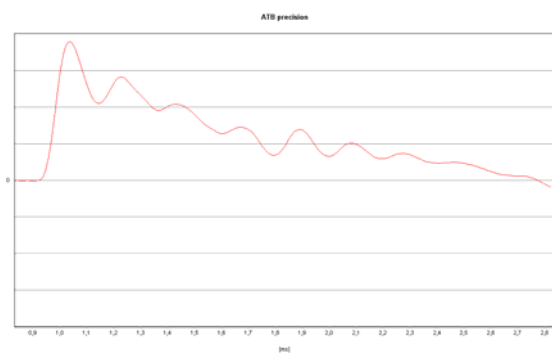


Bild 3.3 Sprungantwort des Tiefmitteltöners
Aus dem Bild wird der Abstand mit 39cm Ermittelt.

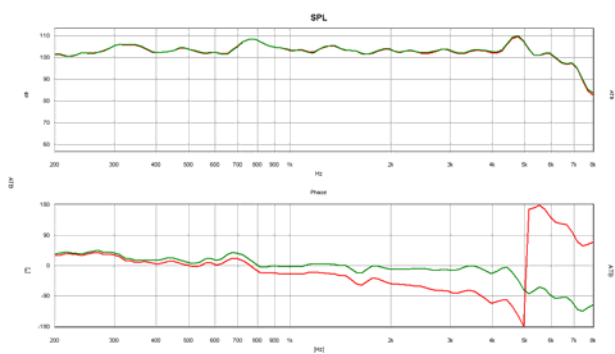


Bild 3.4 Akustische Phase.
Die rote Kurve zeigt die Phase entsprechend dem Abstand von 39cm. Die grüne Kurve zeigt den Phasenverlauf mit einem um den SEO korrigierten Mikrofonabstand von 41,5cm.

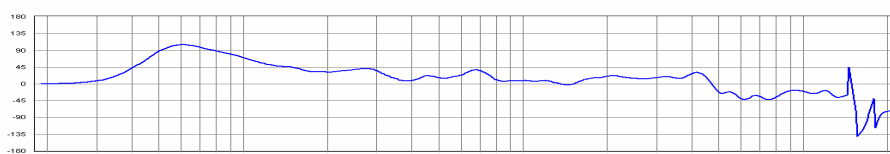


Bild 3.5 Akustische Phase des Tiefmitteltöners

Das Bild zeigt die akustische Phase des Tiefmitteltöners mit dem ATB PC Pro gemessen. Das Messprogramm berechnet, durch die Korrelation von Messsignal und gemessenem Signal, die Phase. Auf diese Weise wird das Messergebnis vom Abstand unabhängig. Dies bedeutet, dass

alle Anwender das gleiche Ergebnis bekommen und so die akustischen Phasenmessungen vergleichbar werden. Die Messung entspricht der, mit dem korrigierten Abstand, gemessenen Phase in Bild 3.4 (grüne Kurve).



Bild 3.6 Messaufbau

Das Bild zeigt den Messaufbau für die akustischen Messungen von zwei Lautsprechern. Die Mikrofonposition befindet sich zwischen dem Hochtöner und Tiefmitteltöner. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei dieser Position das Hörergebnis und die Messung übereinstimmen. Die Position vor dem Hochtöner gibt eine schönere Kurve, zeigt aber nicht den in den Raum abgestrahlten Schall.

Ohne Weiche

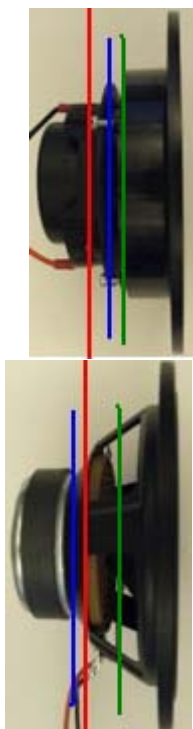


Bild 3.7 Anordnung
Die Striche zeigen die entscheidende Ebene: **Blau**=Schwingspule, **grün**=Abstand entsprechend Impuls, **rot**= Schallentstehungsort (SEO)

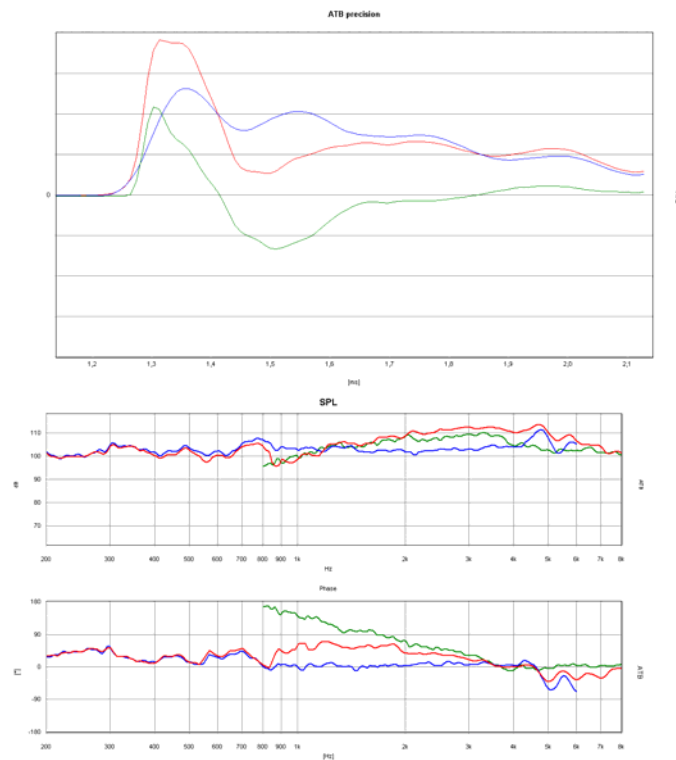


Bild 3.8 Sprungantwort, SPL und Phase
Kurvenfarben: **Grün**=Hochtöner, **blau**=Tiefmitteltöner, **rot**=Summe.
Die Sprungantwort zeigt, dass bei richtiger Phase die Abstände nicht gleich sind.

Mit Weiche

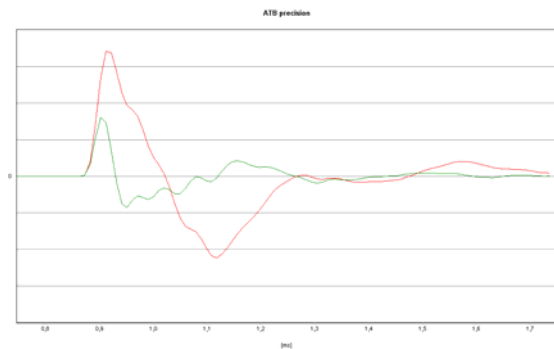


Bild 3.9 Sprungantwort Hochtöner
Die Messung des uneingeschwungenen zeigt mit und ohne Weiche den gleichen Abstand.

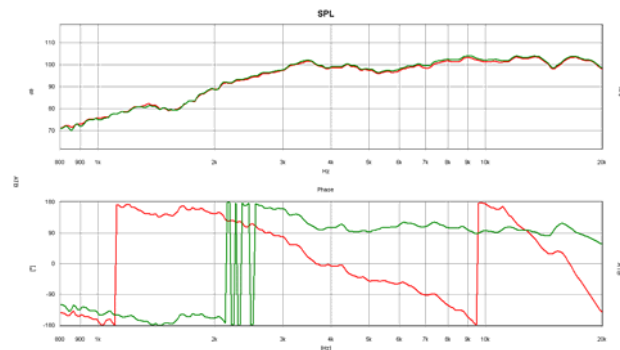


Bild 3.10 SPL und Phase mit Weiche
Bei der Phasenmessung wird im eingeschwungenen Zustand gemessen. Die rote Kurve zeigt die vorlaufende Phase des Hochpasses. Bei der grünen Kurve ist der Abstand um 2,8cm korrigiert.

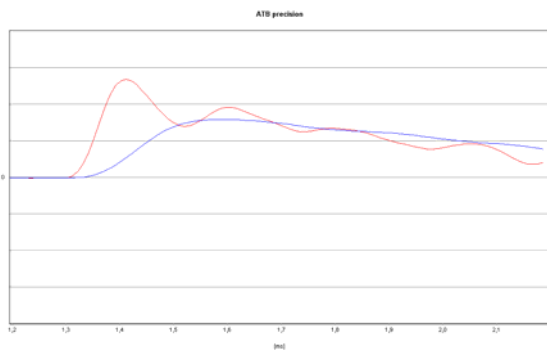


Bild 3.11 Sprungantwort Tiefmitteltöner
Bei dem Tiefpass ist eine leichte zeitliche Verzögerung durch die Weiche zu sehen.

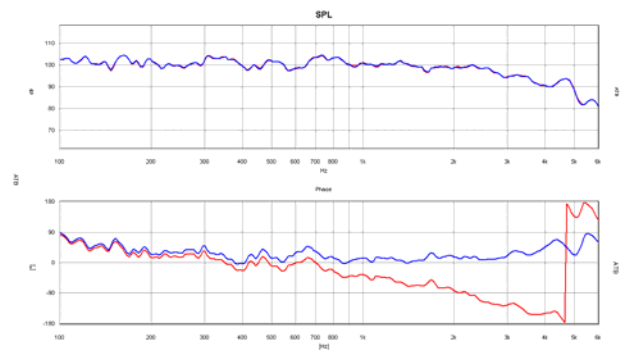


Bild 3.12 SPL und Phase mit Weiche
Die Differenz beim Abstand zwischen Sprungmessung und korrigierter Phase beträgt 4,5cm.

3.2 Der gemessene Phasenausgleich

In der vorherigen Beschreibung wurde nur der einzelne Lautsprecher betrachtet. Bei einer Lautsprecherkombination kann die richtige Signalform nur wiedergegeben werden, wenn die Lautsprecher der Kombination das gleiche Zeitverhalten besitzen. Dies wird durch den Phasenausgleich erreicht. Der Phasenausgleich kann, wie in dem Beispiel, durch eine räumliche Anordnung der Lautsprecher auf der Schallwand erreicht werden. Bei einer elektronischen Digitalweiche wird der Phasenausgleich durch ein Delay, erzeugt.

Aufbau zur Ermittlung des Phasenausgleichs:

Die beiden Lautsprecher werden an die Frequenzweiche angeschlossen. Die Polung ist gleich. Damit die Phasen übereinander liegen wird der Hochtöner nach vorn versetzt. Die Strecke besteht aus der halben Wellenlänge der Übergangsfrequenz.

Sie ergibt sich anhand folgender Formel:

$$\lambda = \frac{c}{f \times 2} = \frac{340\text{m}}{2500\text{Hz} \times 2} = 0,068\text{m} = 6,8\text{cm}$$

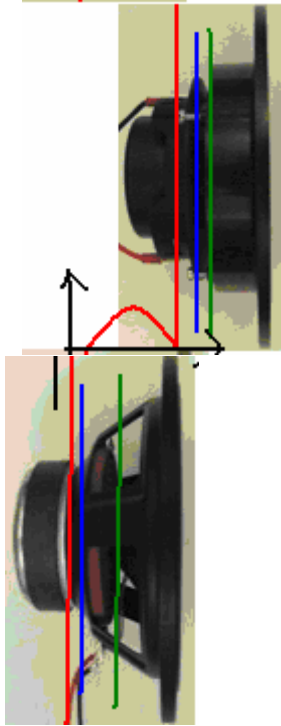


Bild 3.13 Anordnung
Bei dieser Anordnung befindet sich der Hochtöner weit vorn.

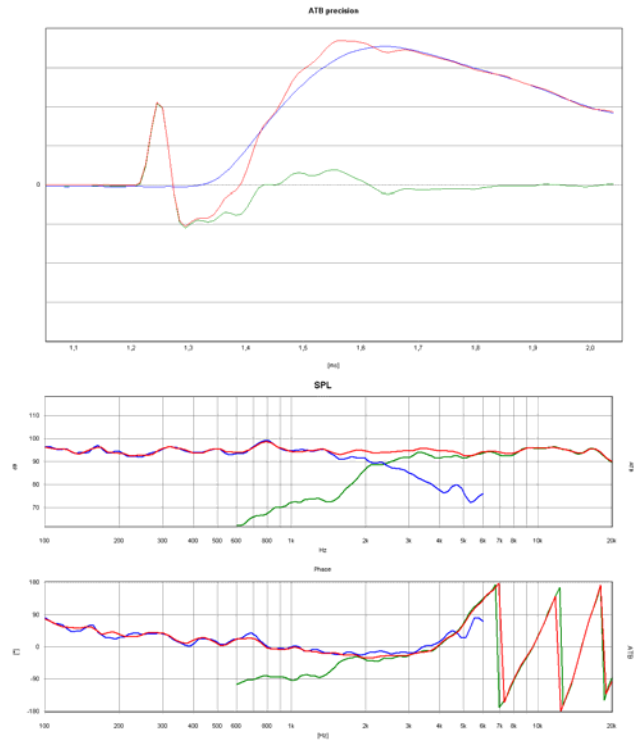


Bild 3.14 SPL und Phase
Die Sprungantwort zeigt, dass das Signal des Hochtöners weit vor dem Signal des Tiefmitteltöners liegt. So überlagern sich die beiden Signale ohne sich zu behindern. Die Phase ist sehr stark vorlaufend. Der Lautsprecher ist nicht zeitrichtig.

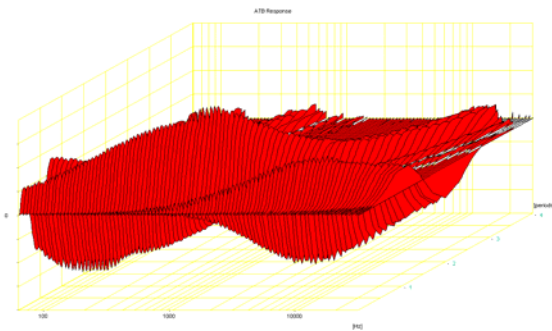


Bild 3.43 Dynamic-Measurement
Das Bild zeigt, zu welcher Zeit das Signal mit einer bestimmten Frequenz entsteht. Vorne wird das Hochtonsignal und dahinter das des Tiefmitteltöners gezeigt. Beide Signale sind zeitlich getrennt.

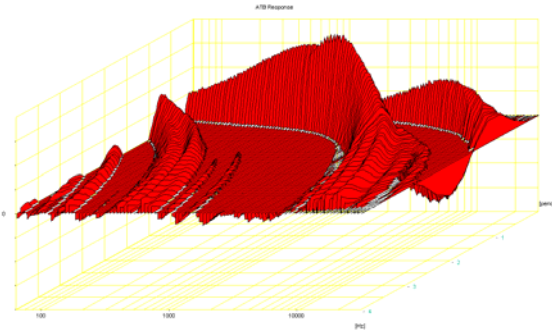


Bild 3.44 Dynamic-Measurement
Die Rückansicht zeigt das Ausschwingverhalten. Hier sind die zerstückelten Signale sehr schön zu sehen. Bei dieser Lautsprecheranordnung führt der Hochtonbereich ein Eigenleben.

Bei der folgenden Anordnung werden die Lautsprecher verpolt angeschlossen.

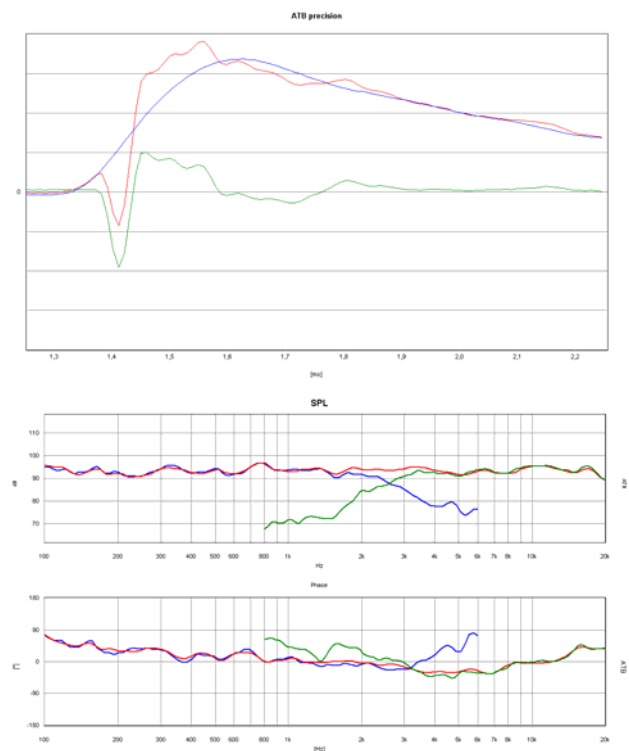
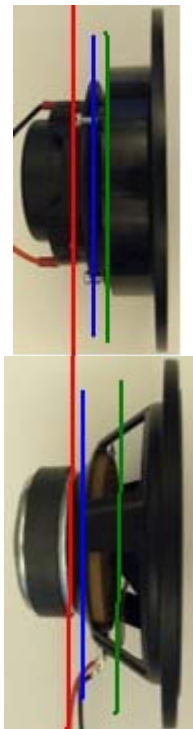


Bild 3.15 Anordnung
Die Striche zeigen die entscheidende Ebene: **Blau**=Schwingspule, **grün**=Abstand entsprechend Impuls, **rot**= Schallentstehungsort (SEO)

Bild 3.16 SPL und Phase
Kurvenfarben: **Grün**=Hochtöner, **blau**=Tiefmitteltöner, **rot**=Summe.
Die Sprungantwort zeigt die gute Überlagerung der Einzelsignale. Der Hochtöner ist verpolt. Die Phasen liegen im Übergangsbereich eng zusammen.

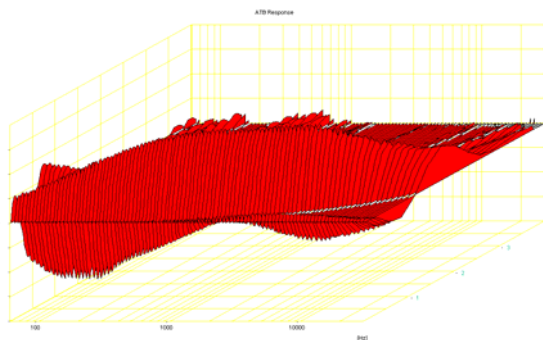


Bild 3.17 Dynamic-Measurement
Bei dem zeitrichtigen Lautsprecher wird ein weitgehend gleichmäßiges Gebirge für alle Frequenzen gezeigt. Im Hochtonbereich ist der verpolte Hochtöner an den negativen Gebirge zu erkennen.

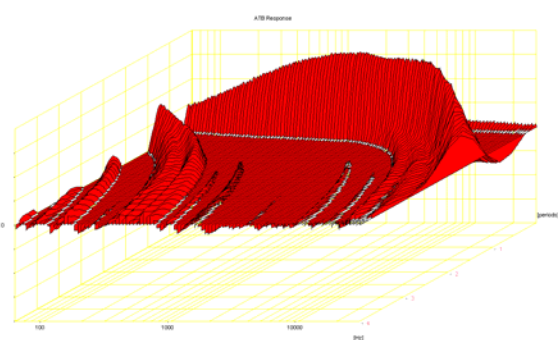


Bild 3.18 Dynamic-Measurement
Auch die Rückansicht der Messung zeigt exakte Wiedergabe. Das nach hinten verlaufende Gebirge im Tieftonbereich ist der Schall der Bassreflexöffnung.

Diese Lautsprecherkombination erfüllt die Anforderung an ein zeitrichtiges Verhalten nicht ganz.

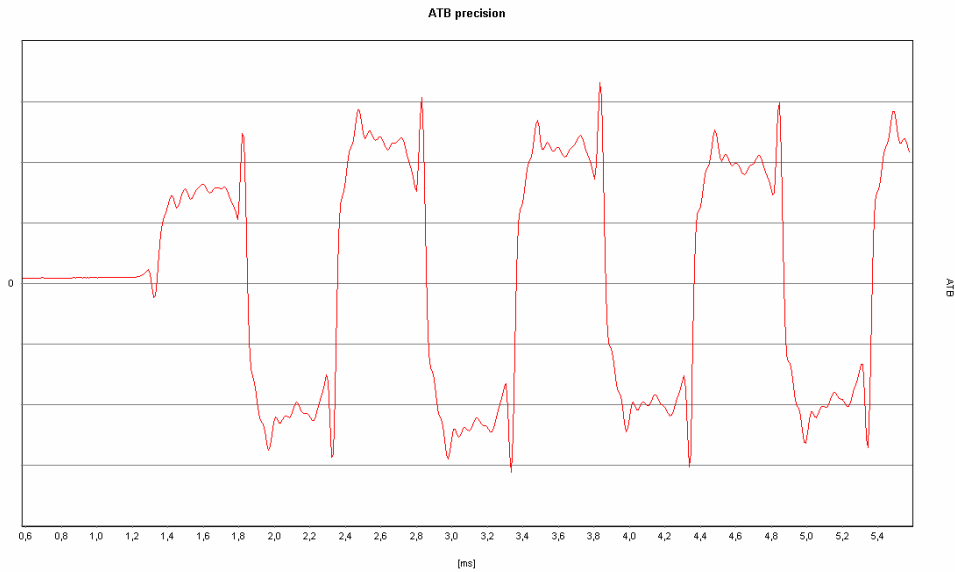


Bild 3.19 Rechteckverhalten bei 1kHz

Da Amplituden- und Phasenfrequenzgang linear sind, besitzt der entwickelte Lautsprecher auch ein gutes Rechteckverhalten. Der verpolte Hochtöner ist an der ersten Flanke zu erkennen. Diese entspricht nicht den folgenden Flanken.

3.3 Der durch Hören ermittelte Phasenausgleich

Bestimmung des Phasenausgleichs für optimales Zeitverhalten. Der Ausgleich berücksichtigt die akustischen Zentren der Lautsprecher sowie die Phasendrehung der Weiche.



Bild 3.20
Lautsprecher werden
in Probegehäuse
montiert

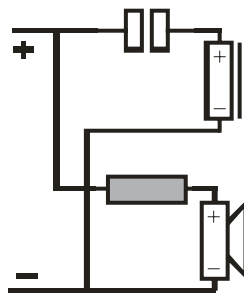


Bild 3.21
Die Lautsprecher werden mit
einer „6dB“ Weiche
angeschlossen

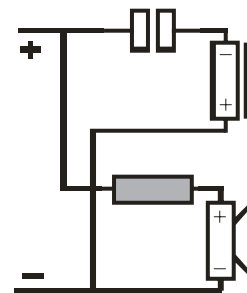


Bild 3.22
Der Hochtöner wird verpolt,
da bei gleicher Phase der
Ausgleich 9cm beträgt



Der Versatz des Hochtöners wird nach Gehör mit dem Pink Noise Signal (Track 7 der Auto-Test CD) ermittelt. Die Phase stimmt, wenn das Rauschen zwischen beiden Lautsprechern zu hören ist. Dann bilden die beiden Lautsprecher eine Schallquelle. Der Versatz kann auf den Millimeter genau bestimmt werden.

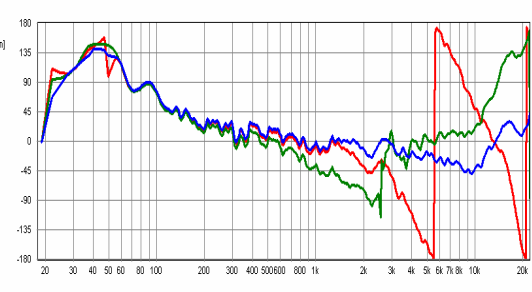
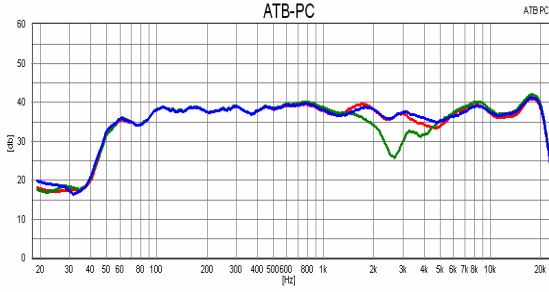
Zur Kontrolle des nach Gehör ermittelten Phasenausgleichs wird der Amplituden- und Phasenfrequenzgang gemessen.



1. Position, **rot**

2. Position, **blau**

3. Position, **grün**



Der Frequenzgang zeigt das Verschieben des Hochtöners

Die Phase 1. Position **rot** = nachlaufend
 2. Position **blau** = linear
 3. Position **grün** = vorlaufend

Dieser Lautsprecher ist nicht zeitrichtig. Durch die lineare Phase besitzt er gegenüber einer Kombination ohne Phasenausgleich aber große klangliche Vorteile in der räumlichen Abbildung.

4. Der zeitrichtige Lautsprecher

4.1 Vergleich von zwei Lautsprecherkonzepten

Zur Verdeutlichung des Zeitverhaltens werden zwei Lautsprecher mit gleicher Bestückung und Gehäusevolumen aufgebaut.



Bild 4.1 Richtig



Bild 4.2 Demo

Bild 4.1 zeigt den Lautsprecher „Analog.on Richtig“. Die Box wurde zur Demonstration des Dynamic-Measurement Programms entwickelt. Mit den Chassis der Richtig ist der Lautsprecher „Demo“ aufgebaut (Bild 5.2). Bei der Konstruktion wurden die Volumen des Richtig Gehäuses weitgehend übernommen. Dem Stand der Lautsprechertechnik entsprechend wurde eine ebene Schallwand verwendet. Die Weiche folgt der Theorie von Linkwitz mit 24dB-Filtern.

Richtig

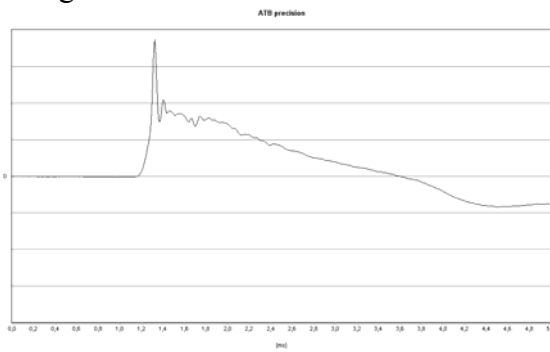


Bild 4.3

Demo

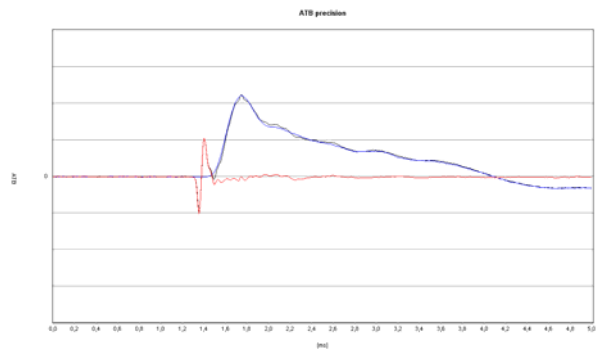


Bild 4.4

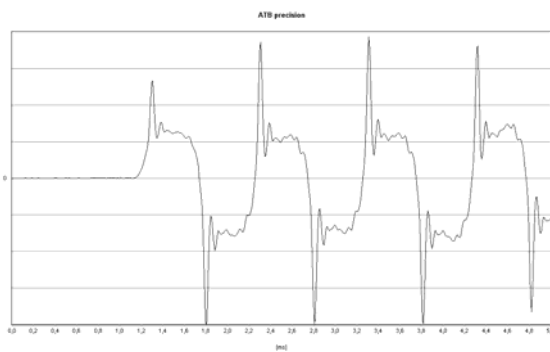


Bild 4.5

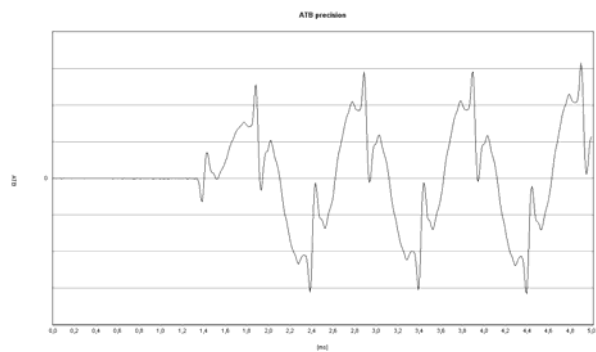


Bild 4.6

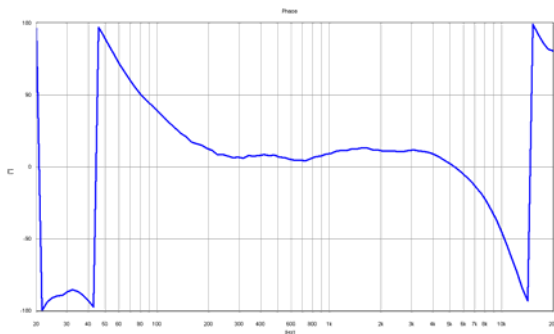


Bild 4.7

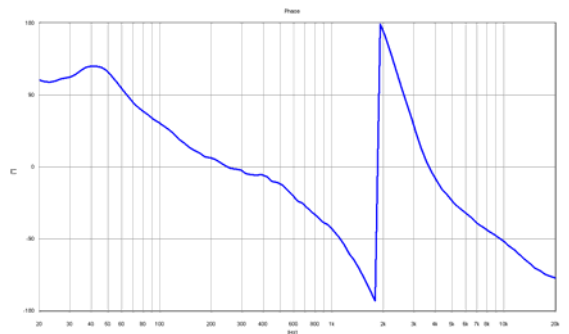


Bild 4.8

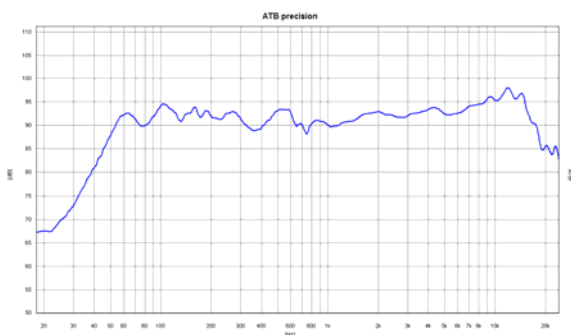


Bild 4.9

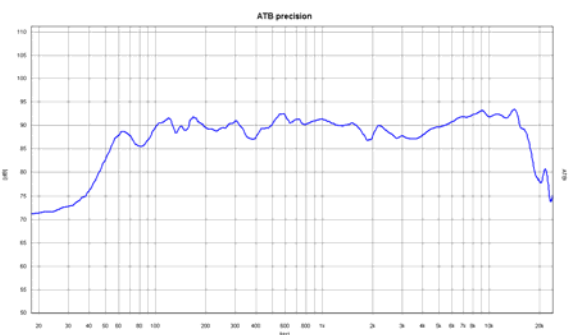


Bild 4.10

Die Richtig zeigt eine fast ideale Sprungantwort (Bild 4.3). Die Sprungantwort der der Demo, Bild 4.5, zeigt die zeitliche Trennung von Hoch- und Mitteltöner. Der Hochtöner kommt zuerst (rot). Der Mitteltöner folgt danach (blau). Die schwarze Kurve der Systemsprungantwort ist wegen der Genauigkeit der Messung nicht mehr zu sehen, die Kurven liegen genau übereinander.

Das Rechteckverhalten der Richtig (Bild 4.5) sieht gut aus. Die Einzelschwingungen des Rechtecksignals werden zur gleichen Zeit übertragen. Dies zeigt die lineare Phase (Bild 4.7). Die Spitzen am Anfang der Rechteckschwingungen zeigen die Überhöhung des Frequenzgangs bei 15kHz (Bild 4.9). Bei der Demo (Bild 4.6) ist kein Rechteck zu erkennen. In Bild 4.8 wird dies auch durch die starke Phasendrehung ersichtlich. Die Wasserfall und 3D Step Response Messungen werden in den Kapiteln 2.6 und 2.7 gezeigt.

4.2 Der Lautsprecher Richtig

Der Lautsprecher "Richtig" ist der Lautsprecher mit dem als absolut betrachteten Zeitverhalten. Dies wird durch die vorher gezeigten Messungen dokumentiert. Nach einem sehr guten Test in der „Klang+Ton“ 4/2004 hat der Lautsprecher seinen Weg in die kleineren Tonstudios gefunden. Eine Kopie ist auch in den USA bei einem großen Studio Ausrüster zu bekommen.

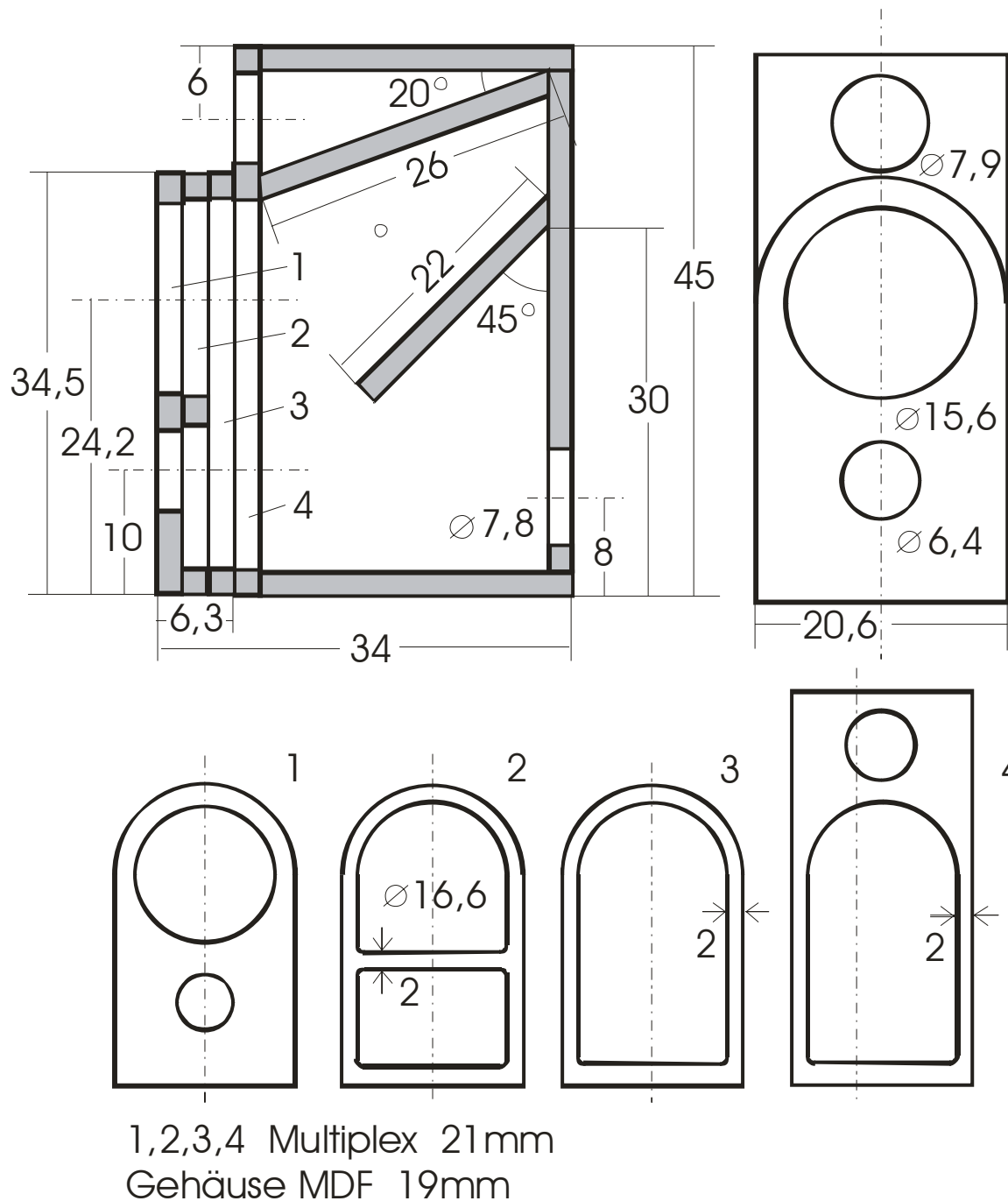


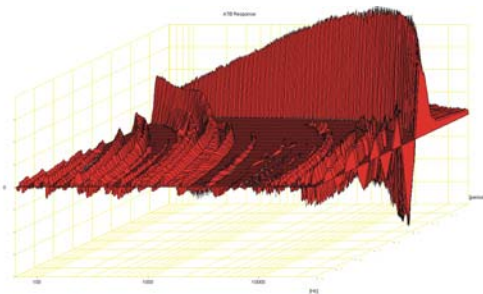
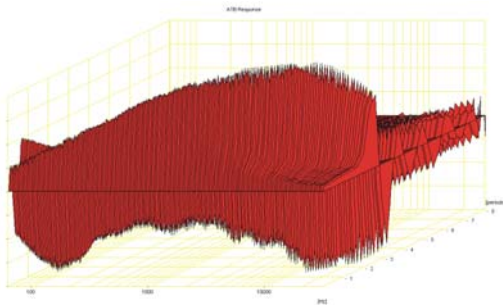
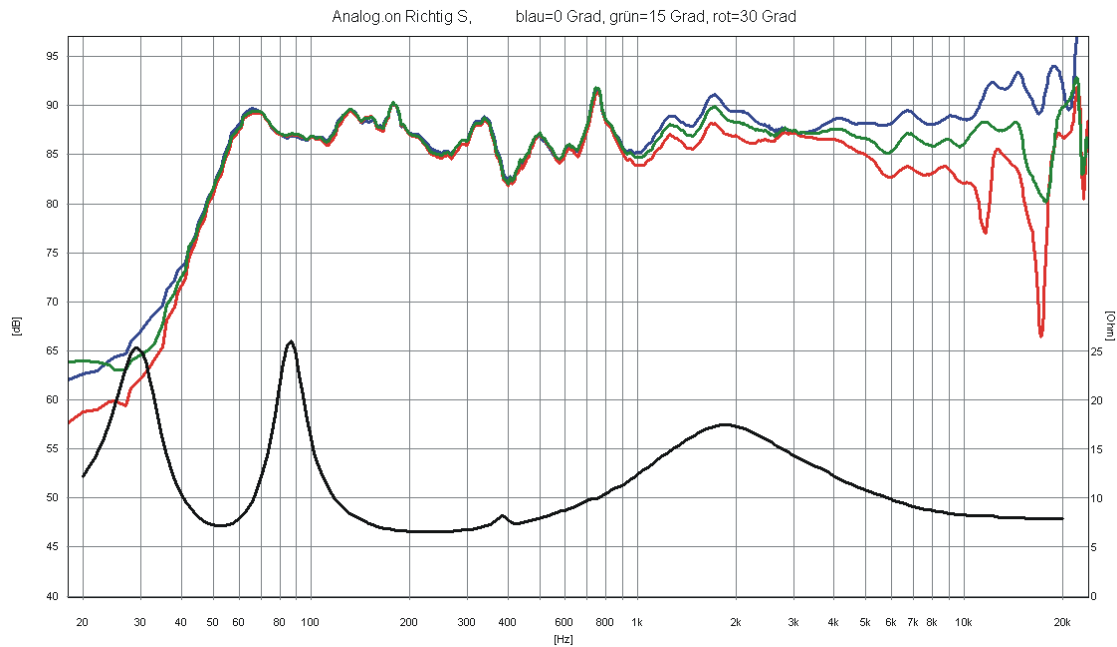
Bild 4.21 Gehäusebauplan

Die Bestückung besteht aus einem 17cm Tiefmitteltöner 170 C 35 mit Sandwich-Kohlefaser Membran und Neodym Magnet.

Der Hochtöner ist der Fifa 9BGS 119/8

4.3 Der Lautsprecher Richtig S

Der Lautsprecher Richtig S (small) ist eine Weiterentwicklung der Analog.on Nugget. Der Lautsprecher besitzt die natürliche und räumliche Wiedergabequalität der Richtig. Die Bestückung mit dem W 130AL und dem Hochtöner FR88EX klingt sehr harmonisch und ausgeglichen. Der Hochtonbereich ist durch den Breitbandlautsprecher mit der Grenzfrequenz von 26kHz ein Highlight.



Richtig S, Sprung

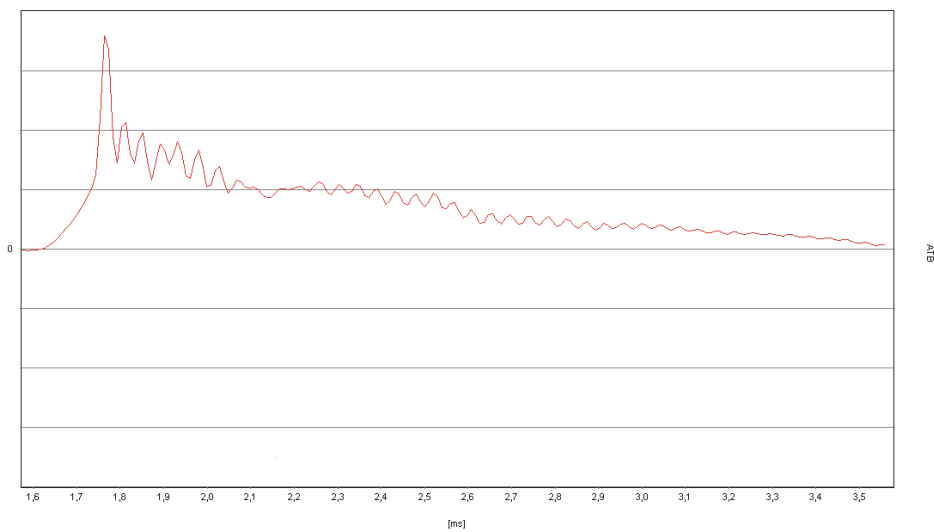


Bild 4.22 Messungen der Richtig S: Frequenzgang, Dynamic-Measurement und Sprungantwort

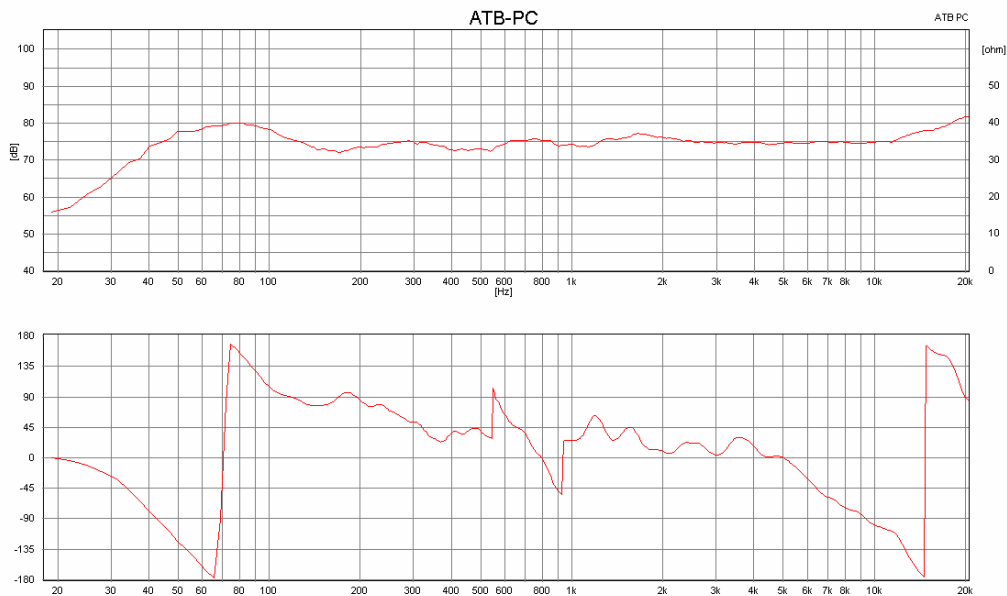


Bild 4.23 Richtig S mit Subwoofer im Raum.

Bild 4.23 zeigt die Richtig S mit Subwoofer im Raum gemessen. Die leichte Überhöhung im Tieftonbereich kommt der Hörgewohnheit entgegen. Zu beachten ist, dass die Überhöhung sehr breitbandig ist. Im Unterschied zur Bassreflex-Konstruktion besteht keine ausgeprägte Resonanz, die zusammen mit den Raummoden das Klangbild zerstört. Bei TQWT Gehäusen mit entsprechender Bassabstimmung, die keine ausgeprägte Resonanz besitzen, ist die Wiedergabe weniger raumabhängig.

Der Phasenfrequenzgang zeigt auch im Raum eine gleichmäßige Charakteristik. Der Sprung bei 70Hz entsteht durch die Darstellung im Bereich von $\pm 180^\circ$. Bei der Kurve vor 70Hz werden $+360^\circ$ addiert. Der Phasensprung bei 700Hz entsteht durch die Reflexion von der Seitenwand des Raums. Der Abfall oberhalb von 5kHz ist nicht bedeutend, da bei diesen Frequenzen das Ohr die Phasenabweichung nicht mehr gut auflösen kann.