

Dipl.-Ing. Leo Kirchner

## LAUTSPRECHER MESSTECHNIK

Ich danke meinen Mitarbeitern  
für die Unterstützung bei den Messungen:

Ralf Freymuth  
Jürgen Knoop  
Michael Borowski  
Sandor Finn

© 2007 by Kirchner elektronik  
Dipl.-Ing Leo Kirchner, Braunschweig

Alle Rechte vorbehalten

1.	DIE ÜBERTRAGUNGSFUNKTION .....	3
2.	DIE MESSSIGNALE.....	5
3.	DIE MESSUNGEN.....	7
3.1	SINUS-STEP.....	7
3.2	SINUS-SWEEP.....	8
3.3	MULTISINUS.....	8
3.4	MLS.....	11
4.	RAUMUNABHÄNGIGE LAUTSPRECHER MESSUNG .....	14
4.1	DIE ZEITFENSTERMESSUNG .....	14
4.2	DIE NAHFELDMESSUNG .....	17
4.3	DIE GRENZFLÄCHENMESSUNG .....	19
5.	DAS ZEITVERHALTEN .....	20
5.1	DIE FREQUENZWEICHE.....	20
5.2	DIE SCHALLWELLEN IM LAUTSPRECHERGEHÄUSE.....	28
5.3	DIE DIGITALWEICHEN.....	32
W1.	DAS ATB PRECISION WASSERFALLDIAGRAMM .....	37
W2.	GRUNDBEGRIFFE DER FFT .....	39
W3.	MULTISINUS MESSUNGEN DES ATB PRECISION .....	43
W4.	DIE PHASE.....	44
W4.1	GRUNDLAGEN .....	44
W4.2	Die PHASE BEIM LAUTSPRECHER.....	46
W4.3	DARSTELLUNG DER PHASE .....	47
W4.4	ELEKTRISCHE PHASENMESSUNG .....	48
W4.5	AKUSTISCHE PHASENMESSUNG .....	48
W5.	DYNAMIC-MEASUREMENT .....	50

# 1. DIE ÜBERTRAGUNGSFUNKTION

Das Ziel der HiFi Technik ist eine möglichst genaue Wiedergabe einer Aufnahme oder Übertragung. Damit die Beurteilung des Klanges nicht rein subjektiv erfolgt, wird die Messtechnik zur objektiven Beurteilung angewandt.

In der Messtechnik werden die Eigenschaften einer Übertragungskette dargestellt. Bei der Lautsprecher Messtechnik besteht die Übertragungskette aus dem Lautsprecher und gemessen wird der Schalldruck. Aus dem Schalldruck wird die Übertragungsfunktion ermittelt und als Amplituden- und Phasenfrequenzgang dargestellt. Die Frequenzgänge beschreiben die Übertragungsfunktion vollständig. Die Funktion  $F$  zeigt das Verhältnis einer Ausgangsgröße zu der Eingangsgröße. Bei der einfachsten Übertragungsfunktion haben Ausgangs- und Eingangsgröße die gleiche Eigenschaft und das Verhältnis ist eine frequenzunabhängige Konstante. Dies ist im hörbaren Frequenzbereich bei einem Verstärker gegeben. Die Übertragungsfunktion ist dann die Verstärkung  $V$ .

$$F = \frac{U_A}{U_E} = V$$

Beim Lautsprecher ist die Eingangsgröße die Spannung  $U$  und die Ausgangsgröße der Schalldruck  $P$ .

$$F = \frac{P}{U}$$

Der Lautsprecher wird mit einem Wechselstrom angesteuert, um Töne erzeugen zu können. Deshalb muss die Übertragungsfunktion den Wechselstrom beschreiben. Der Wechselstrom  $U_{(t)}$  besteht aus einer Sinusschwingung mit der Amplitude  $\hat{U}$  und der Phase  $\alpha$

$$U_{(t)} = \hat{U} \cos(\omega t + \alpha)$$

Die Wechselstromrechnung erfordert die komplexe Rechnung mit der komplexen Zahl  $Z$ , die aus dem Realteil  $a$  und dem Imaginärteil  $b$  besteht.

$$Z = a + jb$$

Das Ergebnis ist der Betrag von  $|Z|$ , beim Lautsprecher der Frequenzgang

$$|Z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

und die Phase  $\varphi$ , beim Lautsprecher die akustische Phase

$$\varphi = \arctan \frac{b}{a}$$

Soll die durch die Übertragungsfunktion der stationäre oder eingeschwungene Zustand und gleichzeitig der nicht eingeschwungene Zustand, das Einschwingverhalten, beschrieben werden, wird mit der Laplace-Transformation gerechnet.

Als Beispiel für die Übertragungsfunktion entsprechend der Laplace-Transformation wird die Übertragungsfunktion eines Lautsprechers gezeigt. Das Verfahren stammt aus der Regelungstechnik.

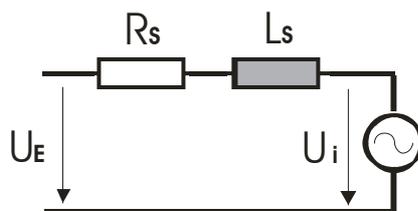


Bild 1.1

Das Bild 1.1 zeigt die Ersatzschaltung für den Lautsprecher.

$$\frac{P}{U} = F_{(p)} = \frac{v_1 T_1 p}{(T_1 p + 1) \left( \left( \frac{p}{\omega_0} \right)^2 + 2D_0 \frac{p}{\omega_0} + 1 \right) + T_2 p} * \frac{v_s (T_s p)^2}{(T_s p + 1)^2}$$

$$T_1 = \frac{L_s}{R_s} \quad T_2 = \frac{(Bl)^2}{R_s C} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}} \quad D_0 = \frac{b}{2\sqrt{Cm}} \quad v_1 = \frac{1}{Bl} \quad T_s = \frac{r}{c_0} \quad v_s = \rho c_0$$

$R_s$  = Schwingspulenwiderstand,  $L_s$  = Schwingspuleninduktivität

$Bl$  = Antriebsfaktor,  $m$  = dynamische bewegte Masse,

$C$  = Federsteife,  $b$  = Dämpfung

$c_0$  = Schallgeschwindigkeit,  $\rho$  = Dichte der Luft,

$$r = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad a = \text{Lautsprechermembranradius}$$

Bild 1.2

Die Formel in Bild 1.2 beschreibt die Übertragungsfunktion des Lautsprechers ohne die Partialschwingungen der Lautsprechermembran. Mit der Formel kann das Verhalten des Lautsprechers für einen großen Frequenzbereich berechnet werden.

Die Formel zeigt das Verhalten eines einzelnen Lautsprechers. Bei einer Lautsprecherkombination mit Frequenzweiche wird die Berechnung der Übertragungsfunktion sehr aufwendig. Bei einer Lautsprecher Box ist eine Messung die einfachere Lösung zur Ermittlung der Übertragungsfunktion.

Auch die Berechnung der Frequenzweiche ist ohne Messung nicht möglich. Erst wenn das CAD Programm mit der Übertragungsfunktion des Lautsprechers rechnet, ist das Ergebnis aussagefähig. Die Übertragungsfunktion wird durch den Amplituden- und Phasenfrequenzgang des Schalldrucks sowie den Amplituden- und Phasenfrequenzgang der Impedanz in das Programm eingegeben.

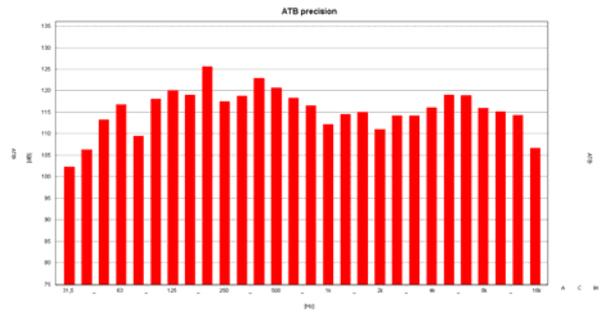
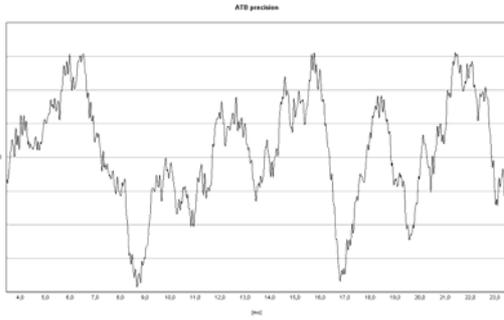
Um die Übertragungsfunktion des Lautsprechers zu messen, wird der Lautsprecher mit einem elektrischen Signal angeregt.

Messergebnis = Übertragungsfunktion x Anregung

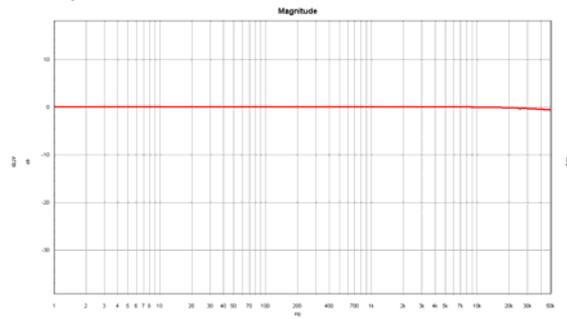
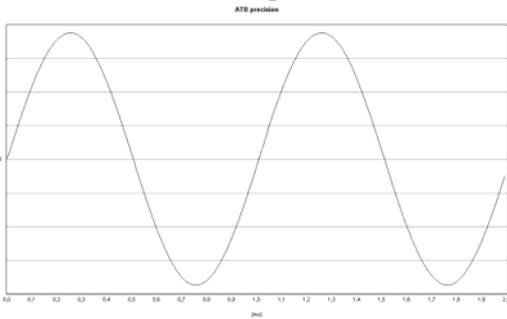
Aus der Formel ist ersichtlich, dass in dem Messergebnis die Anregung enthalten ist. Die Anregung muss genauestens bekannt sein, um sie nach der Messung aus dem Messergebnis herauszurechnen. Dies wird durch eine Korrelation durchgeführt. Eine einfachere Methode ist die Verwendung eines Messsignals, bei dem der Frequenz- und Phasengang konstant ist. Diese Bedingung erfüllt die Sinusschwingung. Da die Amplitude des Sinus Signals in dem Frequenzbereich der Messung gleich bleibt, ist die Funktion für die Korrelation eine Konstante. Deshalb ist eine Korrelation bei der Sinus Messung nicht nötig. Für die Lautsprechermessung ergeben sich noch andere Gesichtspunkte für die Wahl des Messsignals. Von der Überlegung her sollte ein Signal verwendet werden, das dem Signal entspricht, das der Lautsprecher überträgt. Dieses Signal besteht aus Musik, Sprache und Geräuschen. Wird der Lautsprecher mit diesem Signal angeregt, ist auch eine für das Hörergebnis relevante Messung zu erwarten.

# 2. DIE MESSSIGNALE

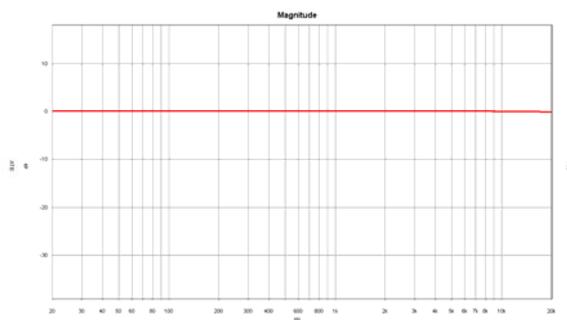
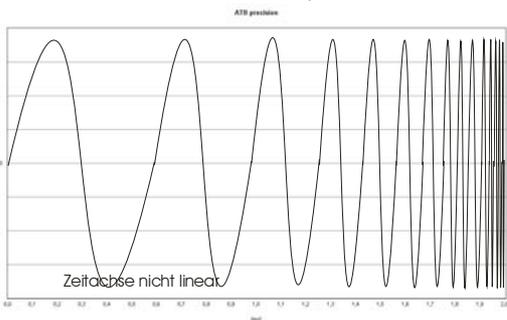
## MUSIK



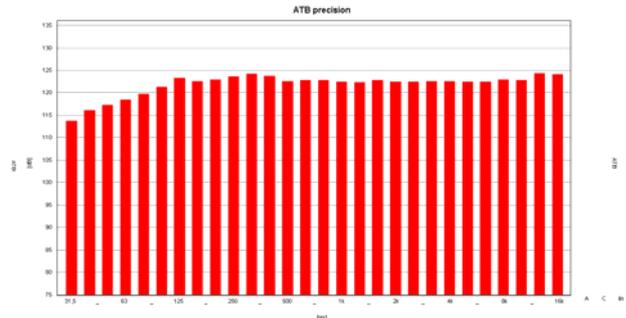
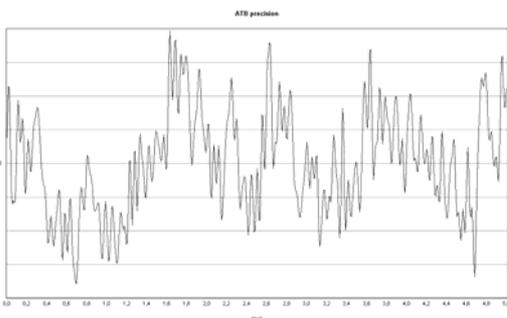
SINUS-STEP Pegelschreiber, LMS, ATB precision



SINUS-SWEEP TEF, Room-Tools



MULTISINUS ATB



MLS MLSSA, Clio

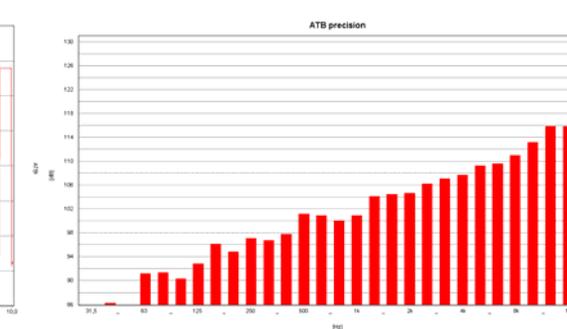
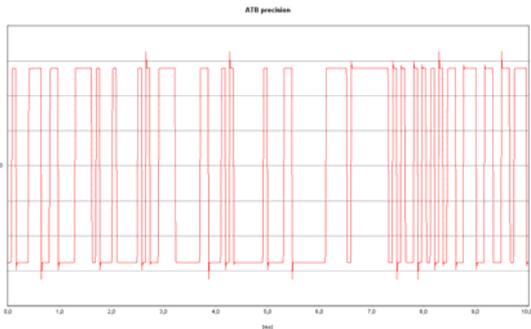


Bild 2.1

Die Messungen in Bild 2.1 zeigen die Signale im Zeit- und Frequenzbereich.  
Der Zeitbereich wird durch die Oszilloskop Messung dargestellt.  
Der Frequenzbereich wird in den rechten Messungen dargestellt. Bei den Signalen Musik, Multisinus und MLS zeigt eine Terz Analyzer Messung das Frequenzspektrum, und beim Sinus Signal eine Frequenzgangmessung den Amplitudenverlauf.

### 3. DIE MESSUNGEN

Die verschiedenen Messverfahren werden entsprechend der Anregung, dem Messsignal, benannt.

#### 3.1 SINUS-STEP

Geschichte:

Die Messung mit Sinus Schwingungen ist bewährt zur Messung des Frequenz- und Phasengangs. Bei der SINUS-STEP Messung wird in einem Frequenzbereich die Frequenz der Sinusschwingung schrittweise erhöht. Hierbei werden die Anzahl der Frequenzen, und damit Messungen, sowie der Frequenzbereich vorgegeben. Die Messung ist sehr genau. Früher wurde die Messung mit dem Pegelschreiber durchgeführt. Der bekannteste Schreiber wurde von Neutrik hergestellt. Die neuen Systeme messen digital mit dem PC oder einem internen Rechner.

Anwendung:

Für elektrische Messungen ist die Sinusmessung am genauesten. Die Lautsprecherimpedanz sollte immer mit einem Sinus ausgeführt werden, da bei der Messung der Lautsprecher seinen eingeschwungenen Zustand erreicht. Dies ist besonders bei der Messung der Thiele-Small Parameter wichtig.

Bei der akustischen Messung ist ein schalltoter Raum angebracht. Einige Messsysteme arbeiten mit Zeitfenstern, die die Raumreflexionen unterdrücken.

Beschreibung:

Bei der Messung wird die Frequenz des Sinussignals schrittweise erhöht. Da der Frequenzschrieb eine logarithmische Frequenzachse besitzt, wird auch die Schrittweite logarithmisch bestimmt. Für jede Frequenz wird das Eingangssignal gleichgerichtet und der Wert als Amplitude für die entsprechende Frequenz angezeigt.

Bei einer akustischen Messung zeigt die Kurve durch die akustischen Eigenschaften von Lautsprecher und Messraum ausgeprägte Spitzen. Um die Charakteristik des Lautsprechers besser zu erkennen, wird die Kurve geglättet. Bei den mechanischen Pegelschreibern erfolgt das Glätten durch die Einstellung der Messgeschwindigkeit oder der Zeitkonstante des Gleichrichters. Bei den digitalen Geräten wird die Kurve durch die Mittelung der Werte in einem Frequenzbereich geglättet. Wegen der logarithmischen Einteilung der Frequenzachse wird der Bereich in Oktaven gewählt. Hierbei sind auch ganzzahlige Teiler einer Oktave üblich.

Phasenmessung:

Neben der Frequenzgangmessung lässt sich bei den digitalen Geräten mit der Sinusmessung die Phase messen. Für die elektrische Phasenmessung ist es die genaueste Messung. Bei der akustischen Phasenmessung muss die Laufzeit des Schalls, die durch den Abstand von Lautsprecher und Mikrofon entsteht, eingestellt werden. Der Abstand wird mit einem Rechtecksignal ermittelt. Hierbei besteht die Schwierigkeit, dass meistens nicht der Anfang des Signals für die korrekte Anzeige der Phase richtig ist. Wird der Abstand so gewählt, dass er etwas hinter dem Anfang des Signals liegt, wird die Phase sehr genau gezeigt. Die richtige Abstandseinstellung ist erreicht, wenn die Phase die wenigsten Phasensprünge besitzt oder die Phase in einem großen Bereich eine Linie zeigt.

## 3.2 SINUS-SWEEP

WISSEN: W1. DIE ATB PRECISION WASSERFALL MESSUNG

Geschichte:

Die Sinus-Sweep Messung wurde aus der Sinus-Step Messung entwickelt, um bei der Messung die Raumresonanzen zu unterdrücken. Die aufwändige Messanordnung von mehreren Geräten wurde zuerst von dem Amerikaner Richard C. Heyser zu einem Messgerät, dem TEF Analyzer, zusammengefasst. Die Messmethode wird auch als TDS, Time-Delay Spectrometry, bezeichnet. Der TEF ermöglicht genaue Messungen. Das Programm ist aber nur von einem Ingenieur zu bedienen. So wurden über die Einstellung des Zeitfensters heiße Diskussionen geführt.

Anwendung:

Für die Frequenzgangmessung ist der Sinus-Sweep wegen der großen Anzahl von Einzelmessungen nicht so praktikabel.

Die Sinus-Sweep Messung wird zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften eines Raumes benutzt. Sie gibt ein genaues Bild über die Resonanzen, Reflexionen und Nachhallzeit eines Raumes.

Beschreibung:

Die Sinus-Sweep Messung besteht aus einer Anzahl von Einzelmessungen. Die Zahl der Einzelmessungen entspricht der Anzahl der gezeigten Frequenzen. Pro Einzelmessung wird ein Sinussignal mit stetig ansteigender Frequenz vom Generator erzeugt, der Sweep. Das Signal enthält alle Frequenzen eines vorgegebenen Frequenzbereiches. Dieses Signal wird vom Lautsprecher wiedergegeben und der Schall von einem Mikrofon aufgenommen. Das elektrische Mikrofonsignal durchläuft ein Bandpass Filter, das auf eine Frequenz abgestimmt ist. Nach der Filterung wird das Signal in einem Oszilloskop Schrieb dargestellt. In dem Schrieb werden die Signale gezeigt, die die im Filter eingestellte Frequenz enthalten. Die Art der Darstellung wird unter W1, die ATB precision Wasserfall Messung, beschrieben. Bei der Darstellung wird die Laufzeit des Schalls, die aus der Entfernung zwischen Lautsprecher und Mikrofon besteht, am Anfang der Darstellung abgezogen. So wird als Erstes die Amplitude des direkten Schalls gezeigt. Sie zeigt den Frequenzgang des Lautsprechers. Die Einzelmessungen werden in einem 3D Plot, dem Wasserfall, gezeigt. Die Achsen des Plots haben folgende Einheiten:

X-Achse = Frequenz      Y-Achse = Amplitude      Z-Achse = Zeit

Das Wasserfalldiagramm zeigt das echte Zeitverhalten des Schalls, da es aus den Zeitschrieben der Oszilloskop Messungen zusammengesetzt ist.

Aus den Messungen werden alle akustischen Parameter des Raumes berechnet.

## 3.3 MULTISINUS

WISSEN: W2. GRUNDBEGRIFFE DER FFT

Geschichte:

Die Multisinus Messungen sind erst durch die Computer Messtechnik möglich geworden. Die Grundlage zur Erzeugung und Auswertung ist die FFT. Der Multisinus ist ein berechnetes Rauschsignal, das aus der Überlagerung von Sinusschwingungen besteht.

Der Vorgänger von dem Multisinus ist das thermische Rauschen. Beim thermischen Rauschen sind die Frequenzen stochastisch verteilt. Es wird z.B. von einem Halbleiter, z.B. dem Transistor, erzeugt. Über einen langen Zeitraum betrachtet sind alle Frequenzen mit der gleichen Amplitude in dem Signal enthalten.

Bei der FFT Analyse zeigt sich, bei einer genügend großen Anzahl von gemittelten Messungen, eine Linie. Dieses Rauschen wird als weiß bezeichnet.



Bild 3.1

Bild 3.1 zeigt einen analogen Oktav Analyzer. Die Messung zeigt den Frequenzgang des weißen Rauschens.

In der Audiotechnik wird der Oktave oder Terz Analyser benutzt. Bei der Verwendung des weißen Rauschens als Testsignal zeigt er das obere Bild. Dies liegt an der logarithmischen Skalierung der x-Achse in Oktaven. Da jede folgende Oktave die doppelte Anzahl von Frequenzen enthält, wird entsprechend der Formel

$$A_2 = \sqrt{A_1^2 + A_1^2} = \sqrt{2A_1^2} = \sqrt{2} \cdot A_1$$

$A_1$  = Amplitude der Vorgänger Oktave  $A_2$  = Amplitude  $\sqrt{2}$  = Faktor für 3dB

Da das weiße Rauschen für die Analyzer Messungen ungünstig ist, wurde das rosa Rauschen entwickelt. Das rosa Rauschen zeigt bei der FFT Analyse einen zu den hohen Frequenzen hin mit -3dB pro Oktave abfallenden Frequenzgang. Beim Oktav oder Terz Analyzer wird eine gerade Linie gemessen.

Das rosa Rauschen besitzt bei der Lautsprechermessung einen großen Vorteil. Sein Spektrum entspricht dem Spektrum der Musik. So wird der Lautsprecher bei der Messung entsprechend der Musikwiedergabe belastet. Bei dem weißen Rauschen können die Hochtöner leicht übersteuert und das Messergebnis verfälscht werden.

Das thermische Rauschen erfordert bei der Messung viele gemittelte Messungen, um zu einem reproduzierbaren Ergebnis zu gelangen. Um auch mit einer Messung zu einem reproduzierbaren Ergebnis zu gelangen, wurde das periodische Rauschen, PN genannt, entwickelt. Das Rauschen wird so berechnet, dass in einer Periode alle für die FFT Analyse benötigten Frequenzen mit konstanter Amplitude enthalten sind. Dieses berechnete weiße Rauschen zeigt bei der FFT Analyse einen geraden Frequenzgang, ist aber für die Lautsprechermessung wegen der hohen Energie im Hochtonbereich ungünstig. Das für die Lautsprechermessung günstige, der Musik ähnliche, rosa Rauschen zeigt bei der FFT Messung den zu hohen Frequenzen abfallenden Frequenzgang. Für die FFT Messung ist es daher nicht geeignet. Da das PN-Rauschen berechnet wird, hat der Physiker und Mathematiker Joachim Metzner ein Rauschen berechnet, dass die Forderung nach der musikähnlichen Energieverteilung und dem bei der FFT Messung linearen Frequenzgang, verbindet. Dieses Rauschen wird als Metzner PN, oder abgekürzt MPN, bezeichnet. Der Multisinus ermöglicht auch die Berechnung von speziellen Messsignalen. Das ATB PC besitzt 3 Signale für den Test von Dolby Digital Anlagen. Die Signale entsprechen den decodierten Tonspuren der DVD.

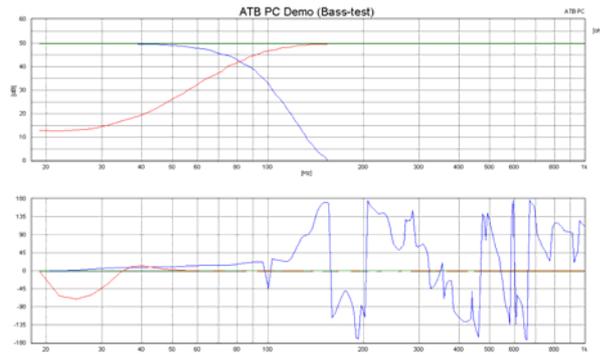


Bild 3.2

Das Bild 3.2 zeigt die drei Signale zum Testen einer Surround-Anlage. Es sind die Bass-Mittel-Hoch, grün, Mittel-Hochton, rot und das Subwoofer Signal, blau, Signale. Die Sprünge in der Phase entstehen, wenn bei dem Signal keine Amplitude zur Auswertung der Phase mehr vorhanden ist. Die Phase der Signale ist fast null. So kann der Bass zu dem Mittel-Hochtonsignal ohne Einbrüche im Frequenzgang addiert werden. Es entsteht das BMH Signal.

Die Signale werden mit dem FFT Filter berechnet. Dies ist wegen des hohen Rechenaufwands nur mit den schnellsten Rechnern in Echtzeit möglich.

#### Anwendung:

Der Multisinus wird bei rechnergesteuerten Lautsprechermessungen benutzt. Er besitzt bei kurzer Messzeit eine der Sinusmessung entsprechend Genauigkeit. Dies gilt für Amplituden- sowie Impedanzmessung. Für die Qualitätskontrolle ist die Messung sehr gut geeignet. Mit den entsprechenden Algorithmen ermöglicht die Multisinus Messung eine richtige, vom Benutzer unabhängige, Phasenmessung.

#### Messung:

Bei der Messung wird der Lautsprecher mit dem MPN Signal angesteuert. Der Schall wird vom Mikrofon aufgenommen und in ein elektrisches Signal gewandelt. Bei der FFT Analyse muss im gemessenen Signal ein Zeitfenster gesetzt werden, das die für die FFT benötigten Abtastwerte enthält. Für eine genaue Messung muss das Zeitfenster synchron zum Messsignal gesetzt werden. Durch die Laufzeit des Schalls wird die zeitliche Beziehung zwischen Messsignal und gemessenem Signal uneindeutig. Eine Möglichkeit zur zeitlichen Zuordnung besteht in der Messung des Abstandes durch die Funktion der Abstandsmessung. Dies ist aber aufwändig und schafft neue Fehlerquellen. Daher wird bei der ATB Messung das gemessene Signal mit Hilfe eines aufwändigen Algorithmus analysiert und der optimale Bereich für das Fenster gewählt. Hierdurch wird eine genaue und reproduzierbare Messung garantiert. Auch bei der Analyse von Geräuschen zur Lärmmessung bewährt sich der Algorithmus zur Bestimmung des Zeitfensters. Während bei herkömmlichen Analysatoren viele Messungen mit Mittelung notwendig sind, wird mit dem ATB das gleiche Ergebnis mit einer Messung erreicht. Dies ermöglicht eine genaue und schnelle Messung von sich ändernden Geräuschen.

#### Die Phasenmessung

Der Multisinus ermöglicht bei der akustischen Phasenmessung reproduzierbare, vom Benutzer unabhängige, Ergebnisse. Das ATB Messprogramm kann durch aufwändige Berechnungen, wie der inversen FFT, die Phasenlage von Messsignal und gemessenem Signal vergleichen. Die Unterschiede werden dann als Phase des Lautspechers gezeigt. Man kann auch sagen, dass im gemessenen Signal die Phase mit dem Wert 0 ermittelt wird und die Messung die Abweichung zeigt. Durch die aufwändige Mathematik wird beim Lautsprecher eine vom Mikrofonabstand unabhängige Phasenmessung möglich. Die Phase wird im Kapitel W5. PHASE, beschrieben.

### 3.4 MLS

#### Geschichte

Eine verbreitete Lautsprechermessung benutzt das digitale Generatorsignal der Maximum-Length Sequence, MLS.

Die Messung wurde von Doug Rife, dem Gründer der *DRA Laboratories*, entwickelt. Das MLSSA genannte Messsystem wurde im Jahr 1989 veröffentlicht. Die MLS Messung ist im Laufe der Zeit von vielen Messprogrammen übernommen worden.

Die MLS ist eine periodische, binäre und pseudostochastische Folge. Dieses digitale Signal besitzt nur die Zustände -1, und +1. Bei der Messung wird das Eingangssignal mit dem Ausgangssignal durch eine Autokorrelationsfunktion, der Hadamard Transformation, zu einem Diracimpuls umgerechnet. Der berechnete Impuls enthält alle Informationen über die Übertragungsfunktion. Aus dem Impuls werden der Frequenzgang, der Phasengang, die Sprungantwort und alle akustischen Parameter bei der Raummessung berechnet.

Diese Art der Messtechnik ermöglichte am Anfang der Computertechnik den Einsatz des Rechners für die Lautsprechertechnik. Die Erzeugung des Messsignals erforderte keine damals teuren D/A Convertern. Der Generator besteht aus 3 digitalen ICs. Die Hadamard Transformation konnte auf die nicht sehr hohe Rechenleistung der ersten PCs angepasst werden. Die Messung wurde durch neue Messprogramme und Auswertungen immer weiter entwickelt. Auch heute noch besteht ein großer Anwenderkreis.

#### Anwendung:

Die MLS wird bei akustischen Messungen angewandt. Bei Lautsprecher werden der Frequenz- und Phasengang, die Impuls- und Sprungantwort sowie das Zerfallspektrum (Wasserfall) gemessen. In der Raumakustik werden alle akustischen Parameter mit der Messung ermittelt. Für elektrische Messungen ist sie wegen der mangelhaften Genauigkeit im Tieftonbereich weniger geeignet.

#### Messung:

Bei der Messung wird das MLS Signal durch einen digitalen Generator erzeugt. Das Signal wird vom Lautsprecher wiedergegeben. Es wird vom Mikrofon aufgenommen und im Rechner gewandelt. Mit der Hadamard Transformation wird aus dem Messergebnis die Sprungantwort berechnet. Der Frequenzgang wird mit der FFT aus der Impulsantwort berechnet. Da das Ergebnis vom A/D Converter, dem Programm bis hin zum Betriebssystem abhängig ist, wird bei einigen Systemen die sogenannte Kalibrierungsmessung vor jeder Messung oder bei anderen Systemen eine Referenzmessung, zeitgleich im 2. Kanal, durchgeführt. Die Messung ist stark von der gewählten Anzahl der FFT Punkte und dem Zeitfenster abhängig. Da im Tieftonbereich bei einer 32000-Punkte MLS Messung keine genügend hohe Reproduzierbarkeit erreicht wird, werden zwei Messungen benutzt. Die eine hat den Bereich von 20Hz – 100.....300Hz und benutzt eine dem Bereich angepasste MLS. Mit der zweiten Messung wird der Bereich bis 20K...50kHz gemessen.

Im Gegensatz zu der Multisinus Messung vom ATB, dessen Messparameter im Programm so eingestellt sind, dass immer die höchste Messgenauigkeit erreicht wird, greift der Anwender in die Auswertung aktiv ein. Das Messergebnis wird so anwenderspezifisch. Deshalb lassen sich die mit der MLS arbeitenden Messsysteme nicht für die Industrienorm ISO 9001 zertifizieren.

Vor der Auswertung wird im Fenster der Impulsmessung ein Zeitfenster gesetzt. Hierbei muss der Anwender über die Grundlagen der FFT, wie unter W2 GRUNDBEGRIFFE DER FFT beschrieben, Bescheid wissen.

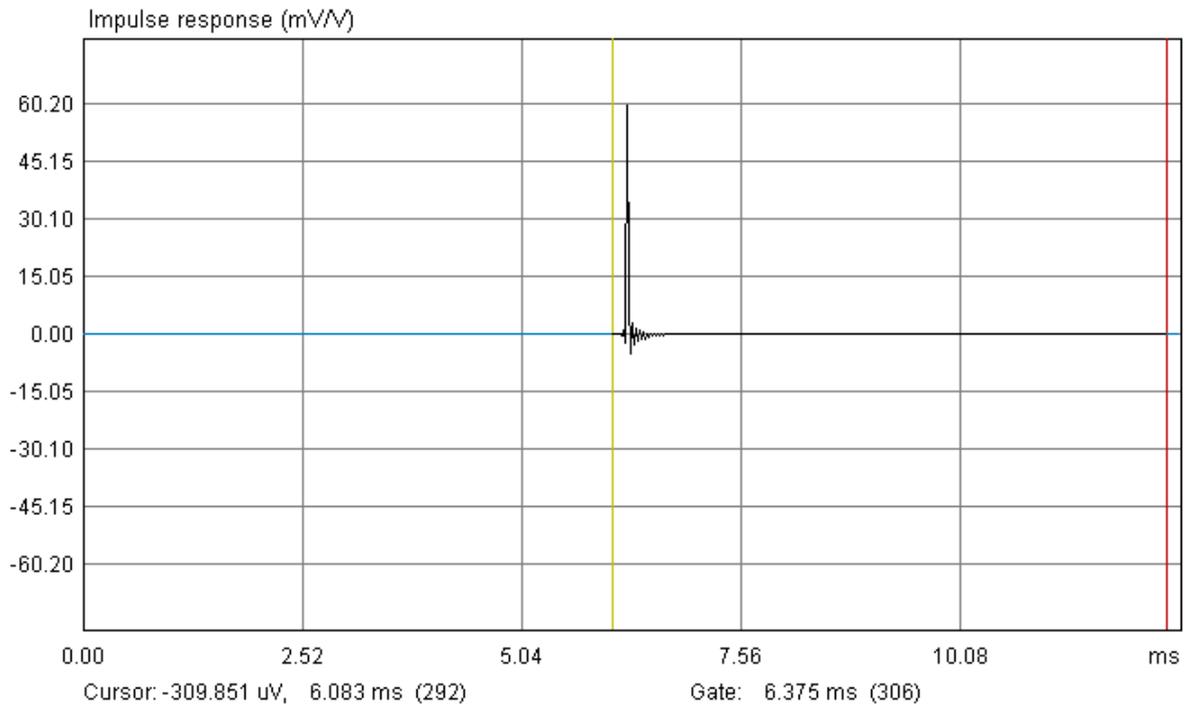


Bild 3.3

Das Bild 3.3 zeigt die Impulsantwort der MLS Messung. Bei der Messung wurde der Eingang mit dem Ausgang kurzgeschlossen, um die elektrischen Eigenschaften zu testen. Für den Anfang des Zeitfensters wird der Anfang des Impulses gewählt. Das Ende des Fensters wird bei der Lautsprechermessung vor der ersten zu sehenden Raumreflexion gesetzt.

#### Die Messung des Zerfallspektrums

Eine weitere Messung der MLS Messung ist das Zerfallspektrum, auch Wasserfall genannt. Die 3D Grafik wird aus der Impulsantwort berechneten Frequenzgängen zusammengesetzt. Bei der Beschreibung soll nicht auf die vielfältigen Parameter, die das Bild verändern, eingegangen werden. Gezeigt werden soll die Bedeutung der Messung für das Zeitverhalten. Die 3D Grafik zeigt auf der X-Achse die Frequenz, auf der Y-Achse die Amplitude und auf der Z-Achse die Zeit.

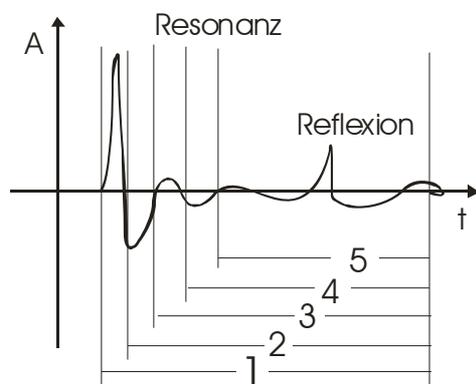


Bild 3.4

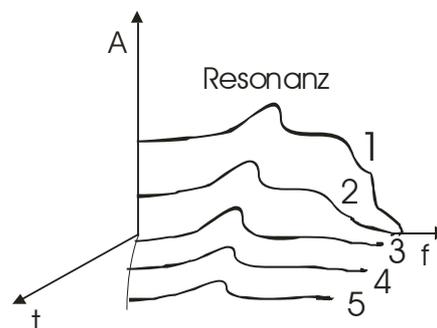


Bild 3.5

Das Bild 3.4 zeigt die Impulsantwort eines Lautsprechers. Die Zahlen benennen die Zeitfenster für die FFT Berechnung. Das längste Zeitfenster ist mit 1 bezeichnet. Es erfasst den gesamten Bereich des Einschwingverhaltens, der Resonanz, des Ausschwingverhaltens und der Reflexion. Die zeitlichen Abläufe können durch den Frequenzgang der Kurve 1 im

Bild 3.5, dem 3D Plot, nicht gezeigt werden. Das zeitliche Verhalten ist nicht mehr zu erkennen. Auch die Reflexion ist, wie vorher beschrieben, nicht mehr zu erkennen. Bei der Frequenzanalyse der Bereiche 2, 3, 4 und 5 wird das Ausschwingen der Resonanz gezeigt. Da die Reflexion ein breites Frequenzspektrum besitzt, ist sie auch in diesen Kurven nicht zu erkennen. Das MLS Zerfallspektrum wird von vielen Entwicklern als Zeitverhalten interpretiert. Die Entwickler sind davon überzeugt, dass ein Zeitverhalten, das nicht zu erkennen ist, auch keine Bedeutung für die Entwicklung besitzt. Dass dies nicht stimmt, zeigen die folgenden Kapitel.

## 4. RAUMUNABHÄNGIGE LAUTSPRECHER MESSUNG

### WISSEN. W3. MULTISINUS MESSUNGEN DES ATB PRECISION

Bei der Messung des Schalldruck-Frequenzgangs eines Lautsprechers wird die Messung vom Messraum und der Aufstellung beeinflusst. Um den Einfluss auszuschalten, wird im schalltoten Raum gemessen. Für die Entwicklung von einzelnen Chassis ist der schalltote Raum optimal. Bei der Entwicklung von Lautsprecherkombinationen, den Boxen, führt eine Abstimmung im schalltoten Raum zum praxisfernen Ergebnis.

Die Messung im schalltoten Raum entspricht nicht dem Hörergebnis, da der Lautsprecher beim Hören auf dem Boden steht und der Tieftöner eine andere Umgebung als im schalltoten Raum sieht. Der Boden bewirkt eine Anhebung von ca. 3dB für tiefe Frequenzen. Als ideale Messung erscheint nur die Freifeldmessung. Der Lautsprecher steht dabei erhöht in der Mitte eines großen Platzes mit wenigstens 20m entfernten Begrenzungen. Der Mikrofon Abstand ist 1m. Störgrößen bei der Messung sind Wind- und Umgebungsgeräusche.

### 4.1 DIE ZEITFENSTERMESSUNG

Für die Beispielmessungen wird eine Glasbox gewählt. Die Box mit den schallharten Innenwänden demonstriert die Resonanzen des Innengehäuses optimal. Steingehäuse oder innen gekachelte Gehäuse zeigen vergleichbare Messungen. Die Messungen werden in einem ausreichend großen Raum mit hoher Decke, dem Freifeld entsprechend, durchgeführt.



Bild 4.1



Bild 4.2

Das Bild 4.1 zeigt den Lautsprecher.

Bild 4.2 zeigt den Frequenzgang des Lautsprechers mit ATB gemessen.

Bei der MLS Messung wird die Messung mit der Impulsantwort gestartet. In dem Zeitschrieb der Impulsantwort wird das Fenster für den Auswertebereich gesetzt.

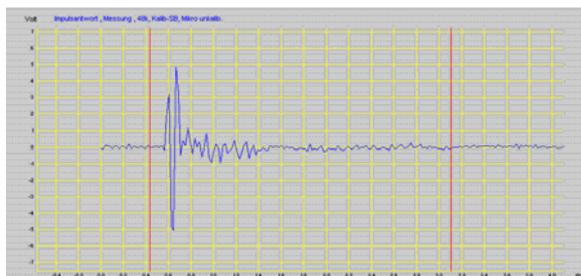


Bild 4.3



Bild 4.4

Das Bild 4.3 zeigt die Impulsantwort des Lautsprechers mit einem MLS Messsystem gemessen. Zur Berechnung des Frequenzganges wurde mit großem Zeitfenster, schwarze Kurve, und kleinem Zeitfenster, rote Kurve, durchgeführt.

Die Länge des großen Zeitfensters ist durch die in der Kurve schon sichtbaren Fehler bei hohen Frequenzen begrenzt. Deshalb können keine niedrigeren Frequenzen mehr angezeigt werden. Die Kurve zeigt einen linearen Frequenzgang ab 50Hz. Der Vergleich mit der ATB Messung zeigt, dass dies falsch ist. Deshalb wird eine zweite Messung für den Tieftonbereich notwendig. Bei der Messung wird eine MLS der oberen Grenzfrequenz von 300Hz benutzt. Messsysteme ohne die zweite Messung sind nicht zu gebrauchen. Das kleine Zeitfenster zeigt die Glättungsfunktion. Die Resonanzen der Luft im Gehäuse sind nicht mehr zu sehen. Diese wichtige Information über den Klang geht bei der Messung mit dem kleinen Zeitfenster verloren.

Bei der folgenden Messung wird der Einfluss einer Raumreflexion bei der Messung mit Zeitfenster gezeigt.

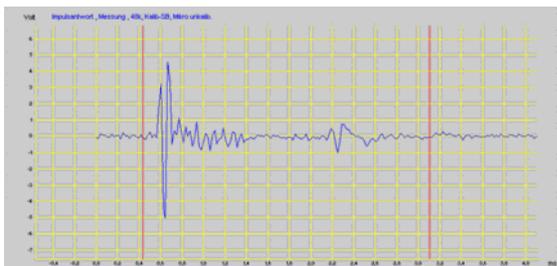


Bild 4.5



Bild 4.6

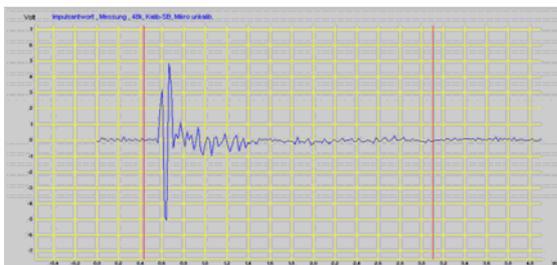


Bild 4.7

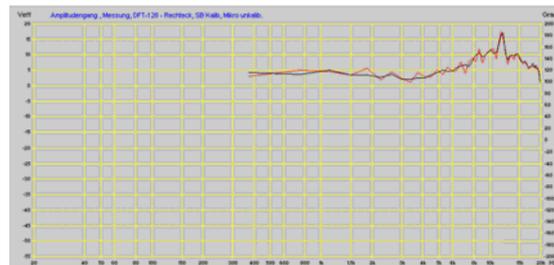


Bild 4.8

Bei der Messung wurde eine Reflexion durch eine Glasplatte hinter dem Mikrofon, siehe Bild 4.6, erzeugt. Dies soll die stärkste, bei einer Messung im Raum auftretende Reflexion, simulieren. Diese erscheint in der Impulsantwort, Bild 4.5, stark ausgeprägt. Die Impulsantwort in Bild 4.7 zeigt keine Reflexion. In dem Frequenzgang von Bild 4.8 werden die Messungen mit und ohne Reflexion verglichen. Die Reflexion, die jede Messung ohne Zeitfenster unmöglich macht, ist in der Messung mit Zeitfenster kaum zu erkennen. Die Messungsgenauigkeit durch die reduzierte Frequenzauflösung bei der Zeitfenstermessung verwischt sogar die starke Reflexion im Zeitfenster. Hieraus wird geschlossen, dass die Wirkung des Zeitfensters weniger im Ausblenden von Raumreflexionen besteht, als in der starken Glättung der Kurve durch die reduzierte Frequenzauflösung. Der Nachteil dieser Glättung ist aber, dass sie linear und nicht der logarithmischen Frequenzachse entsprechend in Oktaven oder Terzen erfolgt. Für tiefe Frequenzen besteht so eine starke und für hohe Frequenzen fast keine Glättung. Die Aussage der Messung ist so irreführend.

Um eine Reproduzierbarkeit im Tieftonbereich zu erreichen, werden für die Messung unterhalb z.B. 300Hz adaptive Zeitfenster benutzt. Diese Art der Messung entspricht aber eher einer Berechnung. Die Messergebnisse zeigen sehr schöne Kurven, die sich gut veröffentlichen lassen. Der Entwickler sollte sich aber darüber im Klaren sein, dass das für den Klang entscheidende Verhalten des Lautsprechers in der Messung kaum zu erkennen ist.

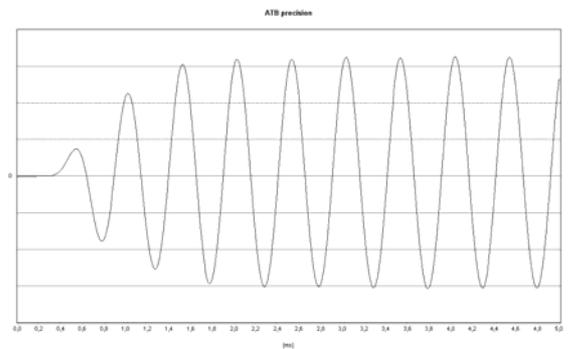


Bild 4.9

Das Bild 4.9 zeigt das Einschwingverhalten eines üblichen Woofers bei 200Hz. Der Tieftöner benötigt 3 Schwingungen, um die Amplitude, die die Frequenzgangmessung zeigt, zu erreichen.

Der Fehler bei den Zeitfenstern im Tieftonbereich liegt im Einschwingverhalten der Tieftöner. Ein Tieftöner benötigt bis zu 3 Schwingungen, um einen Ton mit der richtigen Amplitude zu übertragen. Das für die Einschwingzeit benötigte Zeitfenster ist so groß, dass es dem gesamten Auswertebereich der FFT entspricht. Im Tieftonbereich werden die richtigeren Messungen mit der Nahfeldmessung erreicht.

## 4.2 DIE NAHFELDMESSUNG

Bei der Nahfeldmessung des Lautsprechers wird die physikalische Eigenschaft des Schalls, dass der Schalldruck mit der Entfernung abnimmt ausgenutzt. Ein Messmikrofon wird im Abstand von 10cm vor den Tieftöner gestellt. Hierbei ist der direkte Schall um ein Vielfaches größer als der reflektierte, sodass nur der direkte Schall gemessen wird. Diese Messung wird nur unterhalb von 300Hz durchgeführt und durch eine Messung für den Frequenzbereich oberhalb von 300Hz ergänzt. Die zweite Messung wird im Abstand von 1m durchgeführt, um Mittel- und Hochtöner zusammen zu messen.

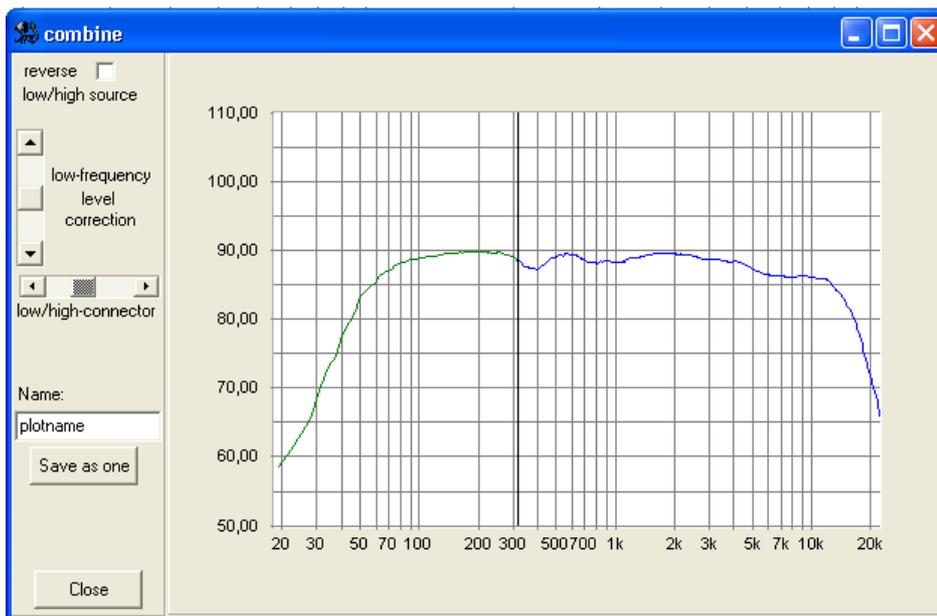


Bild 4.10

Das Bild 4.10 zeigt das Menü Combine zum Zusammensetzen von Tiefton- und Mittelhochton Messung.

Bei der Nahfeldmessung muss auch der Schall von allen Quellen im Tieftonbereich gemessen werden. Zu diesen Schallquellen gehört auch der Mitteltöner, wenn die Trennfrequenz  $<300\text{Hz}$  beträgt. Für die Messung wird beim ATB die Messfunktion „Dauermessung mit Mitteln“ gewählt. Während der Messung wird hierbei das Mikrofon langsam zwischen den Schallquellen bewegt. Hierdurch werden alle Schallquellen erfasst. Der Weg verläuft über die Mittelpunkte von Mittel- und Tieftöner. Bei den Bassreflexöffnungen ist das Verhältnis von Membranfläche des Tieftöners und der Öffnung zu beachten. Entsprechend der Formel

$$\text{Druck} \sim \text{Kraft} \times \text{Fläche}$$

erzeugt eine Öffnung einen höheren Druck als die große Fläche des Tieftöners. Deshalb wird bei der Öffnung nur in der Nähe des Randes gemessen. Wie weit das Mikrofon dabei von dem Rand entfernt sein muss, lässt sich nicht einfach berechnen. Durch folgend beschriebenen Messvorgang werden richtige Ergebnisse erreicht.

In einem kleinen Messraum wird eine Schalldruckmessung mit dem Grenzflächenmikrofon durchgeführt. Das Mikrofon liegt hierbei auf dem Boden. Da nur der Tieftonbereich beurteilt werden soll, wird die normale Aufstellung gewählt. Um die erste Reflexion vom Boden zu unterdrücken, wird die Grenzflächenmessung benutzt. So wird die störende Auslöschung oberhalb 100Hz vermieden. Die erste Reflexion kann auch nicht mit dem Zeitfenster ausgeblendet werden. Wegen des kurzen Laufzeitunterschiedes liegt sie im Bereich des Zeitfensters.

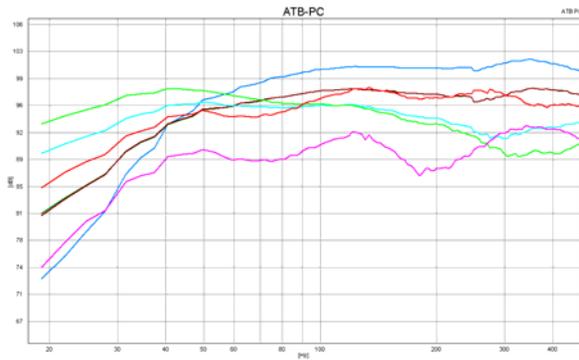


Bild 4.11

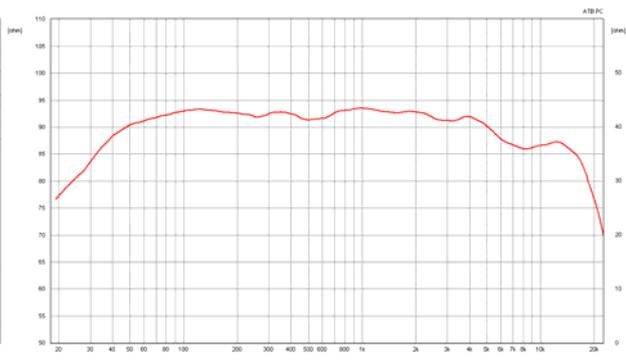


Bild 4.12

Im Bild 4.11 wird die Nahfeldmessung mit unterschiedlichen Abständen zur Bassreflexöffnung gezeigt. Die Reihenfolge der Vergrößerung des Abstandes zum Rand der Öffnung ist grün, hellblau, braun und blau. Gemessen wurde mit der Nahfeldkorrektur. Die rote Kurve ist die Grenzflächenmessung und die violette Kurve die Messung mit 1m Abstand. Beide Messungen wurden ohne Korrektur durchgeführt.

Das Bild 4.12 zeigt den resultierenden Frequenzgang des Lautsprechers. Er setzt sich aus der braunen Kurve, die der Grenzflächenmessung entspricht, und der violetten Kurve zusammen. Die Kurven wurden im Combine Menü verbunden.



Bild 4.13

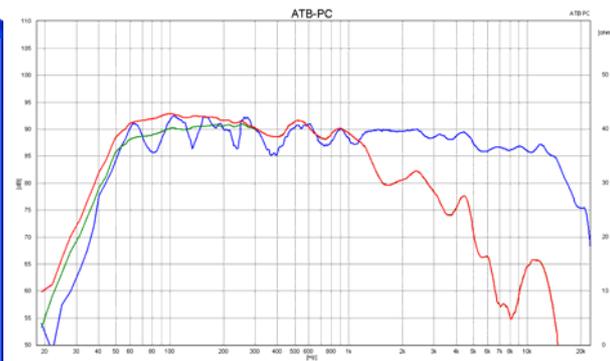


Bild 4.14

Ein Problem der Nahfeldmessung ist das Bündelungsmaß, eine Überhöhung des Schalldruckes im Nahfeld. Die Überhöhung beträgt bis zu 3dB im Tieftonbereich. Das ATB PC Messsystem besitzt die Funktion der Mic-correction. Hier wird eine Korrekturkurve für den Nahfeldeffekt eingegeben. Das Bild 4.13 zeigt die Korrekturkurve, die in der Mic-correction eingestellt wird. Die Korrektur wird, einmal eingestellt, vor den Nahfeldmessungen aufgerufen. Das Bild 4.14 der Frequenzgangmessung zeigt die Nahfeldmessung ohne Korrektur, rot, und mit Korrektur, grün. Die grüne Kurve entspricht der 1m Messung, blau. Durch den beschriebenen Messvorgang kann auch in dem normalen Raum eine richtige Messung des Tieftonbereiches durchgeführt werden.

### 4.3 DIE GRENZFLÄCHENMESSUNG

Bei der Grenzflächenmessung wird das Messmikrofon als Grenzflächenmikrofon betrieben. Das Mikrofon liegt flach auf dem Boden und besitzt dabei eine Halbkugelcharakteristik.

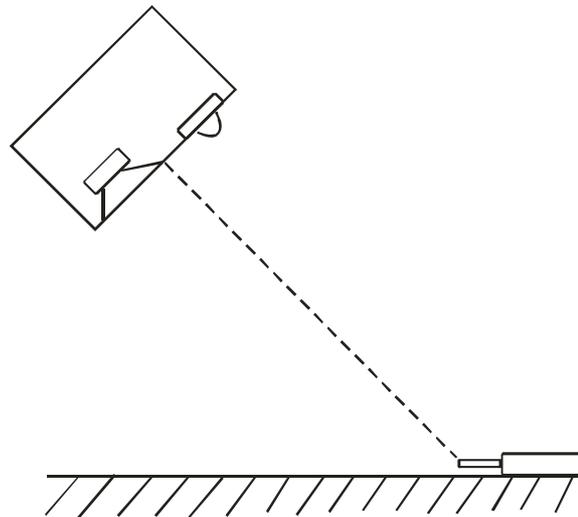


Bild 4.15

Das Bild 4.15 zeigt die Anordnung von Lautsprecher und Mikrofon. Die Schallwellen des Lautsprechers treffen schräg auf den Boden und werden in den Raum reflektiert. Dies macht sich besonders im Mittel- Hochtonbereich positiv bemerkbar. Auch im Tieftonbereich, in dem sich die Raumresonanzen ausbilden, wird deren Energie vom Grenzflächen-Mikrofon nur zur Hälfte erfasst, sodass sie die Messung nicht mehr so stark beeinträchtigen. Wegen der Raumresonanzen gilt auch hier: je größer der Messraum, desto besser.

## 5. DAS ZEITVERHALTEN

WISSEN: W4. PHASE  
W5. DYNAMIC-MEASUREMENT

Um eine Übertragungsstrecke vollständig zu beschreiben, muss der Frequenz- und Phasengang gemessen werden. Der Frequenzgang zeigt die Übertragung der Größe der Amplitude und die Phase die zeitliche Zuordnung von Schwingungen. In der Lautsprechertechnik ist es aber üblich, nur den Frequenzgang zu betrachten. Der Phasengang wird als für den Klang unbedeutend angesehen. Dies hängt auch mit den Schwierigkeiten der akustischen Phasenmessung zusammen. Früher dauerte die Messung mehrere Stunden und erforderte sehr teure Geräte. Bei den PC gestützten Messsystemen wird die Phase von der FFT mitberechnet. Bei der Darstellung aber wird, z.B. bei der MLS Messung, der Abstand nicht richtig ermittelt und so eine nicht aussagefähige Kurve gezeigt. Vor zwanzig Jahren wurde ein Test in Bezug auf die Hörbarkeit von Phasenverschiebungen durchgeführt. Bei dem Test wurden zwei Sinusschwingungen abgespielt, deren Phasenlage verändert wurde. Hierbei entstehen im Oszilloskop Bild durch die Überlagerung von der Phase abhängige Kurven. Unterschiede bei den Kurveformen mit der entsprechenden Phase konnten von den Testpersonen nicht gehört werden. Daraus wurde gefolgert, und bis heute behauptet, dass die Phase nicht hörbar ist. Bei dem Test wurde die Wiedergabe von zwei überlagerten Signalen im eingeschwingenen Zustand beurteilt. Dies ist für eine absolute Aussage nicht ausreichend.

### 5.1 DIE FREQUENZWEICHE

Als Beispiel für das Zeitverhalten werden zwei Lautsprecher mit gleicher Bestückung und Gehäusevolumen aufgebaut.



Bild 5.1



Bild 5.2

Bild 5.1 zeigt den Lautsprecher „Analog.on Richtig“. Die Box wurde zur Demonstration des Dynamic-Measurement Programmes entwickelt. Nach einem sehr guten Test in der „Klang+Ton“ stehen die meisten Lautsprecher in etlichen Tonstudios. Eine Kopie ist auch in den USA bei einem großen Studio Ausrüster zu bekommen.

Mit den Chassis der Richtig ist der Lautsprecher „Demo“ aufgebaut, Bild 5.2. Bei der Konstruktion wurden die Volumen des Richtig Gehäuses weitgehendst übernommen. Dem Stand der Lautsprechertechnik entsprechend wurde eine ebene Schallwand verwendet. Die

Weiche ist entsprechend der Theorie von Linkwitz, mit 24dB und Butterworth Charakteristik, ausgeführt.

### Das Rechtecksignal

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

Der Lautsprecher wird mit einem Rechtecksignal angesteuert.

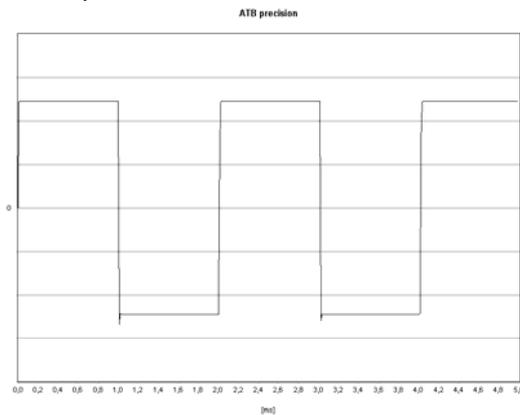


Bild 5.3

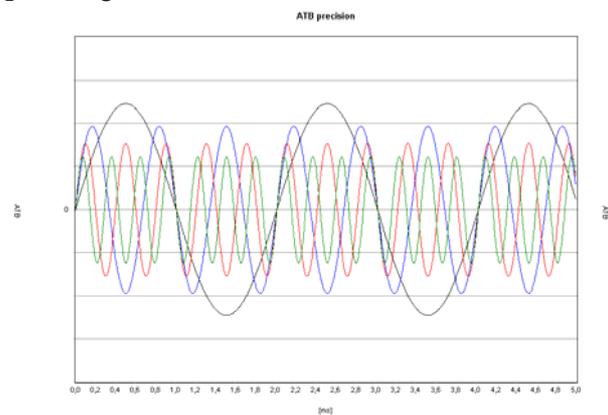


Bild 5.4

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 ungradzahligen Oberschwingungen 3=blau, 5=rot, 7=grün und weitere, nicht gezeigten Oberschwingungen. Ein dem Rechteck ähnliches Lautsprechersignal zeigt eine lineare Phase mit gleichmäßiger Amplitude. Dies gilt aber nur für Frequenzen  $\geq$  der Grundschwingung. Auch wird nur der eingeschwungene Zustand gezeigt.

In den folgenden Bildern wird demonstriert, wie sich das Rechteckverhalten aus dem Frequenzgang und der Phase zusammensetzt.

Richtig

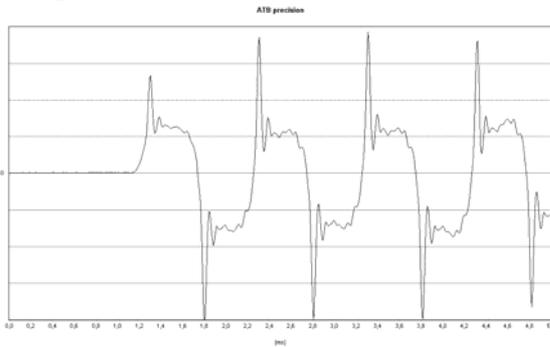


Bild 5.5

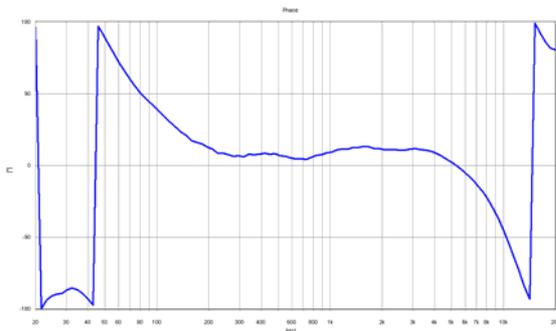


Bild 5.7

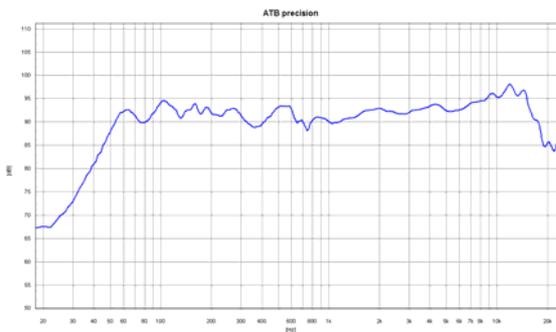


Bild 5.9

Demo

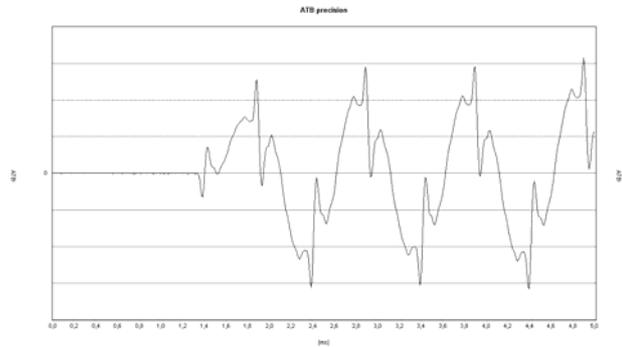


Bild 5.6

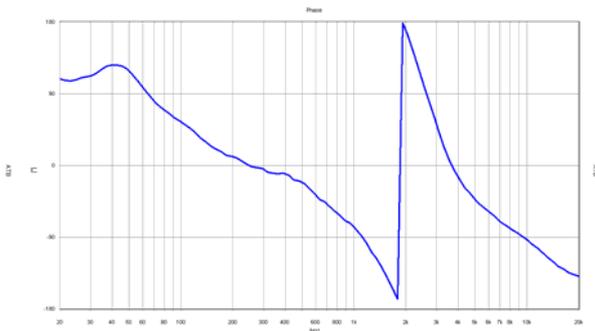


Bild 5.8

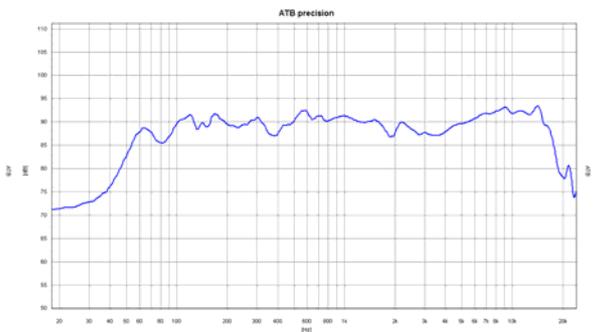


Bild 5.10

Die Richtig zeigt ein gutes Rechteckverhalten, Bild 5.5. Die Einzelschwingungen des Rechtecksignals werden zur gleichen Zeit übertragen. Dies zeigt die lineare Phase, Bild 5.7. Die Spitzen am Anfang der Rechteckschwingungen zeigen die Überhöhung des Frequenzgangs bei 15kHz, Bild 5.9. Bild 5.6 zeigt, dass das Rechteckverhalten der Demo schlecht ist. In Bild 5.8 wird dies auch durch die starke Phasendrehung ersichtlich.

## Die Sprungantwort

Mathematisch entsteht die Sprungantwort durch die Integration der Impulsantwort.

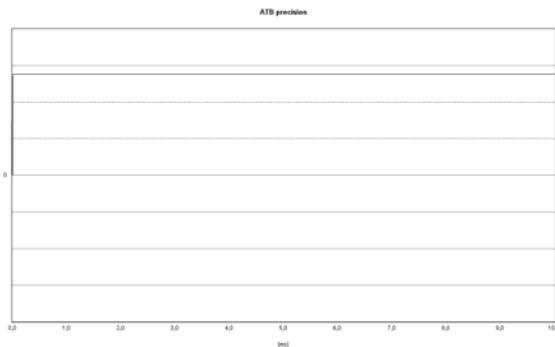


Bild 5.11

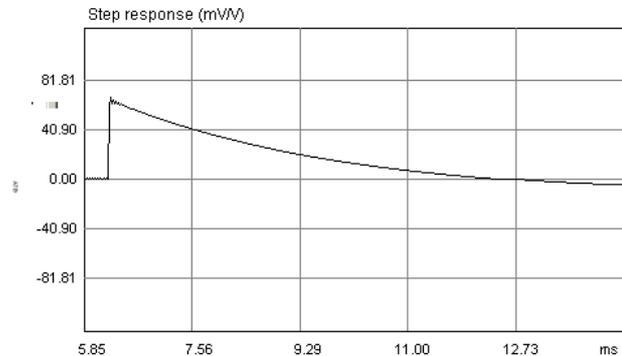


Bild 5.12

Das Bild 5.11 zeigt das Messsignal der Sprungantwort. Die Sprungantwort beginnt zur Zeit 0 mit der Amplitude = 0 und hat für die Zeit >0 eine konstante, positive Amplitude. Die Sprungantwort enthält wie die Impulsantwort die gesamte Information über eine Übertragungsstrecke. Ein Nachteil der Sprungantwort ist die sehr komplexe Darstellung. Das Verhalten einzelner Frequenzen ist nicht zu erkennen. Deshalb wurde die 3D Darstellung des Dynamic-Measurement Programms entwickelt. Das Programm wird unter W5 beschrieben.

Die Sprungantwort ist die wichtigste Darstellung des Zeitverhaltens einer Übertragungsstrecke. Auch bei der digitalen Signalverarbeitung wird die Sprungantwort zum Testen empfohlen.

Siehe Literaturverzeichnis.

Das Bild 5.12 zeigt die elektrisch gemessene Sprungantwort der MLS Messung. Im Gegensatz zur Oszilloskop Messung bildet die berechnete MLS Sprungantwort einen Hochpass. Da die MLS im Tieftonbereich entsprechend der FFT nur wenige Frequenzpunkte besitzt, werden in der Sprungantwort auch hauptsächlich die hohen Frequenzen gezeigt. Da die Anzeige der tiefen Frequenzen eine Funktion der MLS Frequenzpunkte sowie des gewählten Zeitfensters ist, ist die messtechnische Beurteilung kaum möglich. Da die Sprungantwort in der Elektrotechnik klar mathematisch definiert ist, ist die Bezeichnung Sprungantwort für die MLS Messung falsch.

## Sprungantwortmessungen an den Beispielboxen

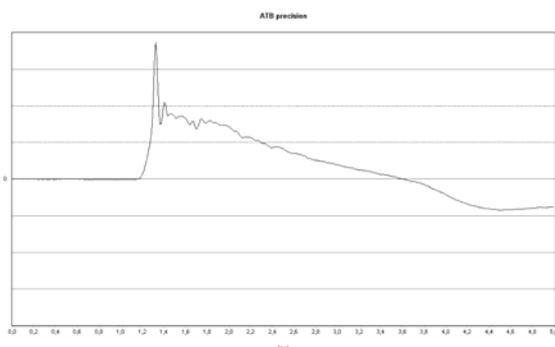


Bild 5.13

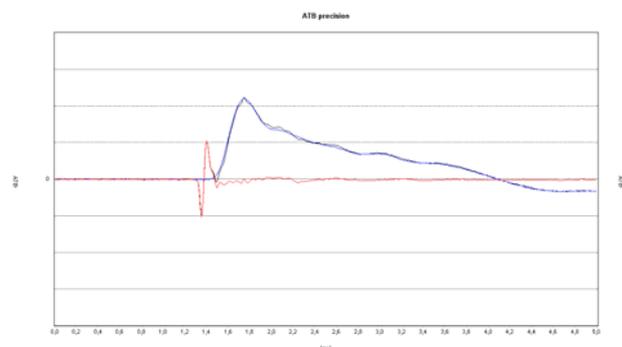


Bild 5.14

Bild 5.13 zeigt die ideale Sprungantwort der Richtig. Das Signal steigt steil an und fällt nach einer Spitze gleichmäßig ab. Der Abfall entsteht durch die Hochpass Funktion aller

Lautsprecher. Es werden wegen des Strahlungswiderstandes nur die Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz übertragen.

Das Bild 5.14 der Demo zeigt die zeitliche Trennung von Hoch- und Mitteltönen. 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.

### 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.

Bei dem Demo Lautsprecher wird eine Weiche, der Theorie von Linkwitz entsprechend, mit 24dB/Oktave verwendet. Die Weiche besitzt 4 Energiespeicher. Die 4 Energiespeicher sind ideal, um das Zeitverhalten der Weiche mit einer elektrischen Messung zu zeigen.

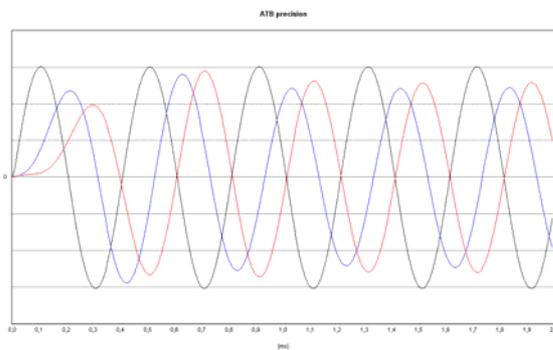


Bild 5.15

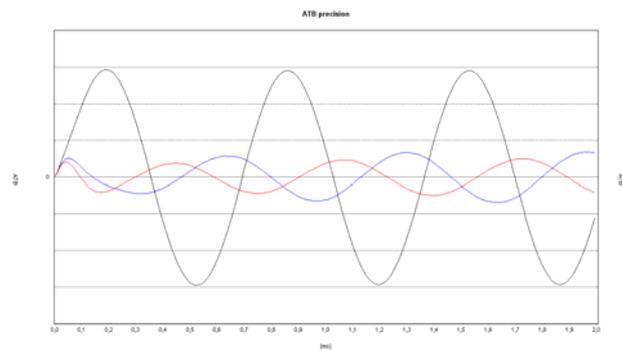


Bild 5.16

Bild 5.15 zeigt das Zeitverhalten des Tiefpasses mit dem 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 entsprechende Anordnung der Lautsprecher ausgeglichen werden. Das Einschwingverhalten der Weiche verändert den Klang am meisten. Der Burst des Ausgangssignals, rot, fängt mit einer kleinen Amplitude an, 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 5.16 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.

### Die 3D-Darstellung

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.

Es werden hauptsächlich zwei Messungen benutzt. Die Messungen unterscheiden sich durch das Messsignal.

### Wasserfall

Die Wasserfall Darstellung benutzt als Generator Signal den Cosinus-Burst und zeigt das Verhalten für den eingeschwungenen Zustand. Beschreibung der Messung unter W 1. Die Dynamic-Measurement Darstellung zeigt den nicht eingeschwungenen Zustand.

Beschreibung der Messung unter W5.

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

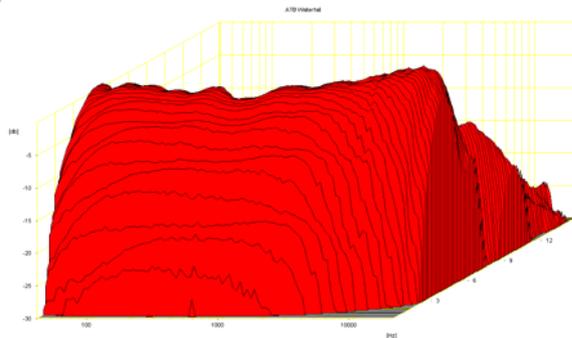


Bild 5.17

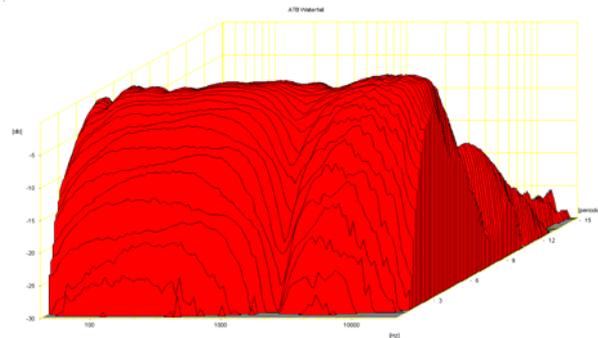


Bild 5.18

Der Lautsprecher Richtig zeigt in Bild 5.17 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 5.18 bei der Übergangsfrequenz vom Mittel-zum Hochtöner eine starke zeitliche Verzögerung. Der Mitteltöner ist nicht an den Hochtöner angepasst. Der Einbruch bedeutet auch, wie bei der elektrischen Sinus-Burst Messung gezeigt, die 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 mit den Mitten.

### Das Ausschwingverhalten

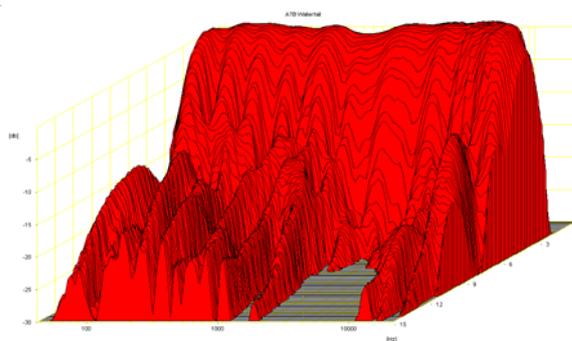


Bild 5.19

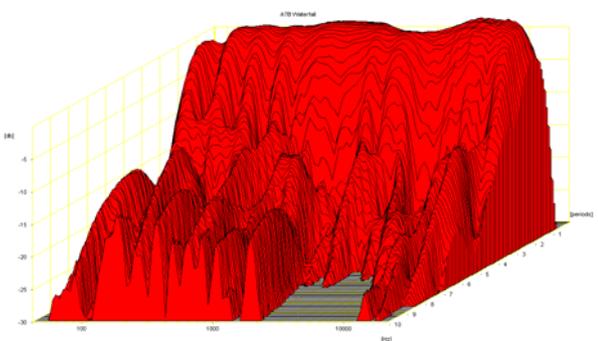


Bild 5.20

Auch das Bild 5.19 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 Mittel-Tieftöner 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 5.20 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.

### 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. Dies zeigt die zeitliche Darstellung der Musik im Oszilloskopbild im Kapitel 2. DAS MESSIGNAL.

### Einschwingverhalten

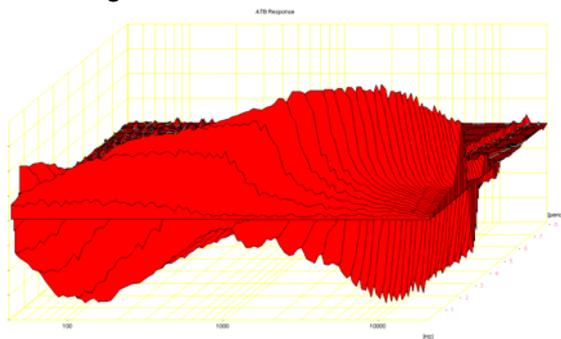


Bild 5.21

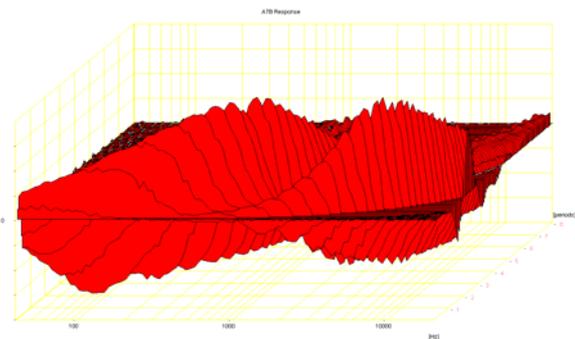


Bild 5.22

Die Bilder zeigen das Einschwingverhalten der beiden Lautsprecher.

Bei der Richtig im Bild 5.21 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 Hochpass Funktion des Lautsprechers. Die kann physikalisch nicht vermieden werden.

Bild 5.22 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.

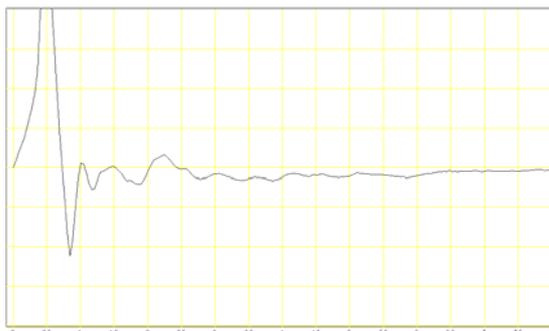


Bild 5.23

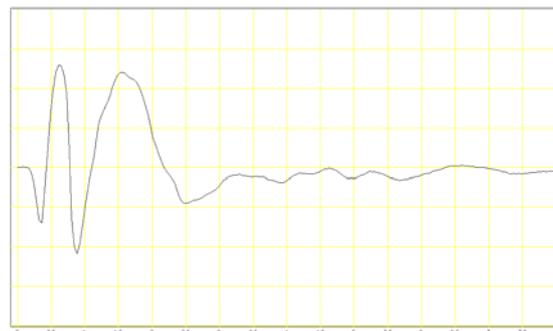


Bild 5.24

Die Bilder der Analysefunktion des Dynamic-Measurement Programmes zeigt eine Scheibe aus dem 3D Bild der Demo. Die Frequenz beträgt 3700Hz. Das Bild 5.23 der Richtig zeigt nur einen Impuls mit einem leichten Durchschwingen. Das Bild 5.24 der Demo zeigt den zerstückelten Impuls. Das Einschwingen beginnt mit einer negativen Amplitude, gefolgt vom 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

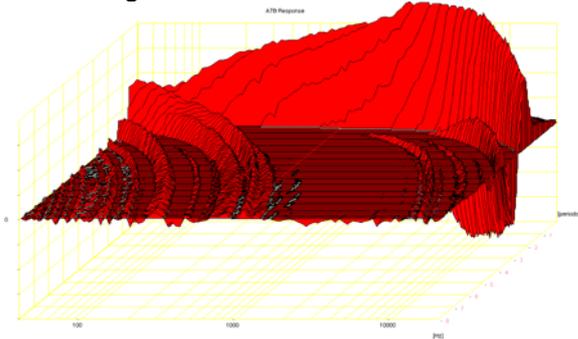


Bild 5.25

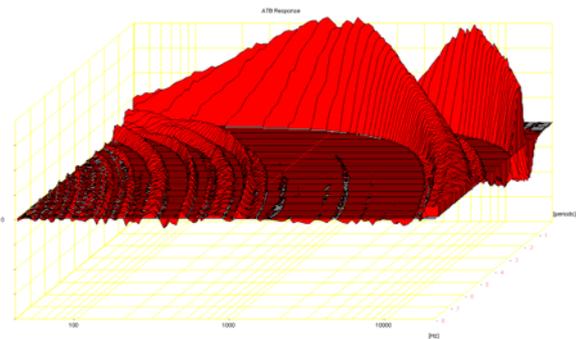


Bild 5.26

Bei den Bildern wird das Ausschwingverhalten der Lautsprecher gezeigt. Bild 5.25 zeigt die Richtig. Der Gebirgszug im Tieftonbereich zeigt den Schalldruck des Bassreflexrohres. Bei der Demo, Bild 5.26, 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.

## 5.2 DIE SCHALLWELLEN IM LAUTSPRECHERGEHÄUSE

Die Schallwellen in einem Lautsprechergehäuse zeigen auch ein Zeitverhalten. Die Luft bildet ein Feder-Masse System. Dies wird von dem Physiker Helmholtz beschrieben. Die Thiele–Small Theorie beschreibt, wie die vom Gehäuse eingeschlossene Luft auf den Lautsprecher wirkt. Hierbei wird die Luft als homogen schwingende Masse betrachtet. Dies ist aber nicht der Fall. Die Luftbewegung wird stark von der Gehäuseform sowie dem Ort der Anregung (Position des Lautsprechers) beeinflusst. Die schwingende Luft hat immer eine Rückwirkung auf den Lautsprecher. Auch die Laufzeit der Luft im Gehäuse muss berücksichtigt werden. Der Lautsprecher und die Luft bilden ein schwingendes System mit Resonanzen und entsprechenden Ein- und Ausschwingverhalten. Das Verhalten ist im Schalldruckverlauf des Lautsprechers sichtbar. Die auf die Lautsprechermembran stoßenden Reflexionen werden, gerade von den modernen Lautsprechern mit harter Membran, abgestrahlt. Durch die Anregung mit dem Sinus-Burst wird der zeitliche Schalldruckverlauf dargestellt. Zur Untersuchung des Schalls im Gehäuse wurden an die 500 dokumentierte Messungen durchgeführt. Hier werden die Ergebnisse gerade angedeutet. Zwei Lautsprechergehäuse werden mit Mikrofonen bestückt.

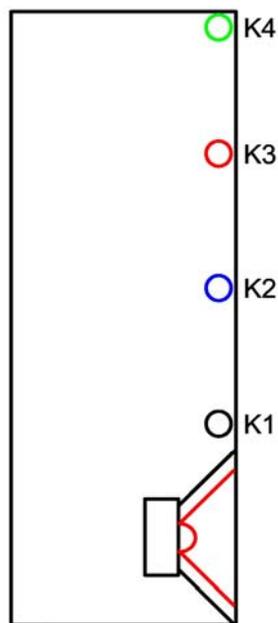


Bild 5.27

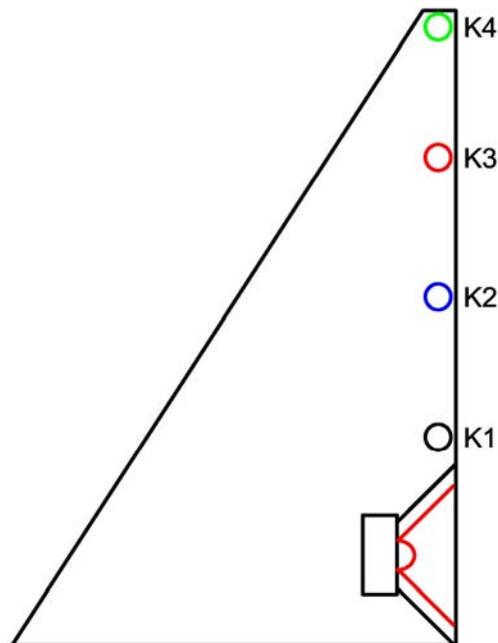


Bild 5.28

Das Bild zeigt die mit den Lautsprechern bestückten Gehäuse, um das Zeitverhalten des Schalls zu messen. Das rechteckige Gehäuse, Bild 5.27, entspricht den üblichen Lautsprechergehäusen. In Bild 5.28 wird das dreieckige der TQWT gezeigt.

Die Schallbewegung im Gehäuse.

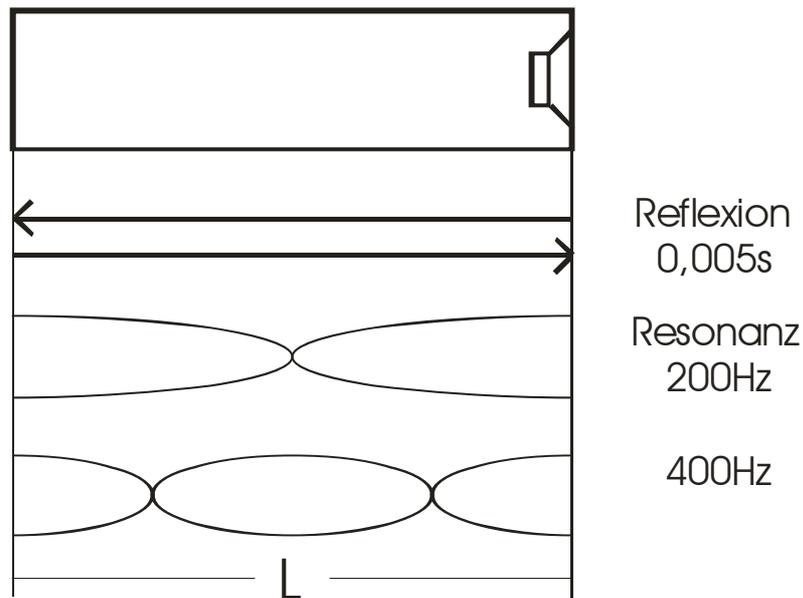


Bild 5.29

Bild 5.29 zeigt die Ausbreitung des Schalls im rechteckigen Gehäuse.

Die Zeit für die Reflexion wird entsprechend der Formel berechnet:

$$t = \frac{2L}{c} = \frac{2 * 0,84m}{340 \frac{m}{s}} = 0,005s \quad L = \text{Gehäuselänge}$$

Die Resonanz wird entsprechend der Formel berechnet:

$$f = \frac{340 \frac{m}{s}}{2L} = \frac{340 \frac{m}{s}}{2 * 0,84m} = 200 \frac{1}{s} = 200Hz \quad L = \text{Gehäuselänge}$$

Bei der Anregung kann die Generatorfrequenz in einem weiten Bereich um 200Hz liegen.

Die folgenden Messungen zeigen den Schalldruckverlauf der Mikrofone bei der Anregung mit dem Sinus-Burst.

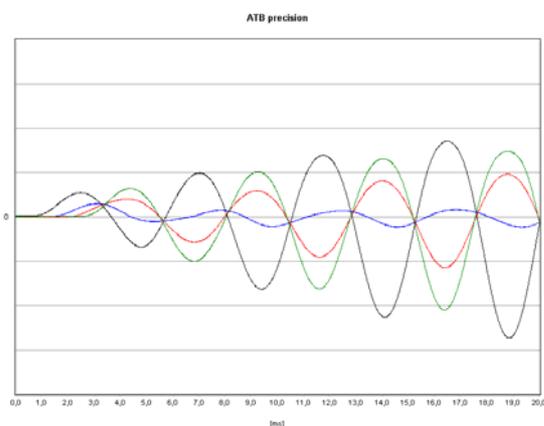


Bild 5.30

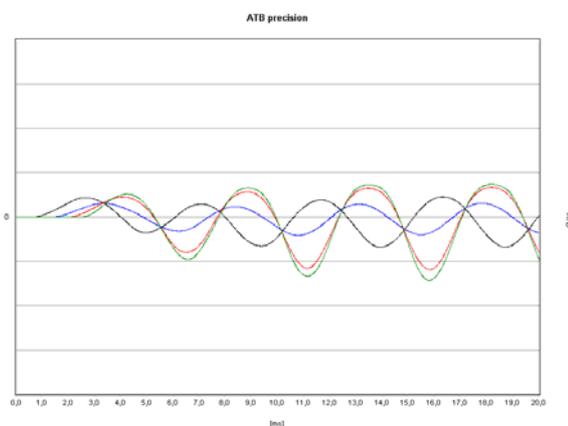


Bild 5.31

Die Bilder zeigen ein Oszillogramm von den im Gehäuse gemessenen Schalldrücken.

Das Bild 5.30 zeigt das rechteckige Gehäuse. Am Anfang ist die Laufzeit des Schalls gut zu erkennen. Das obere Mikrofon zeigt die längste Verzögerung. Als Weiteres sind die ansteigenden Amplituden der Schalldrücke zu erkennen. Auch nach mehr als 4 Perioden ist das System noch nicht eingeschwungen. Durch die gleichmäßige Anordnung der Mikrofone sind die Resonanzen gut zu sehen.

Das Bild 5.31 zeigt das dreieckige Gehäuse. Auch hier ist am Anfang die Laufzeit zu sehen. Entgegen der Erwartung ist die Schallwelle am oberen Mikrofon nicht verschwunden. Sie besitzt sogar die höchste Amplitude. In dem Gehäuse können sich keine stehenden Wellen bilden. Es ist keine Resonanz zu erkennen.

Zur weiteren Untersuchung wird im Nahfeld das Wasserfalldiagramm gemessen.

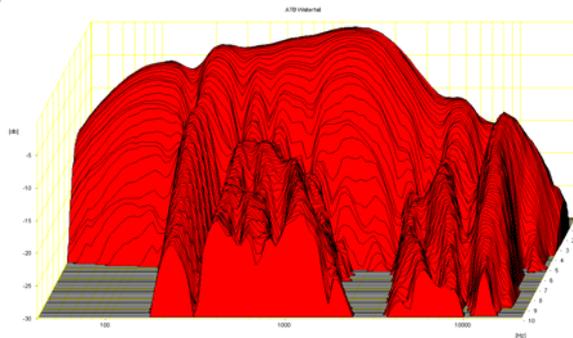


Bild 5.32

Im Bild 5.32 wird der Wasserfall des rechteckigen Gehäuses gezeigt. Deutlich sind die Resonanzen bei 200Hz und 400 Hz zu sehen. Bei 200Hz weist der Einbruch in der Amplitude auf die Reflexion hin.

Das Bild 5.33 des Wasserfalls des dreieckigen Gehäuses zeigt die Resonanzen nicht. Übrig bleibt aber die Reflexion bei 200Hz. Die ist an dem Einbruch im großen Gebirge sowie an dem flacheren Ausläufer bei 200Hz zu erkennen.

Die Resonanzen/Reflexionen bei 1kHz werden bei einem Lautsprecher durch Dämmmaterial bedämpft.

Bild 5.33

Reflexionen zeigt das Dynamic-Measurement Programm sehr eindeutig.

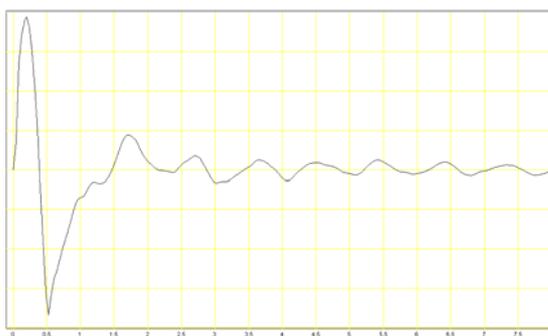


Bild 5.34

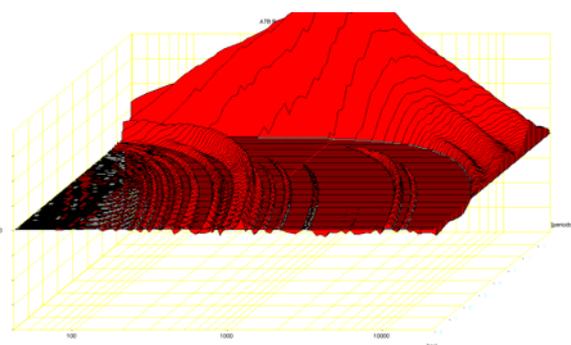


Bild 5.35

Das 3D Step-response Bild 5.35 des dreieckigen Gehäuses zeigt das Verhalten eines Breitbandlautsprechers. Es besteht hauptsächlich aus einem Gebirgszug. Das linke Bild zeigt die Analyse bei 170Hz. Es entspricht ebenfalls dem Breitbandlautsprecher und zeigt die Sinus-Halbwellen mit einem Durchschwinger. Das Verhalten könnte als ideal betrachtet werden, wenn da nicht für tiefe Frequenzen der nach vorn verlaufende Gebirgszug wäre. Dies ist eindeutig eine Reflexion. Die Analyse, Bild 5.34, zeigt das mit der Zeit schwächer werdende Signal. Zwischen zwei Amplituden ist immer die Laufzeit des Schalls von 0,005s zu messen.

Die Reflexion ist eindeutig in einer Frequenzgangmessung zusammen mit der Phasenmessung erkennbar.

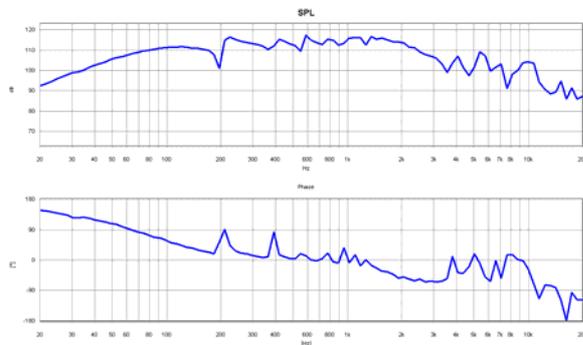


Bild 5.36

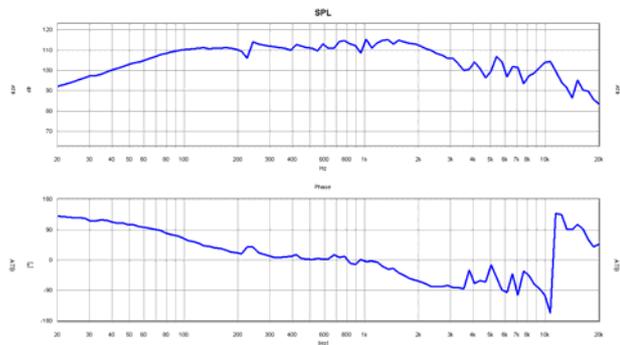


Bild 5.37

Das Bild 5.36 zeigt die Resonanzen des rechteckigen Gehäuses. Das Bild 5.37 des dreieckigen Gehäuses zeigt keine Gehäuseresonanzen. Der Schlenker bei 200Hz im Frequenzgang sowie der Phase weist auf die Reflexion hin.

Die Messungen zeigen, dass sich in einem nach hinten zulaufenden Gehäuse der Schall nicht totläuft. Der Schall bildet seine Resonanz weniger aus. Bestehen bleibt aber die Reflexion, die sogar noch verstärkt wird. Diese ist besonders schädlich für eine richtige Schallwiedergabe, da in einem großen Frequenzbereich alle Töne verhallt werden. Die Untersuchung spricht aber nicht allgemein gegen das dreieckige Gehäuse. Bei der Messung wurde der Lautsprecher an das breite Ende des Gehäuses montiert, entsprechend der Konstruktion der meisten Lautsprecherboxen. An diesem Ort wirken die Reflexionen am stärksten auf den Lautsprecher. Dies gilt auch für das rechteckige Gehäuse. Bei einem Einbau auf ein Drittel der Länge des Gehäuses trifft die Reflexion nicht mehr direkt auf die Membranrückseite. Dies ist die günstigste Position für den Einbau des Lautsprechers. Ein anderer Aufbau zur Vermeidung von Reflexionen im Klangbild ist das gefaltete Gehäuse. Diese Konstruktion entspricht der Nugget aus der Photo Story. Beide Gehäusekonstruktionen vermeiden Resonanz und Reflexion.

### 5.3 DIE DIGITALWEICHEN

Die digitale Signalverarbeitung ist im Audibereich standard. Sie ermöglicht eine fast unbegrenzte Bearbeitung der Audiosignale. Bei den digitalen Geräten wird das analoge Signal mit dem A/D Converter gewandelt. Nach der Umsetzung wird das digitale Signal mit dem für die schnelle Signalverarbeitung entwickelten Rechner, den DSP, bearbeitet. Die Rechnungen entsprechen der Funktion des Equalizers, Dynamikkompessors, Klangstellers und der Lautsprecherweiche. Nach der Berechnung wird das Signal mit dem D/A Converter gewandelt und kann verstärkt und vom Lautsprecher wiedergegeben werden. Das Standardwerk über die Digitale Signalverarbeitung ist im Literaturverzeichnis genannt.

Als Beispiel wird von einer digitalen Weiche der Frequenz- und Zeitbereich untersucht. Ein DSP Board wird mit der Funktion eines Hochpasses programmiert. Der Hochpass wird als IIR und FIR Filter ausgeführt. Die Eigenschaften des IIR Filter entsprechen dem analogen Filter. Der FIR Filter besitzt eine lineare Phase, eine Eigenschaft, die mit dem analogen Filter nur durch hohen Aufwand zu realisieren ist.

#### Die Frequenzgänge

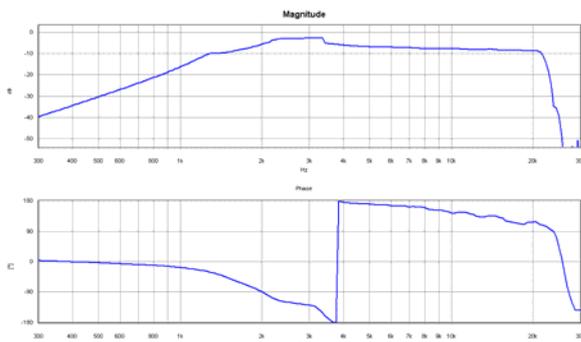


Bild 5.38

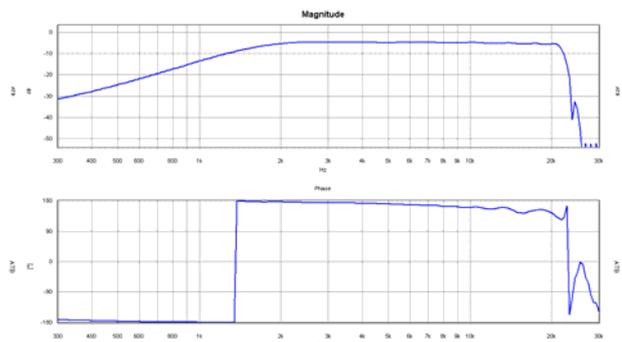


Bild 3.39

Die beiden Bilder zeigen den Frequenz- und Phasengang der Filter. Die beiden Hochpassfilter besitzen eine Grenzfrequenz von 1.5kHz. Der IIR Filter, Bild 5.38 zeigt das typische Verhalten eines analogen Filters mit hoher Güte, eine Überhöhung des Frequenzgangs im Bereich der Grenzfrequenz. Der Abfall der Amplitude von 12dB/Oktave sowie die Phasendrehung von ca.  $-180^\circ$  entsprechen dem Filter 2. Ordnung. Der FIR Filter, Bild 5.39 zeigt fast keine Phasendrehung. Der Sprung in der Phase kommt durch die Darstellung im Bereich zwischen  $-180^\circ$  und  $180^\circ$ . Da die Darstellung bei  $-180^\circ$  endet, wird die Kurve bei  $180^\circ$  fortgeführt. Die Kurve liegt so um  $-180^\circ$ , da der Controller das Signal invertiert. Sehr interessant ist auch der Bereich oberhalb 20kHz. Hier wird das Verhalten des Tiefpassfilters vom D/A Converter gezeigt. Die Art der Filterberechnung scheint auch einen Einfluss auf den Tiefpassfilter zu haben.

#### Der Sinus-Bust

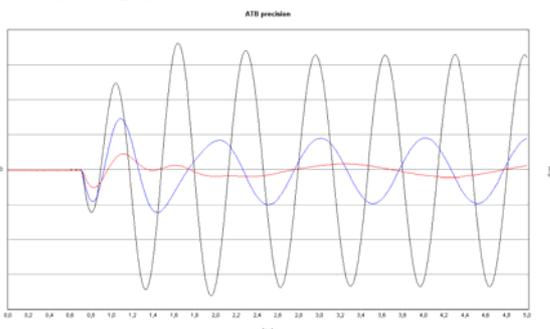


Bild 5.40

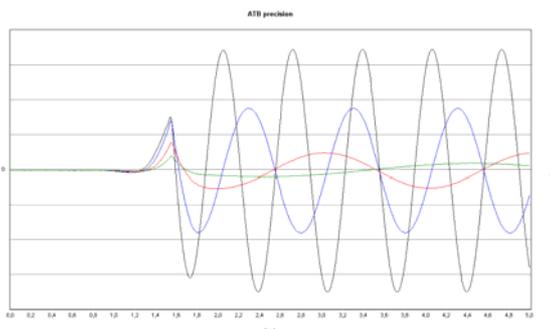


Bild 5.41

Die Bilder zeigen den Sinus –Burst mit folgenden Frequenzen:

Schwarz=1,5kHz, blau=1kHz und rot=500Hz.

Bild 5.40 zeigt den IIR Filter mit dem Verhalten des analogen Filters. Alle Schwingungen beginnen zur gleichen Zeit mit der negativen Amplitude, da die Schaltung invertiert.

Bild 5.41 zeigt den FIR Filter. In dem Bild ist die negative Amplitude durch ein positives Signal ersetzt. Dies ist ein für analoge Schaltungen untypisches Verhalten.

### Das Rechteckverhalten

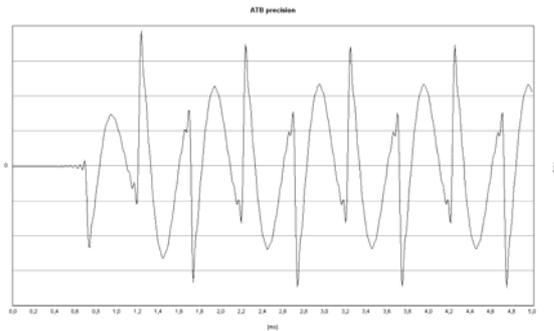


Bild 5.41

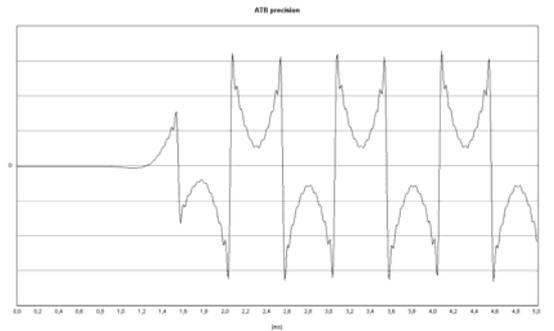


Bild 5.43

Das Bild 5.41 zeigt das wegen der Phasendrehung schlechte Rechteckverhalten des IIR Filters. Im Bild 5.43 ist das Verhalten des FIR Filter zu sehen. Es ist dem Rechteck angenähert. Für höhere Frequenzen wird es dem Rechteck immer ähnlicher. Auch beim Rechteck wird die 1. negative Amplitude durch ein positives Signal ersetzt.

### Die Sprungantwort

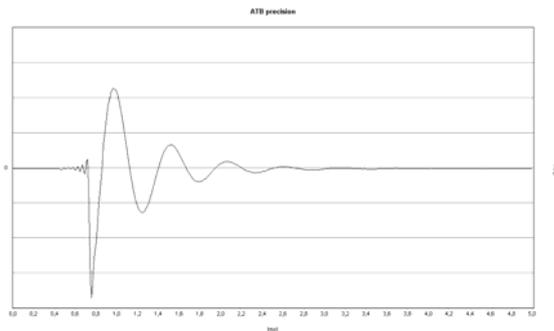


Bild 5.44

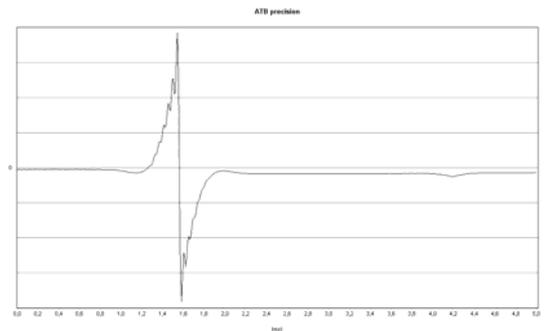


Bild 5.45

Auch das Bild 5.44 der Sprungantwort des IIR Filters entspricht dem Analogen Filter. Die hohe Güte ist an dem langen Nachschwingen zu erkennen.

Das Bild 5.45 des FIR Filters zeigt zum einen das Verhalten eines Allpasses, den Sprung von der positiven zur negativen Amplitude, sowie nach dem Sprung das Verhalten eines Hochpasses. Das Einschwingen ist mit analogen Schaltungen nicht zu realisieren. Die tiefen Frequenzen werden vor den hohen Frequenzen übertragen. Dies bedeutet für die Musikwiedergabe, dass die Grundschwingung, z.B. einer Gitarrensaite, vor der Anregung zu hören ist. Da dies für das menschliche Gehör ungewöhnlich ist, kann der Klang auch nicht als natürlich empfunden werden.

## Das Einschwingen im Wasserfall

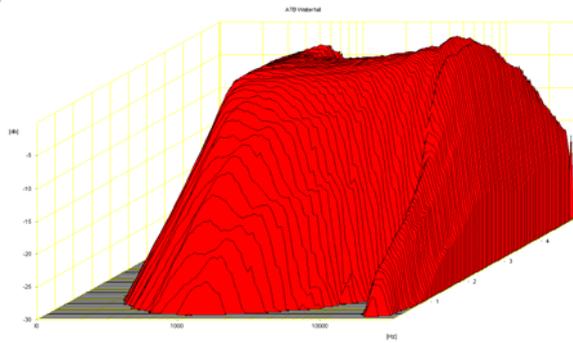


Bild 5.46

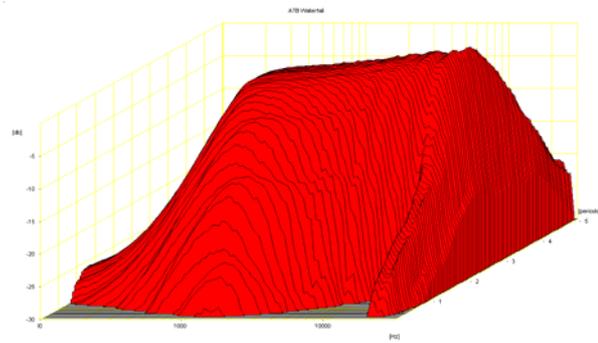


Bild 5.47

Das Einschwingverhalten der beiden Filter in Bild 5.46 und Bild 5.47 unterscheidet sich nicht groß. Ganz unerwartet, da im Frequenzgang nicht zu erkennen, ist das Einschwingverhalten des Tiefpasses vom D/A Converter zu sehen. Der vorlaufende Gebirgszug entsteht durch den Rechenalgorithmus des Filters.

## Das Ausschwingverhalten im Wasserfall

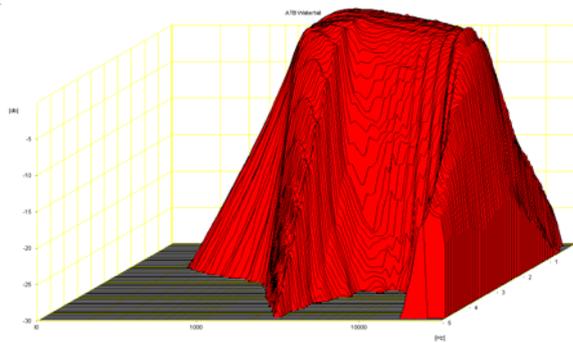


Bild 5.48

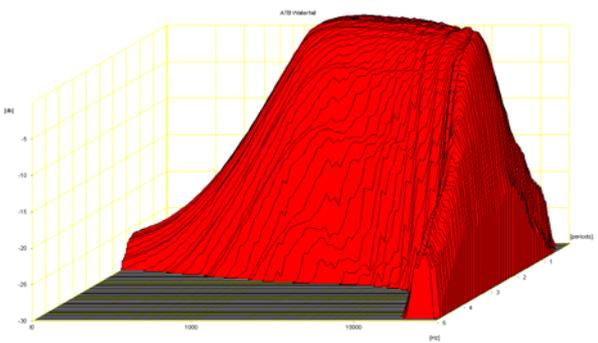


Bild 5.49

Im Bild 5.48 des Ausschwingverhaltens ist die hohe Güte des IIR Hochpasses in dem langen Nachschwingen bei 2kHz zu erkennen. Dies zeigt, dass gerade bei digitalen Filtern das zeitliche Verhalten nicht mehr im Frequenzgang zu erkennen ist. Der Entwickler sollte, wenn ihm die ATB Wasserfallmessung nicht zur Verfügung steht, wenigstens die Sprungantwort messen. Auch im Ausschwingen ist ein Gebirge des Tiefpasses vom D/A Converters zu sehen. Die vor- und nachlaufenden Signale zeigen das Verhalten eines gerechneten Filters. Dieses Verhalten kann nicht im Frequenzgang erkannt werden. Da die vor- und nachlaufenden Signale in einem nicht mehr hörbaren Frequenzbereich liegen, kann dieses Verhalten akzeptiert werden. Dass dieser Filter aber doch hörbar ist, zeigen Hörvergleiche und die Dynamic-Measurement Messung.

### 3D Step-response

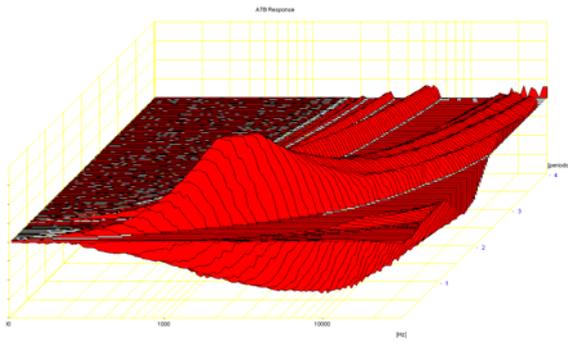


Bild 5.50

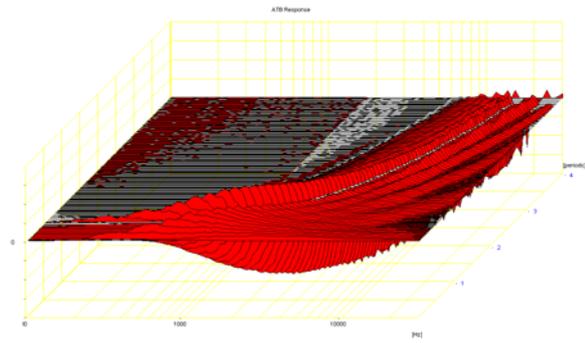
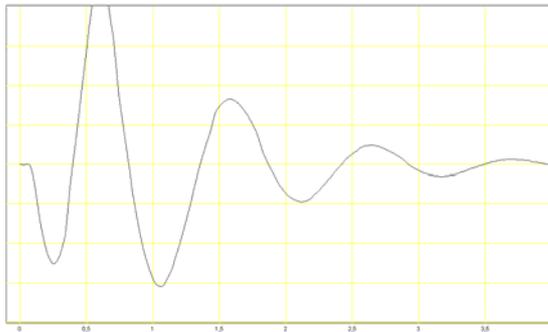
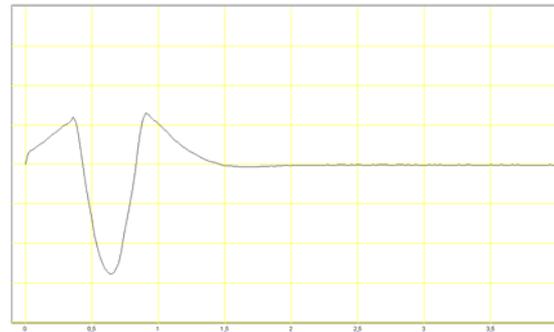


Bild 5.51

Die beiden Bilder 5.60 und 5.61 des Einschwingverhaltens der Dynamic-Measurement Messung zeigen ein vollkommen unterschiedliches Verhalten. Da bei der Überlagerung von Hoch- und Tiefpass das Bild unübersichtlich erscheint, wird mit der Funktion Analyse für eine Frequenz das Oszillogramms gezeigt.



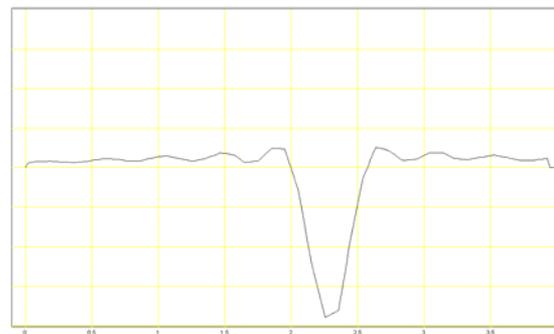
IIR 2kHz



FIR 2kHz



IIR 10kHz



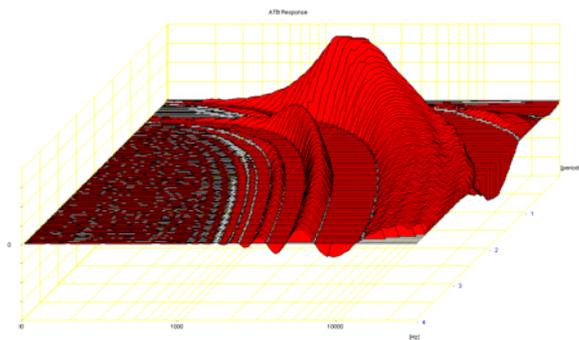
FIR 10kHz

Bild 5.52

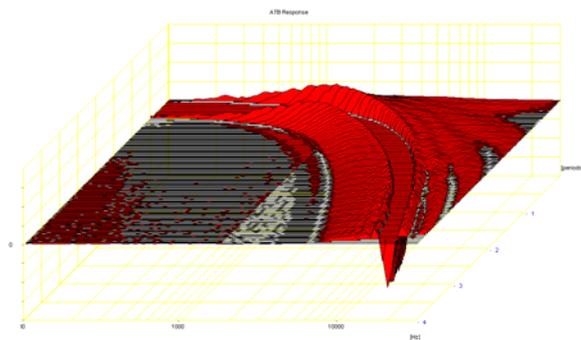
Das Bild 5.52 zeigt Oszilloskop Messungen mit dem Messsignal der Sinus-Halbwellen. Das IIR Filter entspricht auch in dieser Messung dem analogen Filter. Das Signal beginnt mit einer negativen Amplitude und zeigt mit dem positiven Gebirgszug das Überschwingen bei der Grenzfrequenz. Dies ist die normale Funktion des Hochpasses. Bei 10kHz ist der Tiefpass des D/A Converters zu sehen. Das FIR Filter zeigt das vorlaufende, positive Signal. Bei beiden Filtern ist schon bei 10kHz das Tiefpassfilter durch die hochfrequente Schwingung zu sehen. Das Filter, das außerhalb des hörbaren Bereichs liegt, beeinflusst auch den hörbaren Frequenzbereich. Dies zeigt auch die Erfahrung bei den CD Spielern. Bei einigen Spielern ist die Charakteristik des Filters umschaltbar. Jede Filtereinstellung besitzt

ihren eigenen Klang. Auch die SACD Spieler benutzen für die CD Wiedergabe das Filter, obwohl es technisch nicht notwendig wäre.

Bei den Audio DVD Player wird das Filter durch die Upsample-Funktion in den Frequenzbereich bei 50kHz verschoben. So ist sein Einfluss weit von dem hörbaren Bereich entfernt. Deshalb kann ein Audio DVD Player bei der CD Wiedergabe nicht die Klangpunkte eines CD Spielers erreichen.



IIR Filter



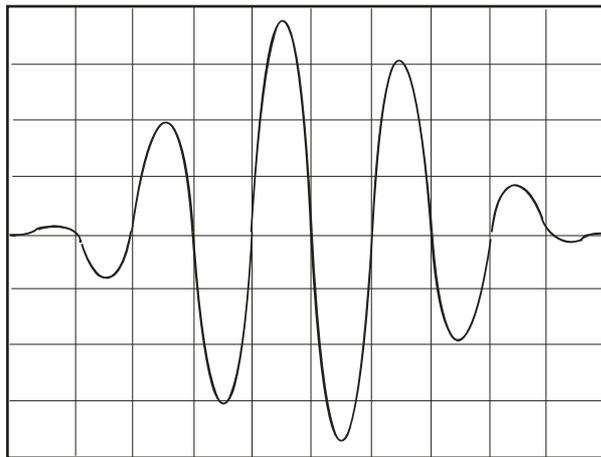
FIR Filter

Die Messungen werden zeigen, dass die Frequenzgangmessung zur Beurteilung der digitalen Weiche nicht reicht. Erst Oszilloskopmessungen zeigen das für den Klang entscheidende Verhalten.

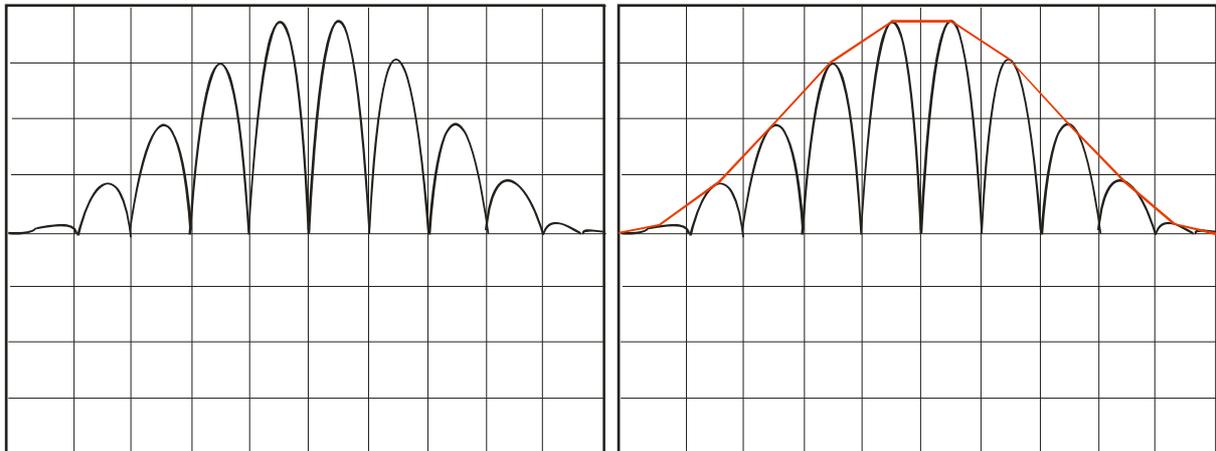
# W1. DAS ATB PRECISION WASSERFALLDIAGRAMM

Bei der ATB precision Wasserfall Messung wird der Cosinus-Burst als Generatorsignal benutzt. Der Cosinus-Burst besteht aus 5 Sinusschwingungen, die mit einem mathematischen Fenster aus dem Sinus-Burst berechnet werden. Der Cosinus-Burst ermöglicht das Ein- und Ausschwingen der Teststrecke. Der TEF Analyser und das ATB precision zeigen das gleiche Messergebnis. Beim TEF wird das Messergebnis gefiltert und beim ATB wird ein gefiltertes Messsignal benutzt. Dies vereinfacht die Messung, die nur aus einer Oszilloskop Messung besteht. Für jede Messfrequenz wird ein Oszillogramm gemessen. Die Oszillogramme werden dann zur Wasserfalldarstellung zusammengesetzt.

Der Weg vom Oszillogramm zur Wasserfalldarstellung



Nach der Messung des Oszillogramms mit genauer zeitlicher Zuordnung von Generator und Messsignal wird das Messsignal gleichgerichtet.



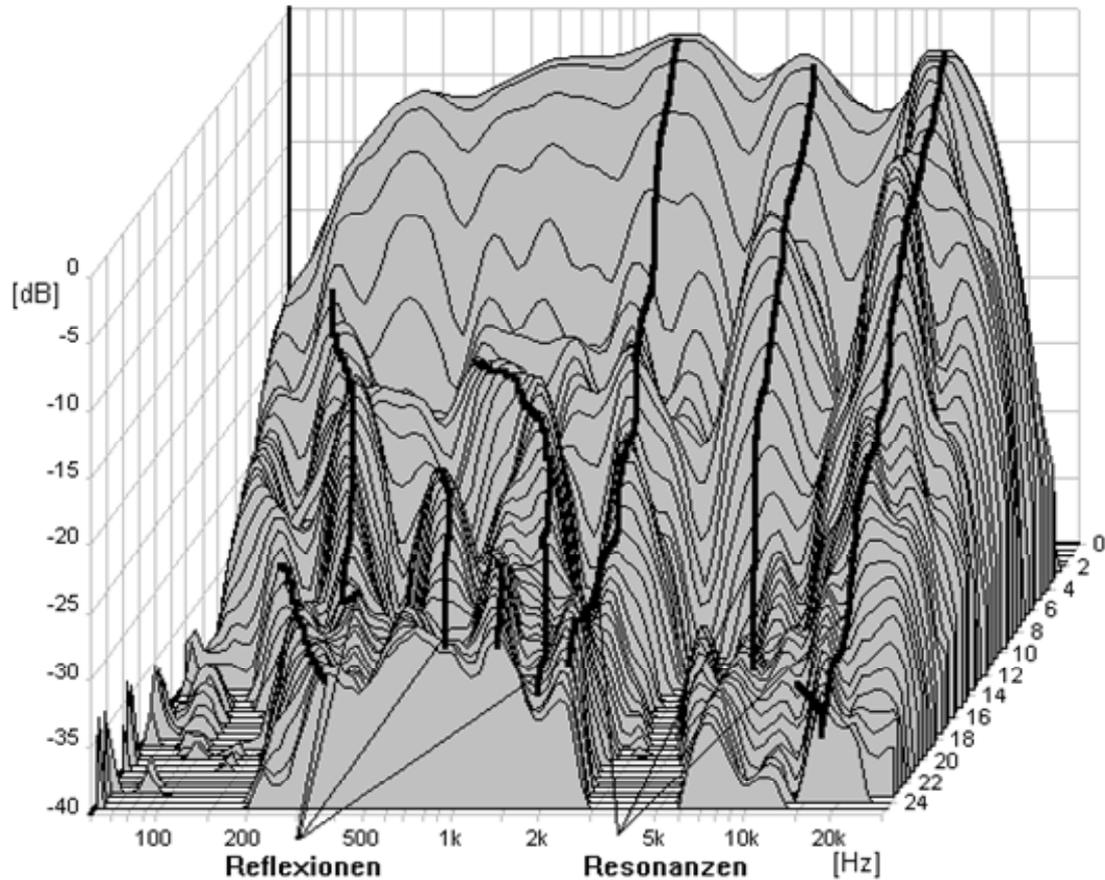
Das gleichgerichtete Signal wird mit einem Digitalfilter zur Hüllkurve umgerechnet. Für die Darstellung werden die Amplitudenwerte logarithmiert.

Die einzelnen Hüllkurven werden im Wasserfalldiagramm dargestellt. Jede Hüllkurve zeigt das zeitliche Verhalten für eine Frequenz.

Im Wasserfalldiagramm werden die Punkte gleicher Periode, (Zeit) mit Linien verbunden. Diese Perioden entsprechen einer normierten Zeitachse. Durch die Normierung der Zeitachse wird es möglich, den gesamten Audiobereich in einem Diagramm darzustellen.

Die Zeit  $t$  für die einzelne Frequenz  $f$  wird mit der Formel

$$t = \frac{1}{f} \times \text{Periode} \quad \text{berechnet.}$$



Durch die Skalierung der Zeitachse in Perioden wird eine Unterscheidung von Reflexionen und Resonanzen möglich. Die Resonanzen erzeugen einen Gebirgszug in Richtung der Zeit- (Periode) Achse. Eine Reflexion wird als ein nach rechts laufendes ( gebogenes ) Gebirge dargestellt. Reflexionen besitzen gegenüber dem direkten Signal eine konstante Verzögerung. Diese Verzögerungszeit wird im Wasserfalldiagramm mit einer Zeitachse in einem Gebirgszug parallel zur Frequenzachse gebildet. Mit der Periodenachse verläuft der Gebirgszug nicht mehr parallel, da die Darstellung frequenzabhängig ist. Bei niedrigen Frequenzen wird die konstante Zeit durch eine kurze, und bei höheren Frequenzen durch eine längere Strecke dargestellt. So ist eine Reflexion an einem von links hinten nach rechts vorn verlaufenden Gebirgszug, der wegen der logarithmischen Frequenzverteilung gebogen ist, zu erkennen.

## W2. GRUNDBEGRIFFE DER FFT

Zeitbereich zur FFT Berechnung

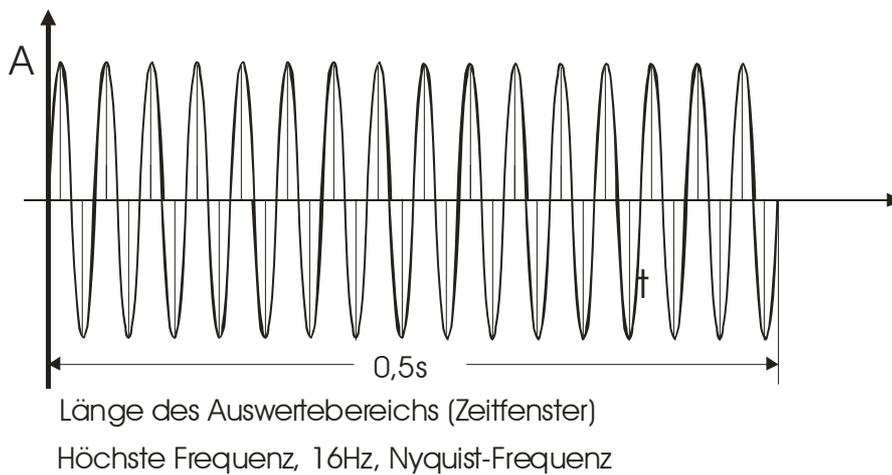
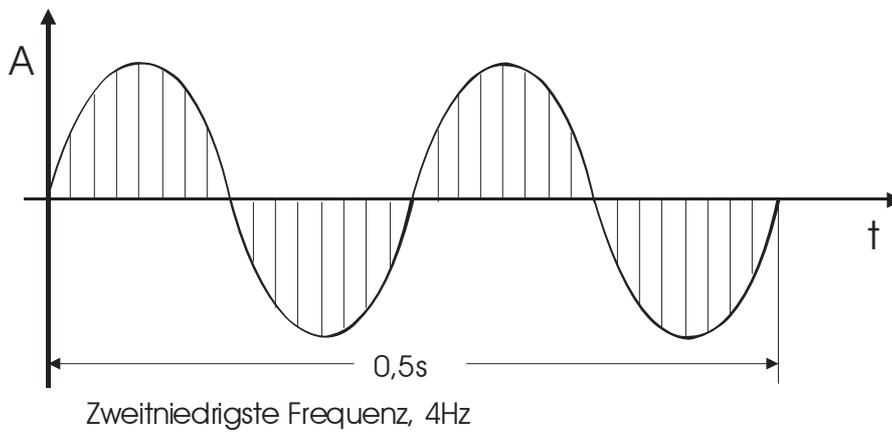
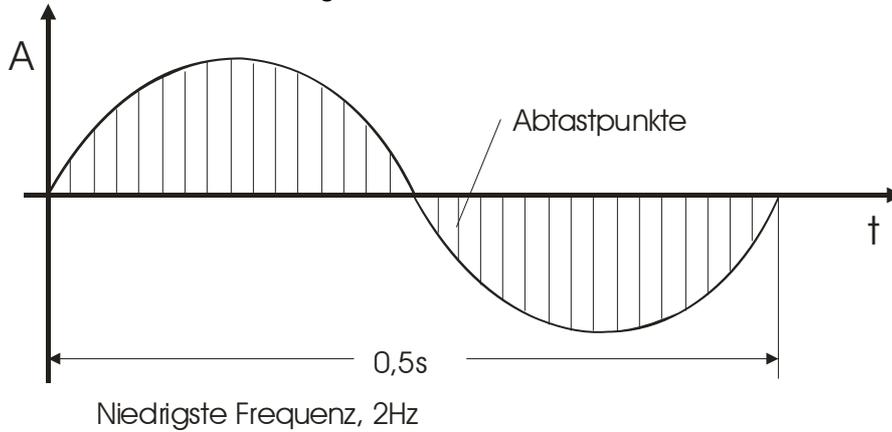


Bild W2.1

Bild W2.1 zeigt den Zeitbereich von Sinus Schwingungen mit den für die FFT verwendeten Abtastwerten.

## Frequenzbereich der FFT

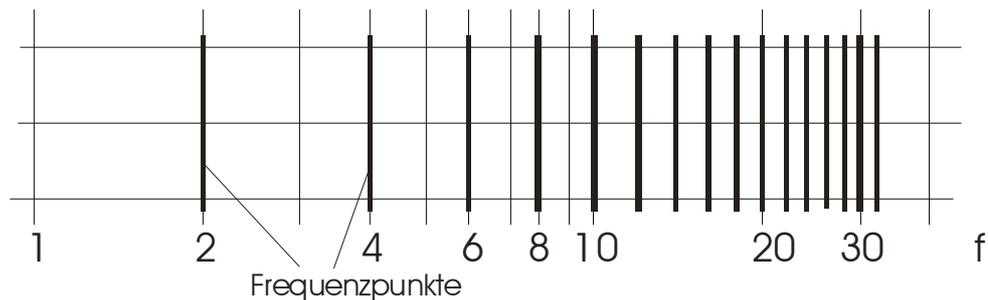


Bild W2.2

Im Bild W2.2 werden die 16 Frequenzen einer FFT mit  $N = 32$  gezeigt

## DEFINITIONEN

### FFT:

Algorithmus, um die Fouriertransformation schnell zu berechnen. Dazu muss die Länge des Eingangsdatenfeldes eine Potenz von 2 betragen (2, 4, 8...16k, 32k, 64k).

### FFT-Größe oder FFT-Blocklänge $N$ :

Anzahl der Abtast- oder Datenpunkte, die das Eingangsfeld der Fouriertransformation bilden. Wie oben erwähnt, ist  $N$  eine Potenz von 2.

### FFT-Ordnung:

Größe der Potenz von 2, die zur FFT-Blocklänge führt. Eine FFT 4ter Ordnung ergibt eine Blocklänge von  $N = 2^4 = 16$ .

### Fensterung:

Multiplikation der Zeitdaten mit einer bestimmten Funktion, um die Werte an den Enden des betrachteten Zeitabschnittes gegen Null gehen zu lassen. Dadurch werden unechte Nebenkeulen im Spektrum reduziert, jedoch auf Kosten der Frequenzauflösung.

### Abtastfrequenz oder auch Abtastrate:

Rate, mit der das Zeitsignal digitalisiert wird. Die Soundkarten wandeln mit 48kHz. Somit entstehen 48000 Abtastpunkte pro Sekunde.

### Nyquist-Frequenz:

Höchste Frequenzkomponente, die durch die FFT berechnet wird. Sie beträgt die Hälfte der Abtastfrequenz.

### Die Abtastwerte für die Auswertung:

Mit der FFT werden die im Zeitbereich gewandelten Datenwerte in den Frequenzbereich transformiert. Für eine 32 Punkte FFT bilden 32 Datenwerte das FFT Eingangssignal. Es ist durchaus üblich, dass nicht der ganze FFT Datenblock mit Messwerten gefüllt wird. Die nicht mit Messwerten gefüllten Daten werden zu Null gesetzt.

### Das Ergebnis der FFT:

Bei der FFT werden die Abtastwerte des Zeitbereichs in den Frequenzbereich transformiert. Einfacher ausgedrückt: Die FFT berechnet die in einem Signal enthaltenen Frequenzen. Das Beispiel zeigt eine FFT mit 32 Punkten, die mit 64Hz abgetastet werden. Es ergeben sich 16 Frequenzpunkte mit einem Abstand von 2Hz.

## Die Zeitauflösung

Die Zeitauflösung der FFT wird bestimmt durch die Anzahl der Abtastwerte, die den Eingang der FFT bilden:

$$\text{Zeitauflösung} = \text{Anzahl der Abtastwerte} / \text{Abtastfrequenz}$$

Im Beispiel der 32-Punkte FFT beträgt die Zeitauflösung

$$\frac{32}{64 \frac{1}{s}} = 0,5s$$

## Die Frequenzauflösung

Die Frequenzauflösung der FFT wird folgend berechnet:

$$\text{Frequenzauflösung} = \text{Abtastfrequenz} / \text{Anzahl der Abtastwerte}$$

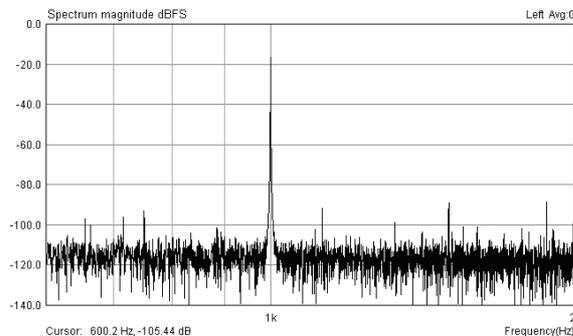
Die Frequenzauflösung ist gleich dem Abstand der einzelnen Frequenzpunkte.

Diese Gleichung gilt aber nur, wenn erstens alle Abtastwerte ausgewertet, und zweitens ein Rechteckfenster benutzt wird.

Bei der in der Lautsprechertechnik üblichen Messung mit Zeitfenster, beträgt die tatsächliche Frequenzauflösung

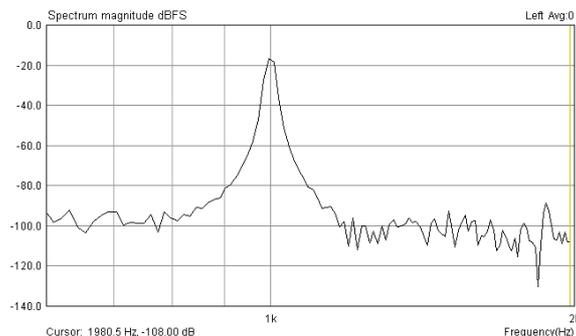
$$1/ \text{Zeitauflösung}$$

Wenn z.B. eine 1024-Punkte FFT für einen Zeitabschnitt von 3ms durchgeführt wird, dann erhalten die ersten 144 Punkte Abtastwerte (bei einer Abtastfrequenz von 48kHz der Soundkarte) und die verbleibenden 880 Punkte werden zu Null gesetzt. Die Zeitauflösung beträgt 3ms (Fenster), der Abstand der Frequenzpunkte 46,88Hz, die Frequenzauflösung jedoch nur 333,33 Hz (= 1/Zeitauflösung=1/0,003). Das Ergebnis dieser FFT werden 512 Frequenzpunkte von 0 bis 24kHz im Abstand von 46,88 Hz sein. Jeder Frequenzpunkt hat jedoch eine Auflösung von 333,33 Hz. Der Punkt bei 1000 enthält also Energie von 8833,33 Hz bis 1166,66 Hz (1000+/- Frequenzauflösung/2).



FFT mit n = 131072

Bild W2.3



FFT mit n = 4098

Bild W2.4

Die Bilder W2.3, W2.4 zeigen die Frequenzauflösung der FFT in Bezug auf die Anzahl der Abtastwerte

## Die Bedeutung der Fensterung auf die Frequenzauflösung

Durch die Fensterung werden unechte Nebenkeulen unterdrückt. Weiterhin wird ein "Versmieren" der Frequenzpunkte verhindert (Energie wandert von dem Frequenzpunkt, zu dem sie gehört, zu den benachbarten. Dies wird durch die angenommene Periodizität bei der Fouriertransformation verursacht). Eine Fensterung wird durch eine Multiplikation der Zeitdaten mit unterschiedlich geformten Fensterfunktionen durchgeführt.

Da die Multiplikation im Zeitbereich einer Faltung im Frequenzbereich entspricht, besteht das Ergebnis aus der Faltung des Frequenzgehalts der Eingangsdaten mit dem Frequenzgehalt des Fensters. Das Ergebnis ist eine Verbreiterung der Frequenzpunkte bzw. eine Verringerung der Frequenzauflösung. Die Frequenzauflösung der gefensterter Daten ist gleich der ungefensterten Frequenzauflösung (1/Zeitauflösung) multipliziert mit der Bandbreite des Fensters.

Ein Rechteckfenster ist in der Praxis überhaupt kein Fenster. Es hat die Bandbreite 1 und besitzt somit keinen Einfluss auf die Frequenzauflösung. Die anderen Fenster haben eine Bandbreite  $>1$ . Das Hanning-Fenster zB. 1,5. Die tatsächliche Frequenzauflösung von Hanning gefensterten Daten beträgt also  $1/\text{Zeitauflösung} * 1.5$ .

Die verringerte Frequenzauflösung muss bei der Lautsprechermessung beachtet werden. Die mit der Fenstertechnik gemessenen schönen glatten Frequenzgänge entstehen durch die stark reduzierte Frequenzauflösung.

## W3. MULTISINUS MESSUNGEN DES ATB PRECISION

Bei der akustischen Frequenzgangmessung ermöglicht auch der Multisinus die Messung mit Zeitfenstern. Hierbei ist das ATB precision besonders genau. Bei der ATB precision FFT Messung wird der Frequenzbereich von 18Hz – 20kHz in vier logarithmisch eingeteilte Bereiche zerlegt. Für jeden Bereich wird eine Einzelmessung durchgeführt. Hierbei werden die Zeitfenster automatisch so gesetzt, dass die volle Frequenzauflösung erhalten bleibt.

Entwicklung des Multisinus KM-C Signals:

Das KM-C Signal wird mit der inversen DFT berechnet. Wird bei der inversen DFT die Phase 0 gesetzt, wird ein Dirac Impuls berechnet. Der Dirac ist ein Impuls mit unendlich hoher Amplitude und der Länge  $t \rightarrow 0$ . Diesen Impuls gibt es nur in der Theorie, er kann nicht als Messsignal benutzt werden. Um bei der inversen DFT ein für die Messung geeignetes Signal zu berechnen, erhalten die Einzelfrequenzen zufällige Phasenwerte. Diese Variation der Phasenlage wird aber nicht ganz zufällig durchgeführt. Durch entsprechende Algorithmen wird erreicht, dass das Verhältnis von der maximalen Amplitude zum RMS Wert, der Crest Faktor, möglichst klein ist. Die Amplituden des Zeitsignals sind so annähernd gleich groß.

Eigenschaften des KM-C Signals:

Das KM-C Signal ist ein analoges Signal für FFT Messungen. Es enthält 512 Frequenzen mit gleicher Amplitude. Durch eine obere Grenzfrequenz besitzt es eine Tiefpasscharakteristik, sodass die Grenzfrequenz des Anti-Aliasingfilters eines A/D Converters außerhalb des Übertragungsbereiches liegen kann. Durch die gleichmäßige Amplitudenverteilung kann die Messstrecke optimal angesteuert werden.

Die FFT Messung mit dem KM-C Signal:

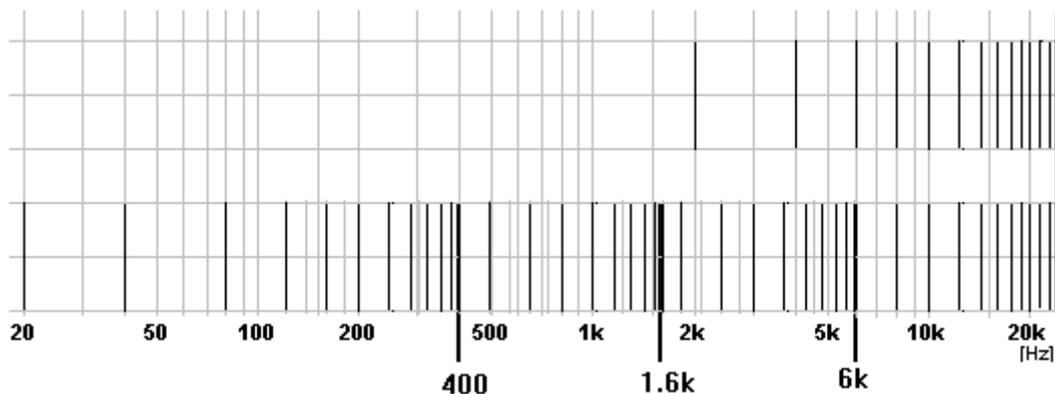


Bild W3.1

Das Bild W3.1 zeigt den Vergleich einer normalen FFT mit der 4-fach FFT. Die dargestellte FFT besitzt 12 Punkte oder Stützstellen. Durch die 4-fach Messung besteht eine annähernd lineare Frequenzverteilung, so dass die Messgenauigkeit (Anzahl der Stützstellen) von Tief- und Hochtonbereich fast gleich ist.

Der Frequenzbereich von 18 Hz bis 24 kHz wird in vier Bereiche unterteilt und für jeden Bereich eine Messung mit 512 Punkten durchgeführt. Die Daten werden zusammengefasst und in einem Messschrieb dargestellt. Die Messung besitzt im Tieftonbereich die Auflösung einer  $512 \times 64 = 32768$  Punkte FFT. Die gleiche Auflösung kann auch mit einer FFT erreicht werden. Bei allen FFT Messungen muss ein Zeitfenster gesetzt werden. Der Anfang des Zeitfensters wird von der Laufzeit des Schalls bestimmt. Mit der Funktion ABSTAND wird die Entfernung von Lautsprecher und Mikrofon und damit die Laufzeit, gemessen. Das Ende des Zeitfensters wird vom Messprogramm festgelegt. Hierdurch werden Bedienfehler vermieden und ein richtiges Messergebnis wird gewährleistet. Ab 305 Hz werden die Zeitfenster so kurz, dass bei der Lautsprechermessung keine bedeutenden Raumreflexionen die Auswertung beeinflussen, das Messergebnis wird so raumunabhängig.

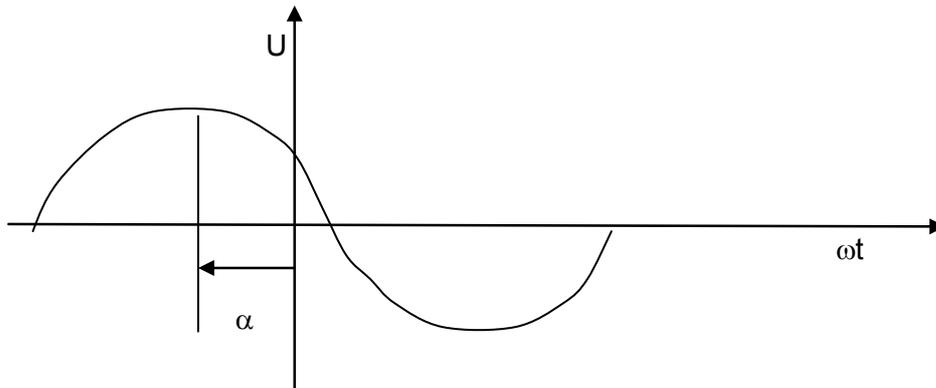
Unterhalb von 300 Hz unterdrückt eine Nahfeldmessung den Einfluss des Messraums.

Die Nahfeldmessung wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

## W4. DIE PHASE

### W4.1 GRUNDLAGEN

Die Phase gehört zur Beschreibung von sinusförmigen Vorgängen wie mechanischen Schwingungen, Wechselstrom, Funkwellen und Schallwellen.



$$U(t) = U_s \cos(\omega t + \alpha)$$

t Zeit,  $U(t)$  Augenblickswert der Spannung,  $U_s$  Scheitelwert (max. Amplitude),

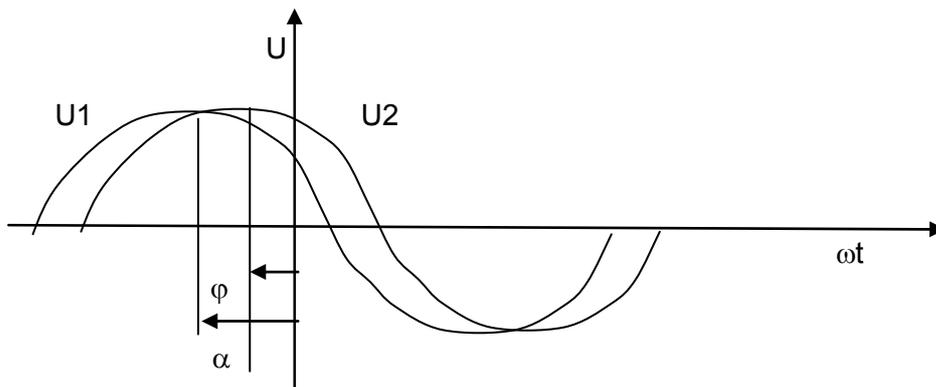
f Frequenz,  $T = 1/f$  Periodendauer,  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  Kreisfrequenz,

$\alpha$  Nullphasenwinkel

Bild W4.1

Das Bild W4.1 beschreibt die Sinus Schwingung.

Der Phasenwinkel  $\alpha$  tritt schon in der Grundgleichung auf. Dort wird er willkürlich durch einen Bezugspunkt, die Zeit 0, gesetzt. Bei zwei oder mehr Schwingungen, die z.B. bei akustischen Signalen vorliegen, ist der Phasenwinkel für die Beschreibung der Messung wichtig.



$$U(t) = U_{s1} \cos(\omega t + \alpha) + U_{s2} \cos(\omega t + \alpha + \varphi)$$

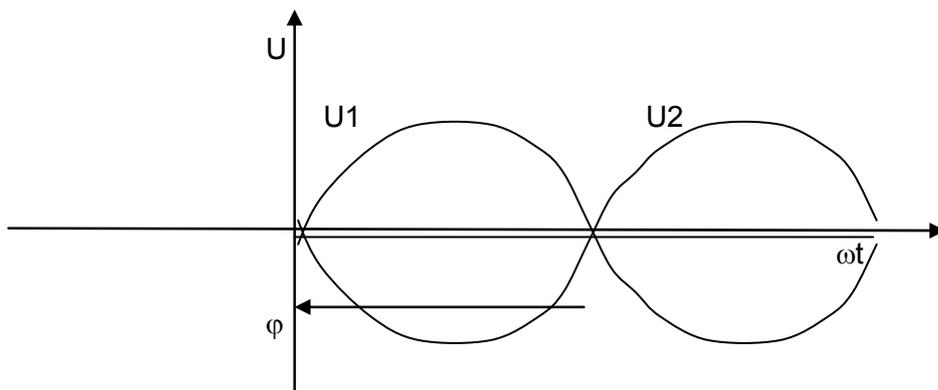
Bild W4.2

Im Bild W4.2 wird gezeigt, dass zwei Schwingungen über den Phasenwinkel  $\varphi$  in Beziehung stehen.

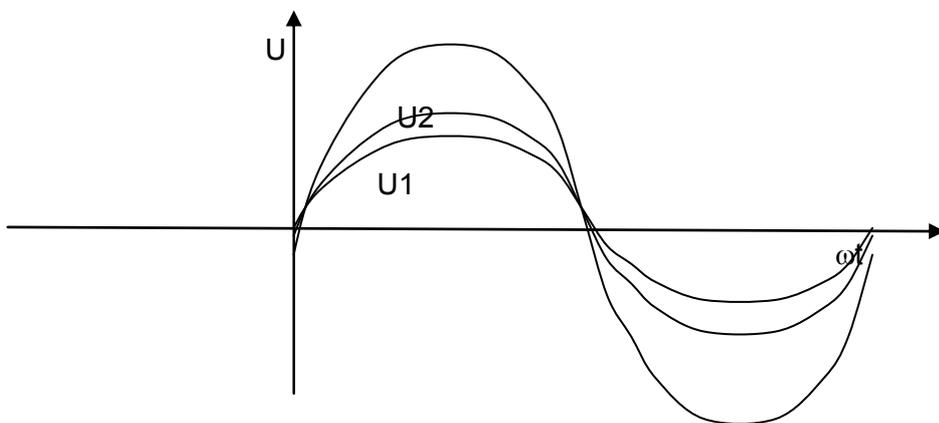
Der Winkel  $\varphi$  bestimmt, wie sich die Schwingungen überlagern.

Beispiele für den die Auswirkung des Winkels  $\varphi$  auf die Schwingung:

$\varphi = 180^\circ \Rightarrow$  Auslöschung



$\varphi = 0^\circ, 360^\circ \Rightarrow$  maximale Verstärkung



$\varphi = 90^\circ, 270^\circ \Rightarrow$  teilweise Verstärkung oder auch als teilweise Auslöschung

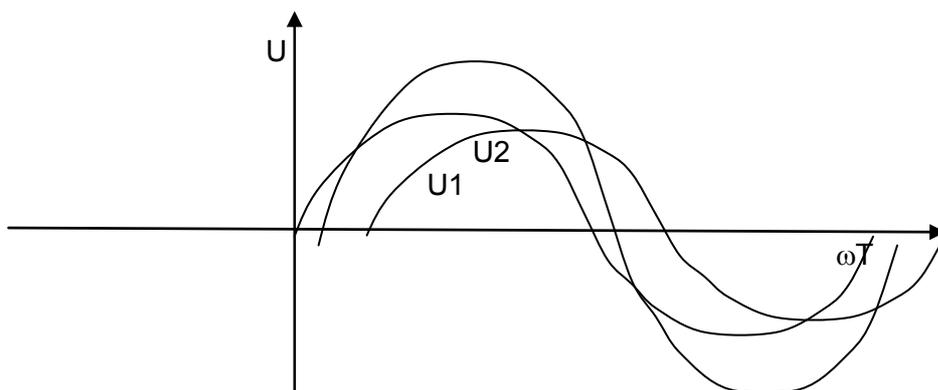


Bild W4.3

Die Darstellungen in Bild W4.3 zeigen die Interferenz von Schwingungen.

## W4.2 Die PHASE BEIM LAUTSPRECHER

Auch bei einem Lautsprecher gelten die Grundlagen der Physik. Zu einer richtigen Beschreibung des abgestrahlten Schalldruckes gehören die Amplitude und die Phase. Die übliche Theorie, dass im Frequenzgang die Phase zu erkennen ist, ist falsch. Dies ist nur bei einfachen elektrischen Schaltungen gegeben. Bei einem Lautsprecher verhindert die sehr aufwändige Übertragungsfunktion, die auch noch Laufzeiten enthält, eine Phasenerkennung aus dem Amplitudenfrequenzgang. Eine Box mit absolut glatterm Frequenzgang kann extreme und damit hörbare Phasensprünge besitzen.

Eine übliche Praxis zur Erkennung der Phasenbeziehung beim Lautsprecher ist folgend. Um zwischen zwei Einzellautsprechern, beim Übergang z. B. vom Mitteltöner zum Hochtöner die Phasenbeziehung aus dem Frequenzgang zu erkennen, wird die Weiche so konstruiert, dass eine maximale Auslöschung zwischen den beiden Lautsprechern entsteht. Wenn nach dem Verpolen eines der beiden Lautsprecher der Frequenzgang ausgeglichen ist, stimmt auch die Phasenlage. Hierbei liegen die Phasen aber meistens  $180^\circ$ ,  $360^\circ$  oder  $540^\circ$  auseinander und das Einschwingverhalten ist schlecht.

Außerhalb der Trennfrequenz bringt die Methode keinen Erfolg. Dies soll das folgende Beispiel zeigen.

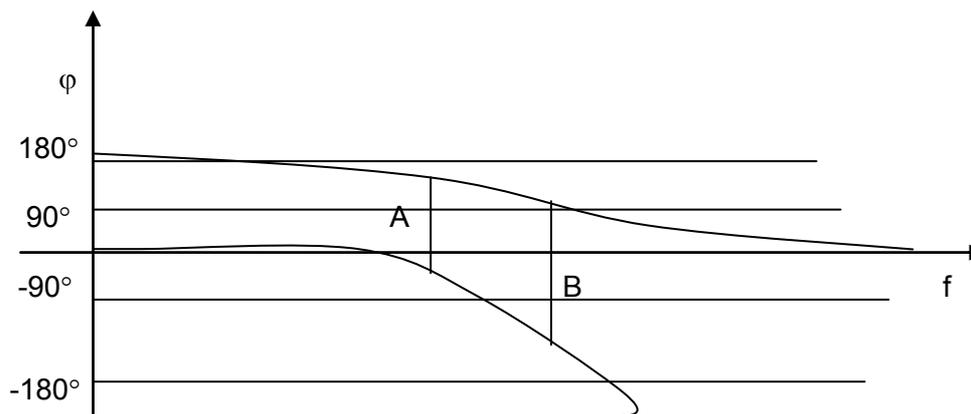


Bild W4.4

Das Bild W4.4 zeigt das Phasenverhalten von Tief- und Hochpass

A = entsprechend der oben beschriebenen Methode ermittelte Phase von  $180^\circ$   
B = Phasenwinkel von  $270^\circ$ . Bei diesem Winkel löschen sich die Schallanteile von Mittel- und Hochtöner teilweise. Ein Verpolen der Lautsprecher zeigt den gleichen Frequenzgang, sodass der Fehler bei der Weichenentwicklung auf die übliche Art nicht entdeckt wird. Da bei einem Phasenwinkel von  $90^\circ$  oder  $270^\circ$  die einzelnen Lautsprecher zu laut sind, entsteht ein nerviger Klang. In diesem Fall ist die übliche Frequenzgangmessung ohne Aussage.

Etliche Untersuchungen zeigen, dass ein ausgeglichener Phasenfrequenzgang für eine natürliche Klangwiedergabe zwingend notwendig ist.

### W4.3 DARSTELLUNG DER PHASE

Die grafische Darstellung der Phase in einem Plot erfolgt in dem Winkelbereich von  $-180^\circ$  bis  $180^\circ$ . Dieser Bereich ist für die Phasendrehung nicht ausreichend. Ein größerer Bereich für den Winkel verschlechtert die Darstellung durch fehlende Auflösung in der y-Achse.

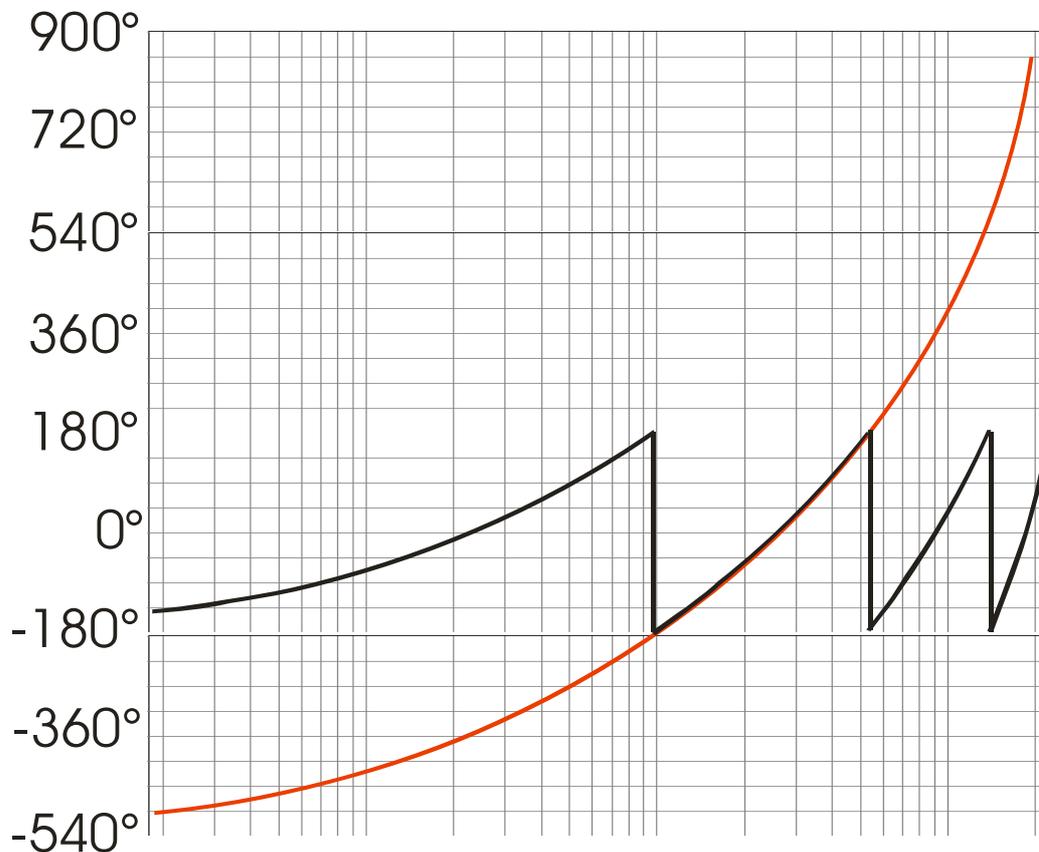


Bild W4.5

Das Bild W4.5 zeigt die reale Phase (rote Kurve) und die Darstellung (schwarze Kurve). Die Sprünge in der dargestellten Kurve sind keine Phasensprünge, sondern entstehen bei der Darstellung. Dies führt besonders bei der akustischen Phasenmessung zu Fehlinterpretationen, wenn der Phasenwinkel in dem Bereich um  $180^\circ$  oder  $-180^\circ$  liegt. Dann springt die Kurve zwischen den Werten. Die blaue Kurve zeigt einen verpolten Lautsprecher.

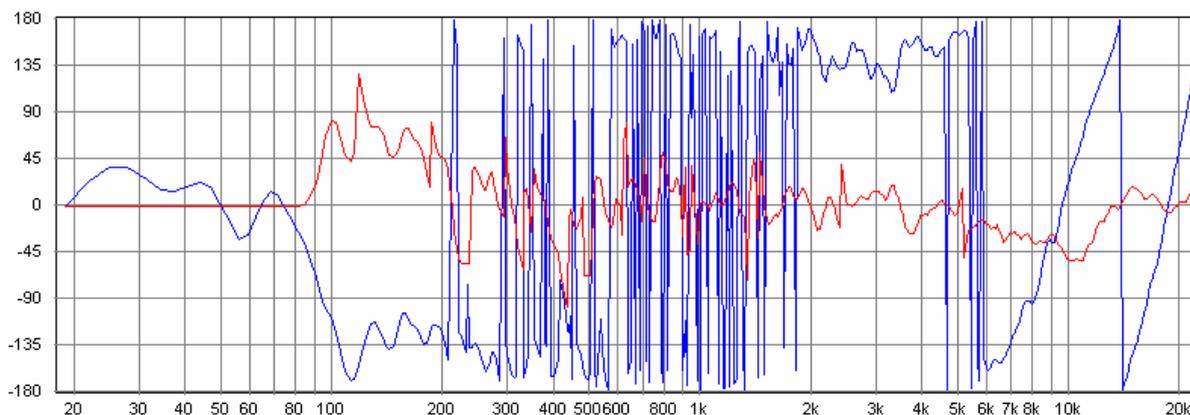


Bild W4.6

## W4.4 ELEKTRISCHE PHASENMESSUNG

Bei der elektrischen Messung wird z.B. die Phase einer Lautsprecherimpedanz gemessen. Diese Messung ist für den störungsfreien Betrieb des Lautsprechers notwendig. Große Phasenwinkel zeigen ein kapazitives oder induktives Verhalten der Lautsprecherimpedanz. Die Folge ist eine Überlastung des Verstärkers. Ebenso kann der Verstärker instabil werden und Schwingungen erzeugen.

Nachdem eine System-Correction vorhanden ist, wird der Lautsprecher an die Klemmen der Testbox angeschlossen. Mit der Schaltfläche IMPEDANZ wird von der Frequenzgangmessung auf die Impedanzmessung umgeschaltet und die Phasenmessung aktiviert. Bei der Phasenmessung wird ELECTRIC gewählt.



Bei der Phasenmessung zeigt sich die Qualität von Soundkarte sowie CD/DVD Spieler. Für Frequenzen > 5kHz kann die Messung falsch sein. Dies zeigt sich an der zu negativen Winkeln abfallenden Kurve.

Bei der Messung der Impedanz eines Lautsprechers sollte kein Lärm vorhanden sein. Der Lärm kann die Messung verfälschen, da der Lautsprecher bei der Impedanzmessung wie ein Mikrofon wirkt.

## W4.5 AKUSTISCHE PHASENMESSUNG

Bei der akustischen Phasenmessung muss die Laufzeit des Schalls vom Lautsprecher zum Mikrofon berücksichtigt werden. Beim ATB PC pro wird die Laufzeit automatisch durch die Berechnung der Nullphase kompensiert.

Bei den Messsystemen, die mit dem MLS-Signal arbeiten, wird die Laufzeit automatisch ermittelt oder vom Bediener eingestellt. Dies erfolgt über das Setzen eines Zeitfensters. Der Anfang des Zeitfensters bestimmt die Laufzeit des Schalls.

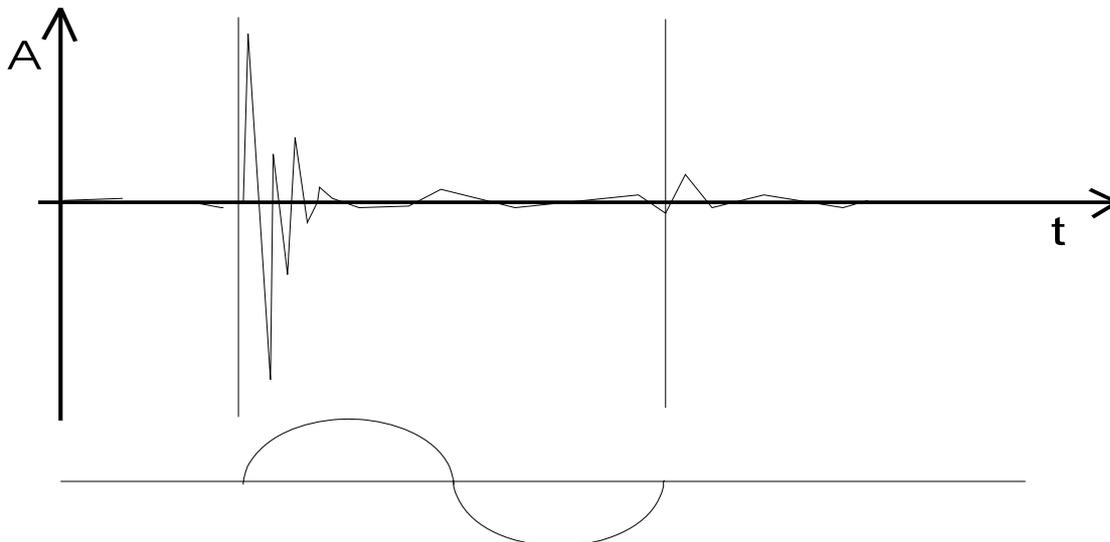


Bild W4.7

Das Bild W4.7 zeigt die Messung zum Setzen des Zeitfensters. Aus dem MLS-Signal wurde der Impuls berechnet. Die Zeit vom Anfang der Zeitachse bis zum Impuls ist die Laufzeit des Schalls. Der erste Teil des Impulses wird von den höchsten Frequenzen des zu messenden Signals gebildet. Die höchsten Frequenzen werden sehr oft verzögert wiedergegeben, z.B. bei einem Einzellautsprecher, der eine Tiefpassfunktion besitzt. Bei Lautsprecherboxen mit mehreren Einzellautsprechern hat der Hochtöner eine vorlaufende Charakteristik, sein Signal

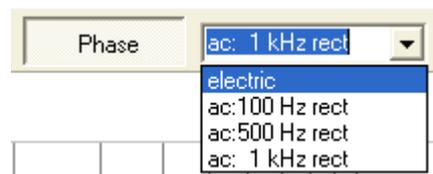
kommt zu schnell. Die Ausnahme sind die zeitrichtigen Lautsprecher. Bei all den anderen Lautsprechern wird durch das Setzen des Zeitfensters als Bezugspunkt für die Nullphase die verzögerten oder vorlaufenden höchsten Frequenzen benutzt. Deswegen ist die Darstellung der akustischen Phase falsch.

#### Durchführung der Messung

Die akustische Phasenmessung von einem Lautsprecher kann nur in ruhigen Räumen durchgeführt werden. Sie ist nicht so unempfindlich gegenüber Störspannungen wie die Frequenzgangmessung. Starke Reflexionen im Messraum verfälschen ebenfalls das Ergebnis. Bei kleinen Räumen sollte der Abstand nicht  $> 0.5\text{m}$  sein. Die Messung sollte mit der Dauermessung durchgeführt werden.



Da die automatische Phasenberechnung hochkomplex ist, kommt es zu Fehlanzeigen. Neben der Schaltfläche für die Phase befindet sich eine Einstellmöglichkeit zur Unterstützung der Messung. Hier wird bei der laufenden Dauermessung einer der drei Bereiche



gewählt. Der richtige Bereich ist gefunden, wenn die Phasenkurve sich nicht ändert. Bei der Messung kann es zu Fehlanzeigen kommen. Dies wird an der sehr zerstückelten Kurve sofort erkannt. Ist die Kurve im Bereich der hohen Amplitude ausgeglichen, kann auf eine richtige Messung geschlossen werden. Bei der getrennten Messung von Lautsprechern kann nur der Verlauf der Phase verglichen werden. Phasenunterschiede von  $180^\circ$  können vom Programm nicht immer richtig ermittelt werden. Bei der gemeinsamen Messung der Lautsprecher ist die Zuordnung aber wieder richtig. Da die Abstandsmessung beim ATB PC nicht benötigt wird, kommt jeder Messtechniker zum gleichen Ergebnis.

## W5. DYNAMIC-MEASUREMENT

### Theorie der 3D Step-Response Messung

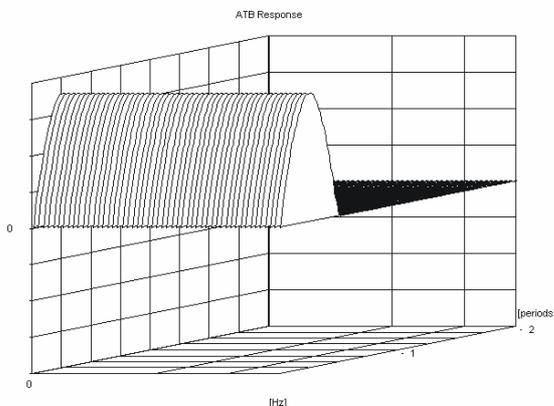
#### Der Klang des Lautsprechers sichtbar gemacht

Lautsprecherentwickler, Tester und Käufer haben immer mehr Schwierigkeiten bei der Beurteilung des Lautsprecherklanges. Die hochwertigen Lautsprecher haben ausgeglichene Frequenzgänge, sind im Klang aber vollkommen unterschiedlich. Dies zeigt, dass der Frequenzgang für die Beurteilung nicht ausreichend ist. Der Frequenzgang wird mit gleichbleibenden (statischen) Signalen wie Sinus oder berechnetes Rauschen gemessen. Musik dagegen besteht aus wechselnden (dynamischen) Signalen. Die Erforschung von Musik zeigt, dass der Klang eines Instrumentes durch Impulse bestimmt wird. Gerade der erste Impuls wie das Zupfen der Gitarrensaite, der Anschlag der Klavierseite, der Schlag auf eine Trommel und das Anblasen einer Orgelpfeife oder Blasinstrumentes. Da der Lautsprecher diese Signale überträgt, muss er auch mit dem dynamischen Signal, dem Sprung, getestet werden. Das Ergebnis ist die Sprungantwort (Step-Response). In der Sprungantwort ist die gesamte Information über die akustischen Eigenschaften des Lautsprechers enthalten. Hierzu gehören der Frequenzgang, der Phasengang und das Einschwingverhalten. Daher ist diese Darstellung so komplex, dass eine Beurteilung des Lautsprechers anhand der Messung kaum möglich ist. Deshalb wurde die 3D Step-Response Messung entwickelt. Bei der Messung wird die Sprungantwort analysiert und als 3D Grafik gezeigt. Die 3D Messung zeigt die Impulswiedergabe für jede einzelne Frequenz durch die zusätzliche Frequenzachse. Die Messung ermöglicht erstmalig eine messtechnische Analyse des Lautsprecherklanges und ist ein unverzichtbares Hilfsmittel für Entwickler, Tester und Kunden.

#### Das Messsignal der 3D Step-Response Messung

Das Messsignal für die 3D Step-Response Messung ist die Sinus-Halbwelle. Bei der Betrachtung von Musiksignalen auf dem Oszilloskop erscheint bei dem Klang entscheidenden ersten Impuls ein der Sinus-Halbwelle entsprechendes Signal. Der Impuls ist entsprechend der Tonhöhe, Frequenz des gespielten Tones, schmaler oder breiter. Daher wird die Messung mit Sinus-Halbwellen verschiedener Frequenz durchgeführt. Diese Messung ist gleichzeitig die Analyse der Sprungantwort.

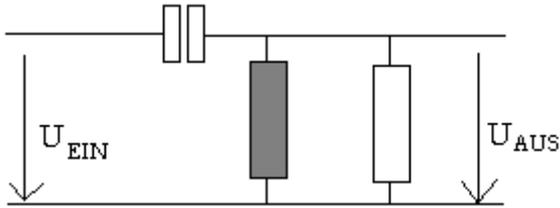
Die Deutung der 3D Step-Response Messung ist durch einen Vergleich von der Darstellung des Messsignals und der Darstellung des gemessenen Signals einfach. Alle Abweichungen von dem Messsignal sind Fehler des Lautsprechers. Bei elektrischen Geräten wie Verstärkern ist bei der Messung kein bedeutender Unterschied zwischen Eingangs- und Ausgangssignal zu erkennen.



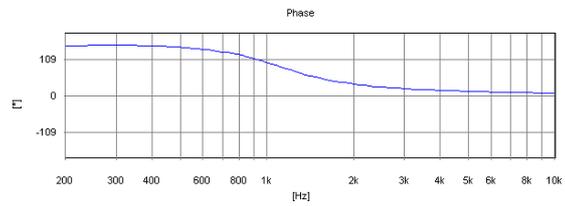
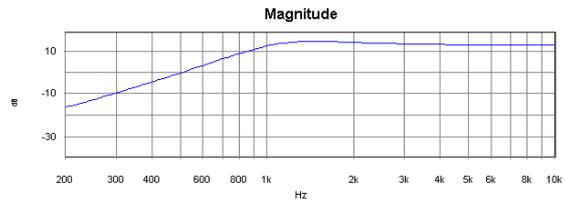
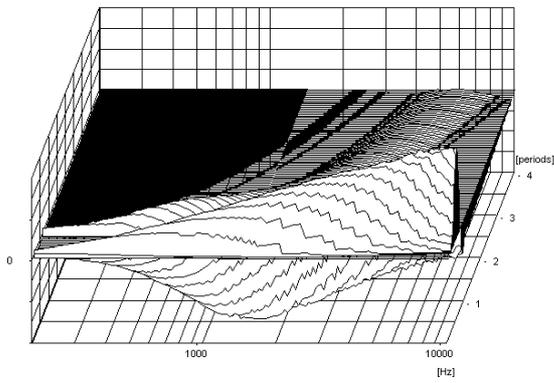
Die Grafik zeigt das Messsignal für die 3D Step-Response Messung. Die y-Achse ist die Amplitude als absolute Darstellung mit +/- also Über- und Unterdruck des Lautsprechersignals. Die x-Achse ist die Frequenz. Die Z-Achse ist die in Perioden normiert Zeit. So können tiefe und hohe Frequenzen mit sehr unterschiedlichen Periodenlängen gleichzeitig dargestellt werden. Außerdem ist die akustische Phase ersichtlich.

Bild W5.1

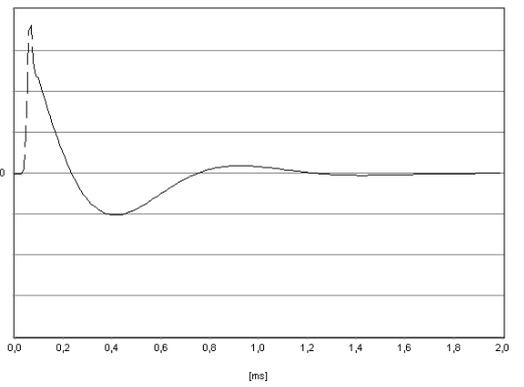
Beispiele für elektrische 3D Step-Response Messung  
12 dB / Oktave Hochpass



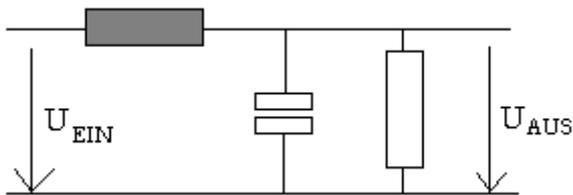
ATB Response



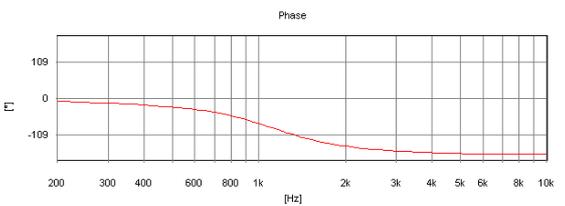
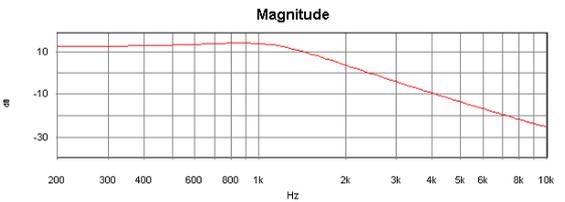
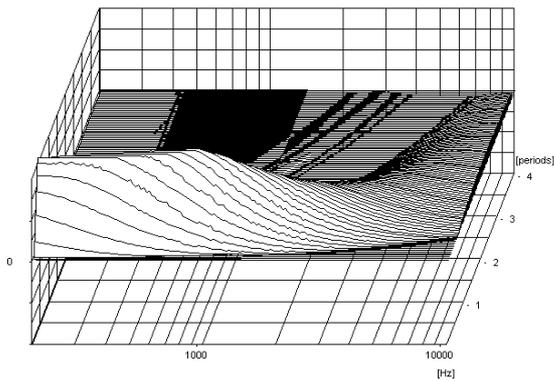
ATB precision



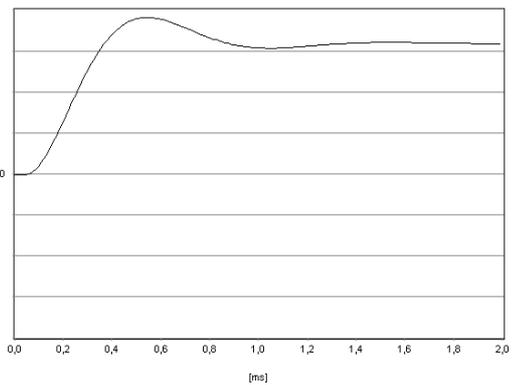
12 dB / Oktave Tiefpass



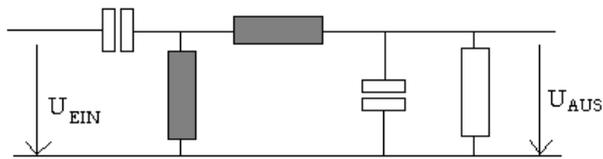
ATB Response



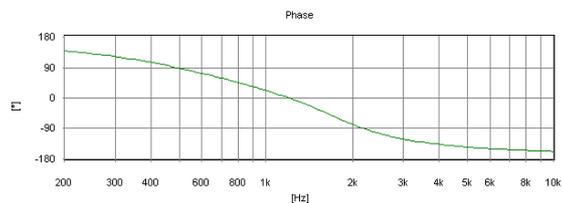
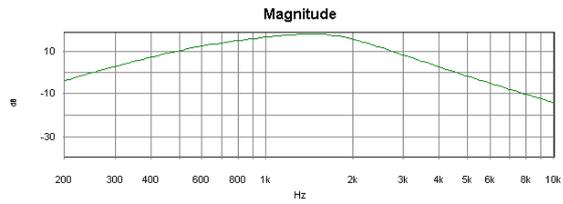
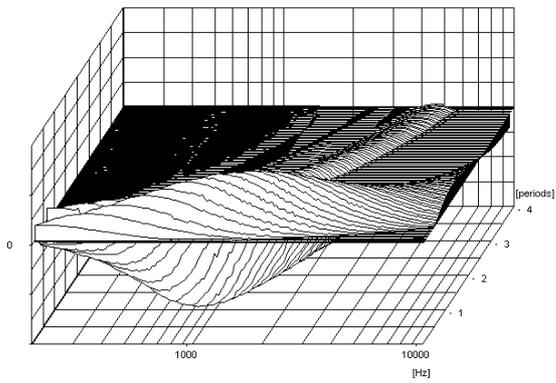
ATB precision



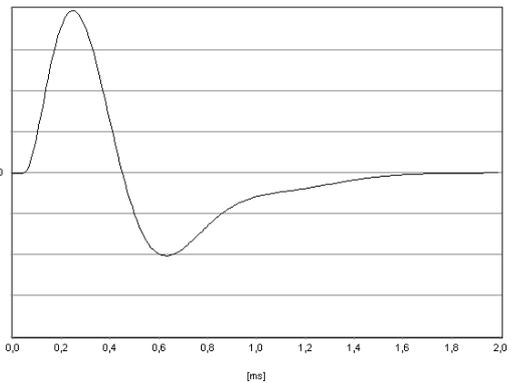
# 12dB / Oktave Bandpass



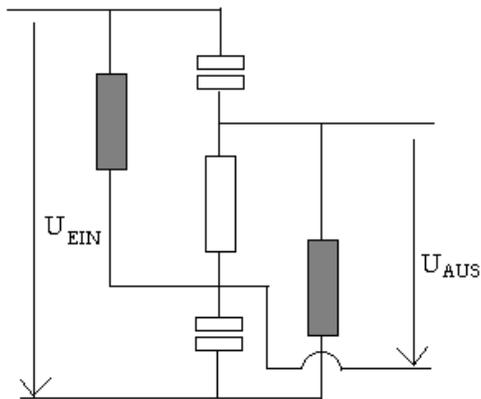
ATB Response



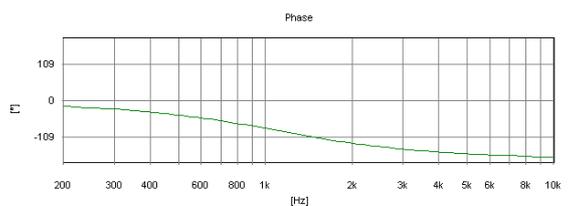
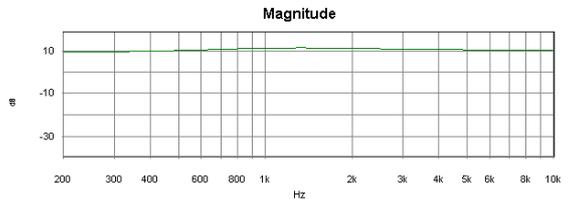
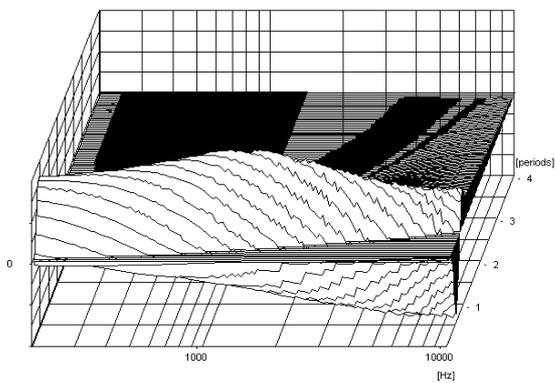
ATB precision



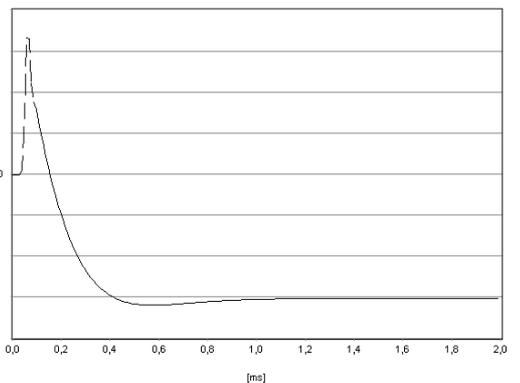
# Allpass



ATB Response



ATB precision



## LITERATURVERZEICHNIS

The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.