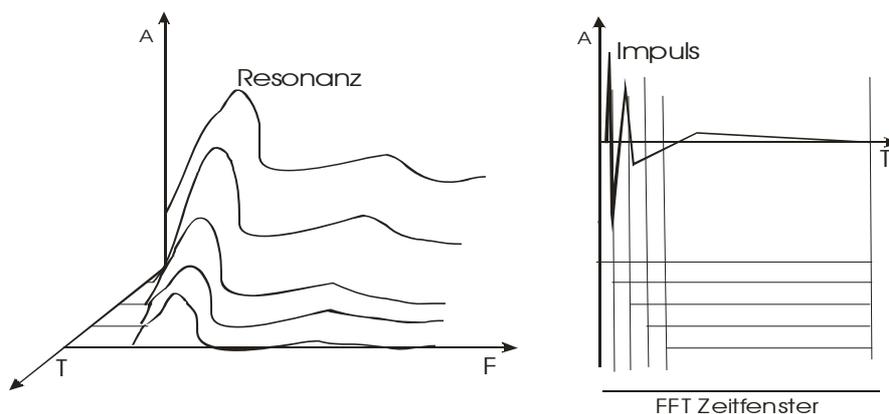


Die Wasserfallmessung mit der FFT

Es bestehen unterschiedliche Verfahren der Wasserfall, Zerfallsspektrum, Messung. Am bekanntesten ist die Messung mit der FFT Berechnung. Als Messsignal wird die Maximal Length Sequence, Maximale Impulsfolge, MLS, oder der Sinus-Sweep benutzt. Die Grundlage für die Messung ist der Impuls. Aus dem Impuls werden mit der FFT für verschiedene Zeitbereiche Frequenzgänge berechnet. Die berechneten Frequenzgänge werden in der 3-D Grafik zusammengesetzt.

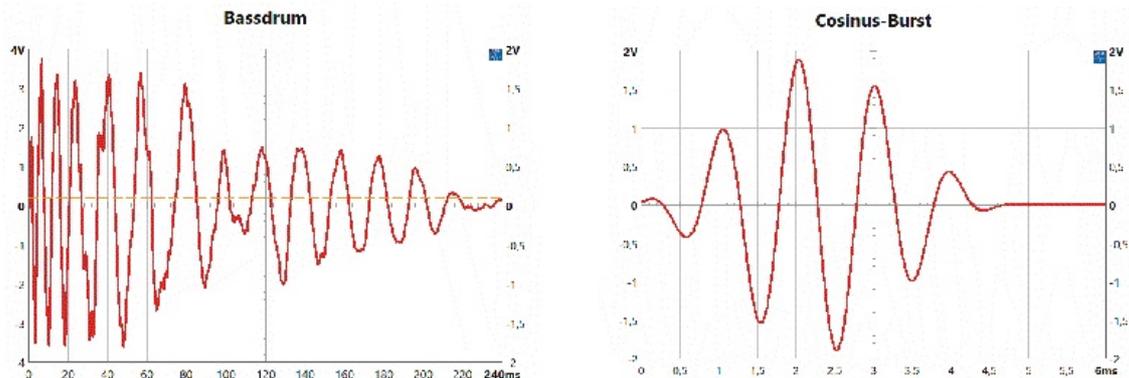


Das Bild zeigt, wie das Zerfallsspektrum mit den FFT Auswertungen entsteht. Rechts ist die Impulsantwort zu sehen. Die senkrechten Linien zeigen die Begrenzung des Wertebereichs für die FFT Berechnung. Der immer kleiner werdende Wertebereich wird durch die rechten, waagerechten Linien gezeigt. Der linke Bereich ohne Linie, wird mit Nullen gefüllt. Verlängert man die Linien zu dem 3-D Diagramm, wird ein Punkt auf der Zeitachse bestimmt. Zu dem Punkt auf der Zeitachse wird eine Kurve gezeigt, die das Ausschwingen des Lautsprechers zeigen soll. Zur Zeit 0, mit Werten für das ganze Zeitfenster, wird der Frequenzgang gezeigt. Dass der Lautsprecher sofort mit dem

Messsignal alle Schwingungen über seinen Frequenzbereich wiedergibt, ist physikalisch nicht möglich. Jede Schwingung besitzt ein Einschwingverhalten. Auch der Lautsprecher nicht, der zusätzlich noch Verzögerungen der Anregung besitzt. Dies zeigt die akustische Phasenmessung. Das Bild, bei dem der gesamte Frequenzgang zurzeit 0 vorhanden ist, hat sich bei vielen Entwicklern eingebrannt. Sie verstehen das Einschwingen sowie das Phasenverhalten nicht. Der Lautsprecher überträgt ja sofort zum Zeitpunkt 0 alles. Bei der Darstellung wird auch übersehen, dass immer der gleiche Impuls ausgewertet wird. So werden zum Beispiel Überhöhungen und Einbrüche im Frequenzgang, die durch zeitliche Abläufe entstehen, nicht gezeigt. Es ist nicht zu sehen, dass ein Hochtöner mit einem zum Mitteltöner unterschiedlichen Zeitverhalten den Mitteltöner im Übergangsbereich auslöscht. Auch ist das zeitliche Verhalten von im DSP eingestellten Filtern nicht zu sehen.

Zu sehen ist nur, dass eine Resonanz ausschwingt. Die Resonanz ist auch schon im Frequenzgang zu sehen. An ihrer Höhe und Breite ist die Güte ausreichend zu erkennen.

Zur Beurteilung der Raumakustik sind Frequenzgangmessungen kaum geeignet. Die Messungen mit Rauschen oder Sinus Sweep besitzen keine Information über die Zeit. Auch sind die tiefen Frequenzen im MLS Rauschen mit geringer Amplitude und im Sinus Sweep nur kurz enthalten. So werden die Raum-Modi, Stehwellen, nicht entsprechend der Musik oder Sprache gezeigt. Jeder Ton besteht aus mehreren Schwingungen, die den Raum einschwingen lassen. Für eine Messung des Übertragungsverhaltens muss auch ein entsprechendes Messsignal benutzt werden. Der Cosinus-Burst besteht aus 5 Schwingungen. Er entspricht dem Musiksignal. So werden die Modi entsprechend des zu hörenden Klanges gemessen.



Die Wasserfallmessung mit dem Cosinus-Burst

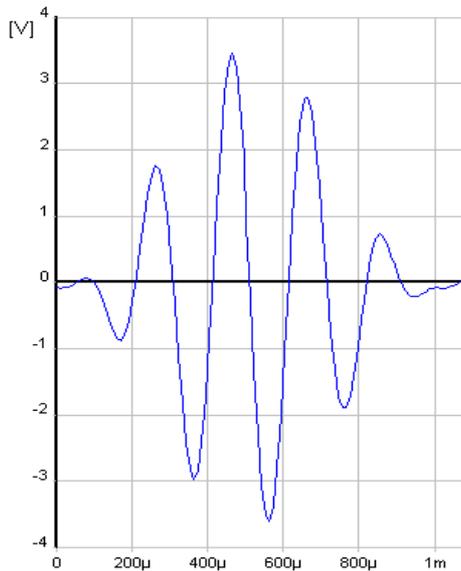
Die Grundüberlegung bei der ATB-Messung des Zerfallsspektrums war die Vermeidung von aufwendigen mathematischen Verfahren. Die Messmethode greift auf die einfache Oszilloskopmessung zurück. Für jede Frequenz wird ein Oszillogramm erstellt und im Wasserfalldiagramm als Gebirge dargestellt. Das einzelne Oszilloskop Bild wird mit dem Cosinus-Burst als Generatorsignal gemessen. Der Cosinus-Burst besteht aus 5 Sinusschwingungen, die mit einem mathematischen Fenster zum Cosinus-Burst umgerechnet wurden. Im Cosinus-Burst ist nur eine Frequenz enthalten. Daher kann er zur Untersuchung des Ein- und Ausschwingverhaltens bei dieser bestimmten Frequenz verwendet werden.

Für die Messung der Raumakustik hat die Wasserfall-Messung mit dem Cosinus-Burst die entscheidende Bedeutung. Im Gegensatz zu den Messungen mit Rauschsignalen oder den Sinus Sweep kann der Raum einschwingen. Jeder Ton besteht aus mehreren Schwingungen. Soll das akustische Verhalten des Raumes gemessen werden, so muss das Messsignal der zu übertragenden Musik oder Sprache entsprechen.

Sehr entscheidend für die Einstellung eines Equalizers ist die Unterscheidung von Modi, Resonanzen und Reflexionen. Die Resonanzen können mit einem parametrischen Equalizer ausgeglichen werden. Eine Reflexion besitzt eine Verzögerung, Delay. Diese kann mit dem Equalizer nicht verhindert werden. Auch besteht eine Reflexion für mehrere Frequenzen. Die Reflexion ist nur durch akustische

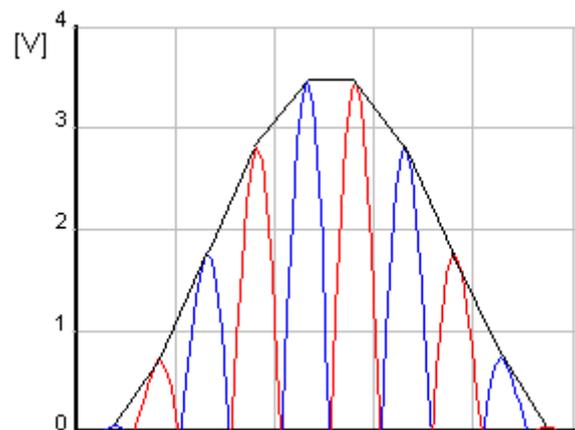
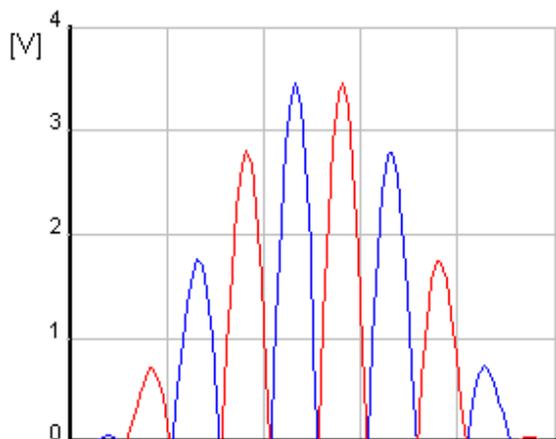
Optimierung des Raums zu verhindern. Mit dem Equalizer lassen sich nur störende Frequenzbereiche abschwächen.

Der WEG vom OSZILLOSKOP zum ZERFALLSPEKTRUM



Das Bild zeigt den Cosinus-Burst

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



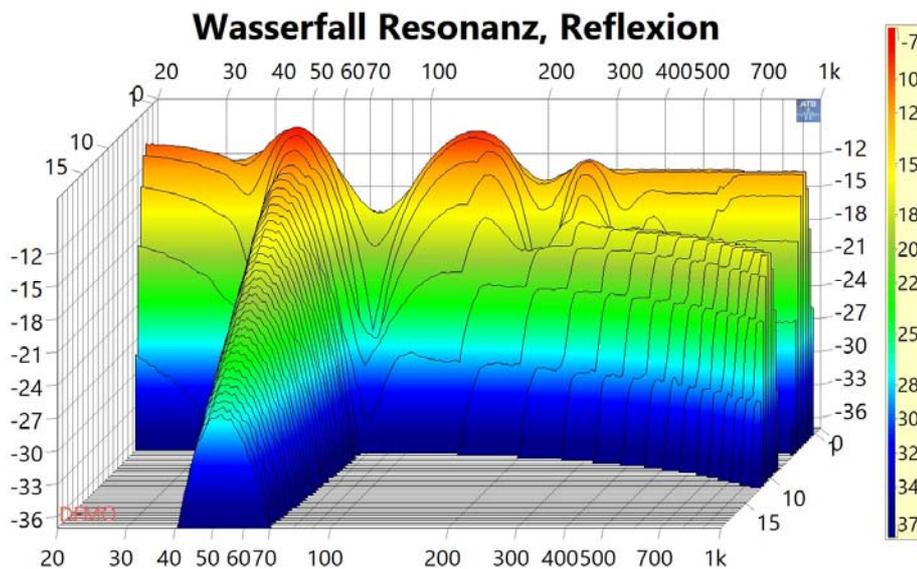
Das gemessene Signal wird gleichgerichtet Signal und mit einem Digitalfilter zur Hüllkurve umgerechnet. Für die Darstellung werden die Amplitudenwerte logarithmiert.

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

Ausschwingverhalten



Im Menü wird die 3D-Ansicht des Ausschwingverhaltens gewählt



Bei der Messung des Ausschwingverhaltens wird als Generatorsignal der Cosinus-Burst benutzt. Nach der Darstellung des Hüllkurvendiagramms wird das Wasserfalldiagramm auf dem Bildschirm erstellt. Die von rechts nach links verlaufenden Linien zeigen die Amplitudenwerte gleicher Periode. 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

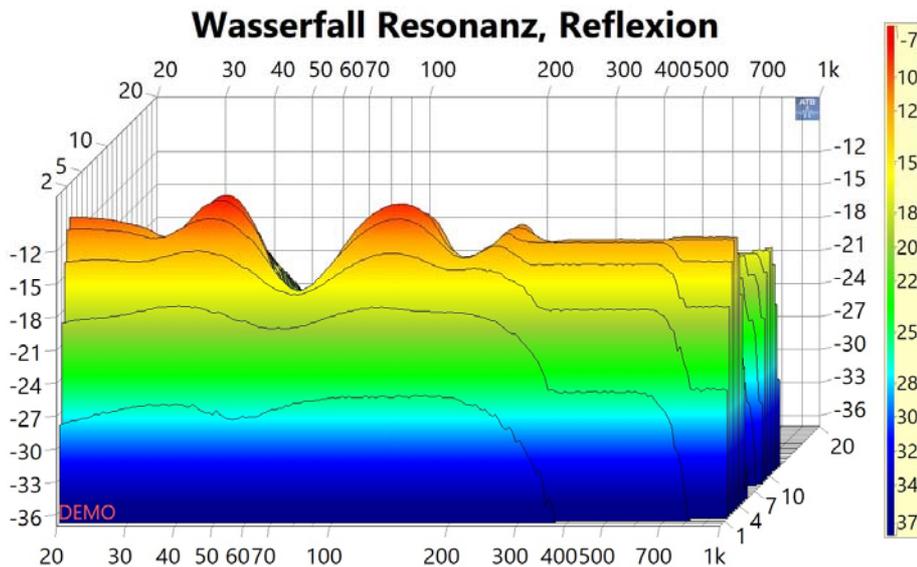
$T = (1/f) \times \text{Periode}$ berechnet.

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.

Einschwingverhalten



Im Menü wird die 3D-Ansicht des Einschwingverhaltens gewählt



Durch einen Vorzeichenwechsel der Zeit- (Perioden) Achse wird das Übertragungsverhalten, das beim Ausschwingen vom Gebirge verdeckt wird, sichtbar. Die Bedeutung dieser Messung zeigt die Untersuchung von Musiksignalen sowie des Hörvorganges beim Menschen.

Bei der Betrachtung von Musiksignalen ist auffällig, dass die Musik sich aus einzelnen Impulsen zusammensetzt. Der einzelne Impuls besteht aus einem Grundton mit zahlreichen Obertönen. Durch die Obertöne steigt der Impuls steil an. Der Abfall erfolgt sanfter, da die Töne ausschwingen. Die exakte Reproduktion des Anstieges ist für die Übertragung der Charakteristik von Musiksignalen entscheidend. Die Bedeutung des Ausschwingverhaltens ist entschieden geringer. Dies zeigt die Klangwiedergabe von Hornlautsprechern. Diese Lautsprecher besitzen ein hervorragendes Einschwingverhalten. Ihr Klang wird von Tonmeistern und Musikern als natürlich empfunden, obwohl der Frequenzgang nicht besonders linear und das Ausschwingverhalten relativ schlecht ist.

Soll eine Übertragungsstrecke auf ihre Eigenschaften bei der Übertragung von Musiksignalen untersucht werden, so ist dies mit der Musik entsprechenden Impulsen am aussagekräftigsten.

Die Notwendigkeit der Untersuchung von Anstieg sowie Verzögerung eines Impulses zeigt die Betrachtung des Hörvorganges. Beim Menschen wird der erste vom Ohr aufgenommene Impuls vom Gehirn besonders ausgewertet. Er enthält die Information für das Richtungshören. Nur wenn die zeitliche Zuordnung der Töne stimmt, wird eine Musikwiedergabe als räumlich empfunden.

Wird das Einschwingverhalten mit dem Signal Cosinus-Burst gemessen, wird gezeigt, wie die Übertragungsstrecke ihren eingeschwungenen Zustand erreicht. Zu erkennen sind das Phasenverhalten und die Laufzeit im Wasserfalldiagramm. Ein optimales Einschwingverhalten zeigt einen gleichmäßigen Anstieg des Gebirges, die Amplituden der Linien gleicher Periode (normierter Zeit) verlaufen parallel.

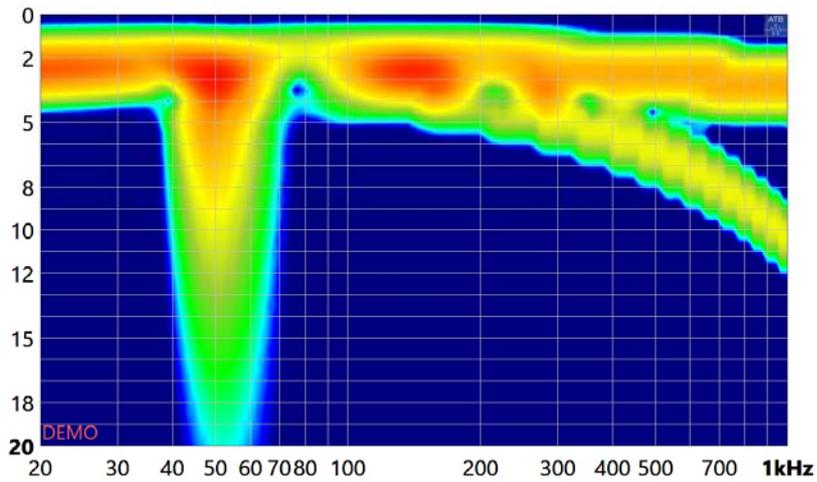
Spektrale Darstellung



Drauf

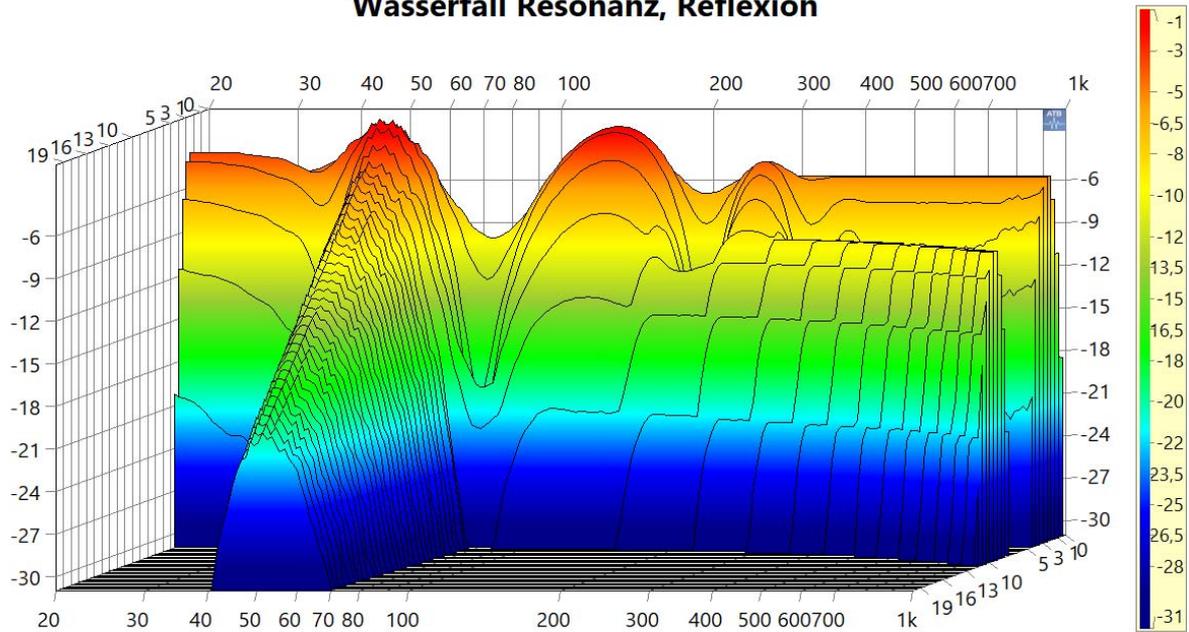
Mit dieser Schaltfläche wird eine 2D-Ansicht aufgerufen.

Wasserfall



Die spektrale Darstellung zeigt das Verhalten in der Ebene. In dieser Darstellung werden die Frequenz und die Zeit in Perioden gemessen.

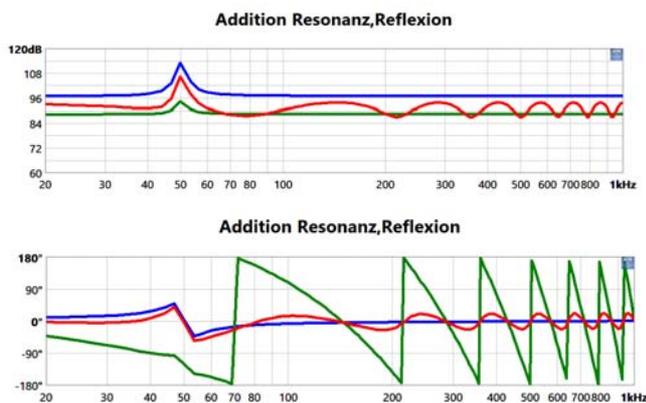
Wasserfall Resonanz, Reflexion



Das Bild zeigt den direkten Schall mit der Resonanz bei 50Hz. Der 2. Der gebogene Gebirgszug zeigt die Reflexion.

Messaufbau

Zur eindeutigen Darstellung von Resonanzen, Modem und Reflexionen wurde mit dem DSP und einer analogen Addierschaltung die Wasserfallmessung durchgeführt. Bei der Simulation wird der direkte Schall im 1. Kanal des DSP ein Parametrischen Equalizer eingestellt. Im 2. Kanal des DSPs für die Reflexion wurde die Equalizer Einstellung übernommen. Die Amplitude, entsprechend einer Reflexion im Raum, um 6dB abgeschwächt und mit dem Delay um 7ms verzögert. Die Ausgänge der Kanäle wurden mit einer analogen addier Schaltung zusammengefügt.

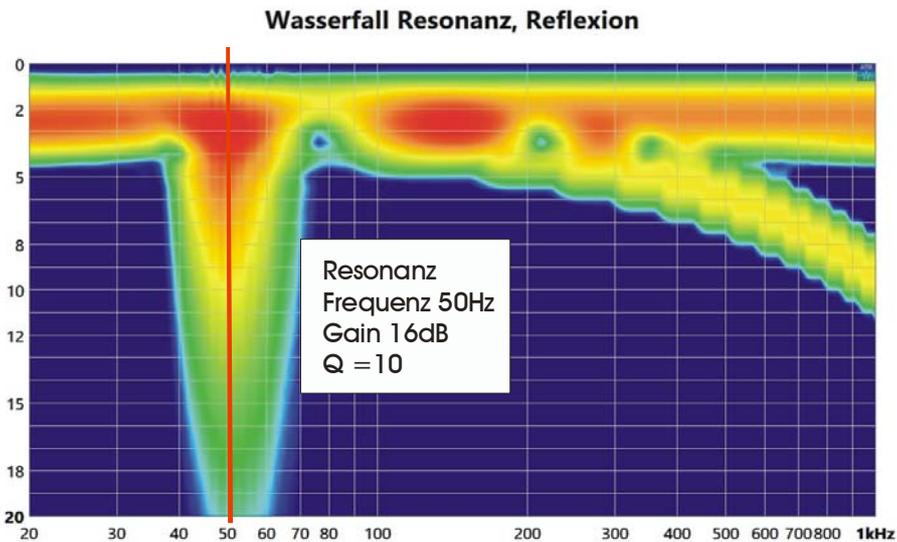


Mit dem ATB Audio Analyzer Programm wird die Messung auch ohne analoge Schaltung möglich. Für die erste Messung (blau) mit SPL wird im DSP der Parametrische Equalizer eingestellt und gemessen. Für die zweite Messung (grün) wird die Equalizer Einstellung übernommen, die Amplitude um 6dB verringert und ein Delay mit 7ms eingestellt. Dieses Wird mit der + Messung gemessen. Im Menü Datenlinien werden beide Kurven vektoriell addiert (rot). Diese Addition berücksichtigt auch die Phase der Messkurven. Das Ergebnis entspricht der Messung, bei der mit einem analoger Addierer die zwei Kanäle zusammengeführt werden.

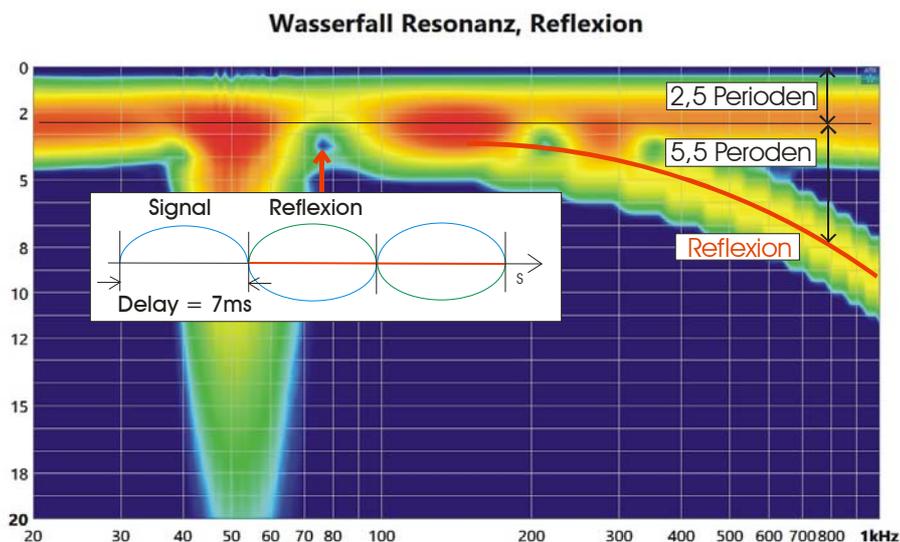
Diese Funktion ist auch besonders wichtig bei der Abstimmung eines Bass Reflex Systems. Hierbei werden im Nahfeld der Lautsprecher und die Bassreflexöffnung gemessen und beide Messungen mit der vektoriellen Addition zusammengefügt. So wird ein genauer und vom Raum unabhängiger Frequenzgang für den Tieftonbereich gemessen.

Die Messung lässt sich am besten in der “Drauf“ Ansicht erklären.

Resonanz



Reflexion



In der Darstellung “Drauf“, diese wird auch als Spektrogramm bezeichnet, des Wasserfall-Diagramms können die Frequenzen und Perioden ausgelesen werden. Die Amplituden werden durch die Farbskala bei der 3D Darstellung gezeigt. Die Verzögerung der Reflexion, Delay, wird aus den Perioden mit

$$\text{Delay} = \text{Anzahl der Perioden} \times 1 / \text{Frequenz}$$

berechnet. Die Anzahl der Perioden wird ab dem Maximum des Signals, 2,5 Perioden, berechnet. Bei dem Versuchsaufbau beträgt das Delay = 5,5 x 1,25ms = 7ms

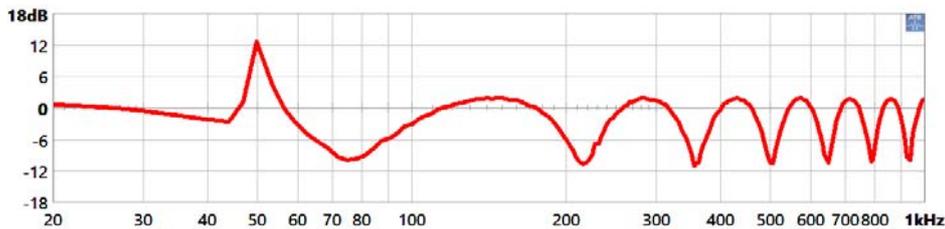
Die Wasserfall-Messung in der Raumakustik

Zur Optimierung der Raumakustik und Installation von Lautsprechern ist die Wasserfall Messung mit dem Cosinus-Burst unverzichtbar. Durch die eindeutige Darstellung von Reflexionen kann der Raum akustisch optimal bedämpft werden. Es kann zwischen sehr oder minder den Klang beeinflussenden Reflexionen unterschieden werden und entsprechend die Wände schallabsorbierend gestaltet werden. Durch die genaue Messung der Verzögerung der Reflexion wird der den Schall reflektierende Fläche bestimmt und bedämpft.

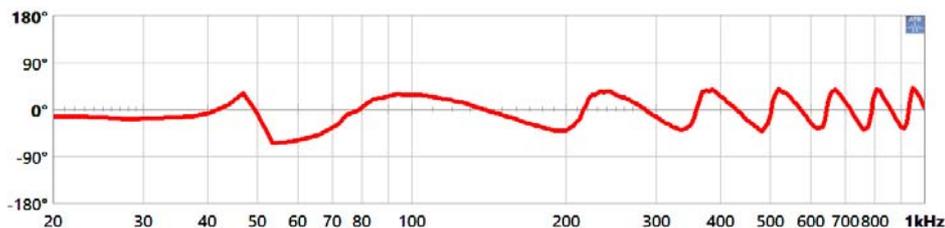
Der Frequenzgang der Raummessung

Von dem Versuchsaufbau zur Demonstration der Reflexion wird der Frequenzgang gemessen.

Frequenzgang Resonanz, Reflexion



Phasengang Resonanz, Reflexion



Der gemessene Frequenzgang hat keine Ähnlichkeit mit dem Wasserfalldiagramm.

Das Messsignal hat dabei nur einen geringen Einfluss. Das Rauschen oder der Sinus Sweep zeigen nur geringe Abweichungen.

Bei der Frequenzgang Messung werden Reflexionen und Hauptsignal addiert. Es kann nur eine Kurve für Amplitude und Phase gezeigt werden. Diese Überlagerung von direkten und reflektierten Schall lässt bei der Frequenzgangmessung keinen Rückschluss auf die gehörte Wiedergabe zu. Der wellige Verlauf entsteht durch die Überlagerung. Die Maxima bestehen nicht aus Resonanzen.

Die Phasenmessung besteht nur aus Phasensprüngen, obwohl die Schaltung nur einen Phasensprung bei der Resonanz besitzt. Diese Daten für die Berechnung des Wasserfalldiagramms mit der FFT zeigen ein vollkommen falsches Ergebnis. Die Überlagerung von Hauptsignal und Reflexion werden als Resonanzen dargestellt. Da aber keine Resonanzen vorliegen, können die angeblichen Resonanzen nicht mit dem Parametrischen Equalizer ausgeglichen werden.

Dies ist ein großes Problem für die Einmesscomputer, die meistens nur den Frequenzgang zur Linie berechnen.