

Akustische Betrachtung des
Stereohörraums von:



M. H.
High-End-Weg 7a
3097 Liebefeld

Analyse durch:
Vono Labs GmbH
Rigistrasse 26
8006 Zürich
Tel.: 044 361 55 55
Mail: biz@vono.ch

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1. Zusammenfassung..... | 1 |
| 2. Ausgangslage..... | 1 |
| Empfehlung..... | 1 |
| 3. Theoretische Betrachtung des Raums..... | 2 |
| 3.1. Grunddaten..... | 2 |
| 3.2. Bolt-Fläche..... | 3 |
| 3.3. Frequenzbereiche..... | 3 |
| 3.4. Raummoden..... | 5 |
| 3.4.1. Axiale Raummoden..... | 5 |
| 3.4.2. Tangentiale und diagonale Raummoden..... | 6 |
| 3.5. Bewertung..... | 6 |
| 4. Simulation und Optimierungsvorschlag..... | 7 |
| 4.1. Berechnung und Simulation der Ausgangslage..... | 7 |
| Begriff..... | 7 |
| 4.1.1. Akustisches Raumklima..... | 7 |
| 4.1.2. Schalldruckpegel und Ortung..... | 8 |
| Begriffe..... | 8 |
| Ergebnisse der Ausgangslage..... | 8 |
| 4.1.3. Kennzahlen der Ausgangslage..... | 9 |
| Begriffe..... | 9 |
| Qualitätskennzahlen..... | 10 |
| 4.1.4. Bewertung der Ausgangslage..... | 10 |
| 4.2. Berechnung und Simulation einer optimierten Aufstellung..... | 11 |
| 4.2.1. Empfohlene Aufstellung..... | 11 |
| 4.2.2. Akustisches Raumklima..... | 11 |
| 4.2.3. Schalldruckpegel und Ortung der Optimierung..... | 11 |
| Begriff..... | 11 |
| Ergebnisse der optimierten Aufstellung..... | 11 |
| 4.2.4. Kennzahlen der Optimierung..... | 12 |
| Qualitätskennzahlen..... | 13 |
| 4.2.5. Bewertung der Optimierung..... | 13 |
| 4.2.6. Verteilung im Raum..... | 14 |
| 5. Messungen..... | 15 |
| 5.1. Einleitung..... | 15 |
| 5.2. Impulsantwort..... | 15 |
| 5.3. Frequenzlinearität [Linear Frequency Response]..... | 15 |
| 5.4. Frequenzgang 20 Hz - 200 Hz..... | 16 |
| 5.5. Frequenzgang 200 Hz – 20 kHz..... | 18 |
| 5.6. Psychoakustischer Frequenzgang..... | 19 |
| 5.7. Energieverteilung..... | 19 |
| 5.8. Nachhallzeiten..... | 20 |
| 5.9. Bewertung der Ergebnisse und Empfehlungen..... | 21 |
| 5.9.1. Zusammenfassung..... | 21 |
| Anhang A: Aufstellungsergebnis der Simulation..... | 22 |
| Anhang B: weitere Messungen..... | 23 |
| Impulsantwort..... | 23 |
| Frequenzlinearität..... | 24 |
| Frequenzgang 20 Hz – 200 Hz..... | 25 |
| Frequenzgang 200 Hz - 20 kHz..... | 26 |
| | 26 |

| | |
|---|----|
| Energieverteilung..... | 27 |
| Nachhallzeiten..... | 28 |
| Anhang C: weiterführende Literatur..... | 29 |

Stichwortverzeichnis

| | |
|--------------------------------|----|
| Axiale Raummoden..... | 5 |
| Bolt-Fläche..... | 3 |
| Comb-Filter..... | 15 |
| diagonale Raummoden..... | 6 |
| Diffusschallanteil..... | 5 |
| Direktschall..... | 8 |
| Erste Wellenfront..... | 8 |
| Frequenzlinearität..... | 15 |
| Frühe Nachhallzeit: | 7 |
| Gesamtschall..... | 8 |
| Kammfilter..... | 15 |
| Linear Frequency Response..... | 15 |
| Lokalisation..... | 8 |
| Nachhallzeit..... | 7 |
| Ortung..... | 8 |
| Raumeindruck..... | 9 |
| Raummoden..... | 5 |
| Seitenschallpegel..... | 9 |
| Signal-to-Noise Ratio..... | 9 |
| SNR..... | 9 |
| Sound Pressure Level..... | 11 |
| SPL..... | 11 |
| SPL-Zielfunktion..... | 11 |
| Störabstand..... | 9 |
| tangentiale Raummoden..... | 6 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Lebensraum..... | 1 |
| Abbildung 2: Bolt-Fläche..... | 3 |
| Abbildung 3: Frequenzbereiche des Lebensbereichs..... | 4 |
| Abbildung 4: Kritischer Bereich, Quelle Hintergrund: [FAE00]..... | 4 |
| Abbildung 5: Axiale Raummoden..... | 5 |
| Abbildung 6: axiale, tangentiale und diagonale Raummoden..... | 6 |
| Abbildung 7: Simulierte Nachhallzeiten abhängig von der Frequenz, [CARA02]..... | 7 |
| Abbildung 8: Schalldruckpegel (Frequenzgang am Hörplatz) [CARA02]..... | 9 |
| Abbildung 9: Ortungsdiagramm [CARA02]..... | 9 |
| Abbildung 10: Optimierungsvorschlag..... | 11 |
| Abbildung 11: Schalldruckpegel der optimierten Aufstellung, [CARA02]..... | 12 |
| Abbildung 12: Ortungsdiagramm, der optimierten Aufstellung, [CARA02]..... | 12 |
| Abbildung 13: Verteilung des gewichteten Mittelwerts..... | 14 |
| Abbildung 14: Impulsantwort Raum & linker Lautsprecher..... | 15 |
| Abbildung 15: Impulsantwort Raum & rechter Lautsprecher..... | 15 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 16: Linker Lautsprecher, Zeitfenster 2 ms..... | 16 |
| Abbildung 17: Rechter Lautsprecher, Zeitfenster: 2 ms..... | 16 |
| Abbildung 18: Unterer Frequenzgang linker Lautsprecher..... | 17 |
| Abbildung 19: Unterer Frequenzgang rechter Lautsprecher..... | 17 |
| Abbildung 20: Unterer Frequenzbereich linker Lautsprecher..... | 17 |
| Abbildung 21: Unterer Frequenzbereich rechter Lautsprecher..... | 17 |
| Abbildung 22: Unterer Frequenzbereich linker Lautsprecher..... | 18 |
| Abbildung 23: Unterer Frequenzbereich rechter Lautsprecher..... | 18 |
| Abbildung 24: Frequenzgang 20 Hz - 20 kHz linker Lautsprecher..... | 18 |
| Abbildung 25: Frequenzgang 20 Hz - 20 kHz rechter Lautsprecher..... | 18 |
| Abbildung 26: Psychoakustischer Frequenzgang linker Lautsprecher..... | 19 |
| Abbildung 27: Psychoakustischer Frequenzgang rechter Lautsprecher..... | 19 |
| Abbildung 28: Energieverteilung linker Lautsprecher..... | 20 |
| Abbildung 29: Energieverteilung rechter Lautsprecher..... | 20 |
| Abbildung 30: gemessene Nachhallzeiten RT60..... | 20 |

Literatur- und Software-Verzeichnis

- FAE00: «**Master Handbook of Acoustics [Fourth Edition]**»; F. Alton Everest; 2000; McGraw-Hill
- CARA02: «**Computer Aided Room Acoustics, CARA 2.2**»; 2002; ETS ELAC Technische Software GmbH; www.cara.de
- ETF: «**ETF 5.0**»; 2005; AcoustiSoft; www.acoustisoft.com
- AC107: «**Small Room Acoustics De-Mythologized**»; Glenn D. White; 1991; AudioControl; <http://whitepapers.silicon.com/0,39024759,60031628>
- KREA01: «**Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer**»; Rudol Schrickler; 2001; Deutsche Verlags-Anstalt
- RIP04: «**Raumakustik in der Praxis**»; Thomas Imhof; 2004; Imhof Akustik; www.tec21.ch/pdf/tec21_3620041319.pdf
- DRZ: «**Der Raum ist das Ziel**»; Dr. Roland Gauder; ; Hifi & Records
- IRM: «**Im Rahmen des Möglichen**»; Hifi & Records; ; Hifi & Records
- ERS: «**Über den Einfluß der Richtcharakteristik tieffrequenter Schallquellen ...**»; Uwe Kempe, Charalampos Ferekidis; ; W Vier; www.wvier.de/texte/Dipole-Monopole-CD.pdf

1. Zusammenfassung

Obwohl der hier besprochene Raum sehr «unförmig» und extreme Längen aufweist, erzeugt er im Grossen und Ganzen ein akustisch angenehmes Raumklima. Dies zeigen die theoretischen Betrachtungen, wie auch die Simulation, welche die Kennzahlen problemlos unter die geforderten Zielwerte bringt. Auch der persönliche Höreindruck bestätigt dies.

Bedingt durch die Grösse treten allerdings Probleme bei den Nachhallzeiten und der zeitliche akustische Energieverteilung am Hörplatz auf. Diese verschlechtern den Störabstand. Auch hat der Raum im Tiefstbass eine sehr lange Nachhallzeit.

Die Ortung könnte durch eine noch bessere Wahl des Hörplatzes wesentlich verbessert werden. Dies zeigt sowohl die Simulation wie auch die Messungen. Da es nicht gerade schön wohnlich aussieht, wenn mitten im Raum ein Stuhl steht, sollte man also zumindest beim «aktiven» Musikhören den Hörplatz in die Nähe der durch die Simulation bestimmten Platzierung bringen.

2. Ausgangslage

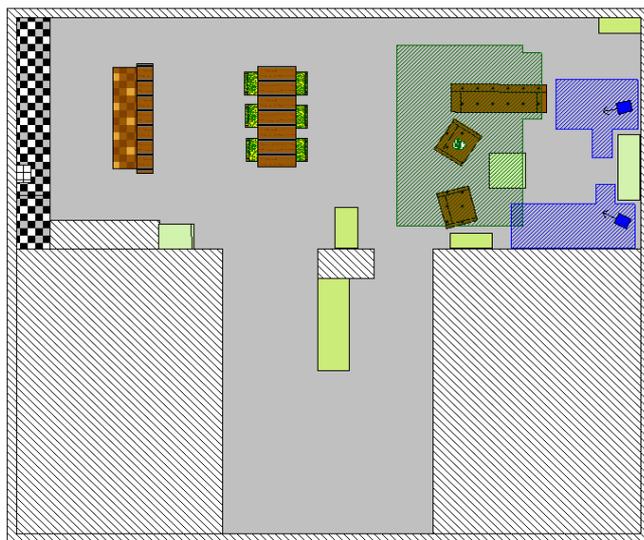


Abbildung 1: Lebensraum

Der «T»-förmige Grundriss des Raumes kombiniert mit der Grösse, verkomplizieren die Aufstellung der Lautsprecher erheblich. Der Raum beinhaltet Küche, «Esszimmer» und «Wohnzimmer».

Man kann zwar problemlos die Aufstellung für den augenblicklichen Hörplatz optimieren, aber mit der derzeitigen Aufstellung kann man davon ausgehen, dass in der Küche und am Esstisch durch die direkte Beschallung des linken Lautsprechers und die ersten Reflexionen an der Front durch den rechten Lautsprecher ein nicht optimales akustisches Raumklima entsteht.

Empfehlung

Es empfiehlt sich daher die Aufstellung so zu ändern, dass die Lautsprecher nicht frei in den Raum strahlen, sondern gegen die Möblierung, z. B. ein Büchergestell, welche dann als Diffusor wirken kann. Dies wird das akustische Raumklima ausserhalb des «Wohnzimmers» wesentlich beruhigen.

3. Theoretische Betrachtung des Raums

Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur die Küche, Essbereich und Wohnbereich betrachtet. Diese drei Bereiche werden in diesem Text *Lebensbereich* genannt. Der Einfluss des grossen Eingangsbereichs wird bei Bedarf mit einbezogen.

Ausserdem werden die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. die Beschichtung der Wände, in diesem Kapitel nicht explizit berücksichtigt, sondern es wird von einem durchschnittlich normalen Raum ausgegangen.

3.1. Grunddaten

Länge: 13.12 m

Breite: 5.0 m

Höhe: 2.37 m

Lautsprecher: Triangle Zays

Der Raum zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass die Front aus relativ harten, d. h. reflexionsintensive, Materialien [Fenster & Wände] besteht und sich gegenüber dem Eingangsbereich liegt, welche im ersten Moment als Absorber wirkt, da der hineingehende Schall erst mit Verspätung wieder herauskommt. Durch die Grösse des Eingangsbereichs braucht der hineingehende Schall mindestens 35 Millisekunden, bis er wieder hinauskommt. Da unser Ohr maximal die ersten beiden Millisekunden braucht, um eine Schallquelle zu orten, hat der Eingangsbereich keinen Einfluss auf die Ortbarkeit bei fast jeder Boxenaufstellung im Lebensbereich.

3.2. Bolt-Fläche

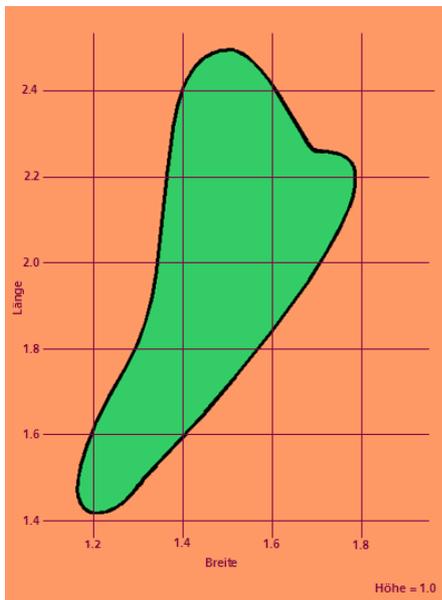


Abbildung 2: Bolt-Fläche

R.H. Bolt hat schon 1946 Menschen in verschiedene Räume gesetzt und sie nach ihrem Empfinden befragt. Dabei stellte sich heraus, dass das Verhältnis von Länge, Breite und Höhe ein wichtiger Faktor ist. Er konnte sogar bestimmen, welches die angenehmen Räume sind. Normiert man die Raumhöhe auf 1.0, ergibt sich die grüne Fläche in Abbildung 2.

Man beachte aber, dass es auch gut klingende Räume gibt, die ausserhalb des grünen Bereiches liegen und umgekehrt schlecht klingende Räume, die innerhalb liegen. Letzteres kommt allerdings sehr selten vor und die Bolt Fläche ist deshalb ein sehr guter Indikator, um zu starten. Man sollte daher immer zusätzlich den Raum noch genauer analysieren.

Der hier besprochene Raum liegt natürlich weit ausserhalb des grünen Bereichs, da seine Länge im Verhältnis zur Breite und Höhe aussergewöhnlich lang ist. Deshalb werden die nachfolgenden Aspekte umso interessanter.

Unter <http://www.vono.ch/ersthilfe> [→ Raumanalyse] kann man selber bestimmen, ob ein Raum in der Bolt-Fläche liegt oder nicht.

3.3. Frequenzbereiche

Durch die Ausmasse eines Raumes und die Nachhallzeit wird der hörbare Frequenzbereich physikalisch in vier Bereiche eingeteilt, vgl. Abbildung 3:

- Der grüne Bereich «A» wird vom Raum nicht beeinflusst.
- Im gelben Bereich «B» verhält sich der Schall wellenförmig. Probleme in diesem Bereich sind verhältnismässig einfach zu lösen, z. B. eine bessere Aufstellung der Lautsprecher.
- Im gelben Bereich «D» erhält sich der Schall wie Lichtstrahlen. Deshalb können Probleme in diesem Frequenzbereich auch relativ einfach gelöst werden, z. B. durch eine andere Anordnung der Möblierung.
- Der Bereich «C» ist der kritischste Bereich eines Raumes. Hier verhält sich der Schall sowohl als Welle wie auch als Strahl und es finden Beugungen und Brechungen statt. Um Probleme in diesem Bereich zu beheben, braucht es eine sehr sorgfältige Planung, Simulationen und Erfahrung.

Hier findet man die spezielle Situation vor (Abbildung 3), dass sich der Bereich «A» unter 13Hz befindet. Dies wird durch die Länge des Raums verursacht. In der Praxis heisst dies, dass der gesamte

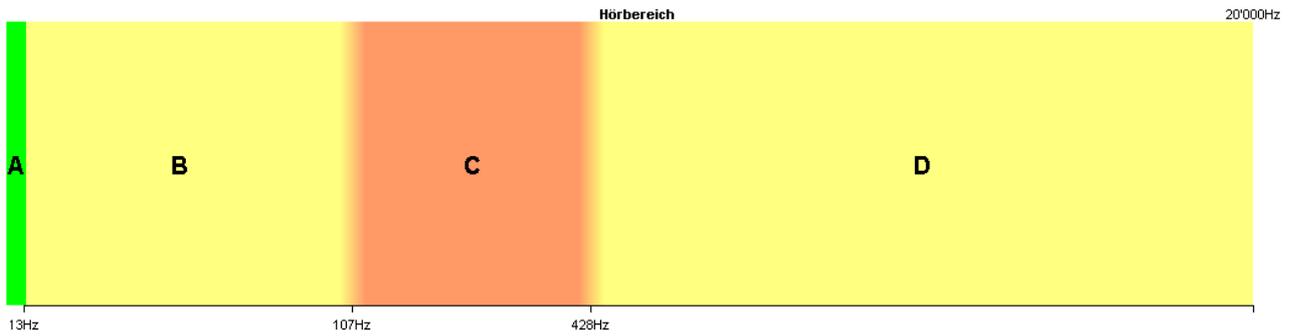
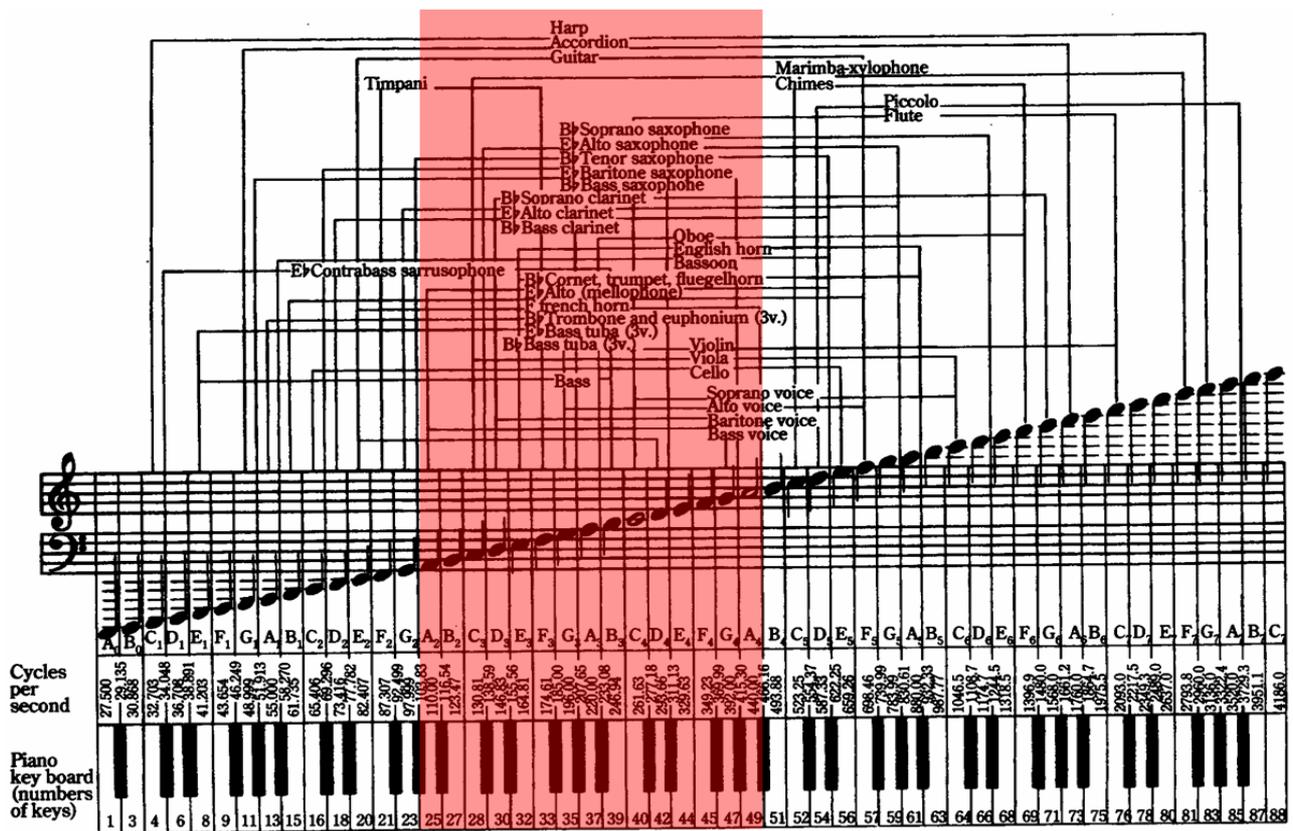


Abbildung 3: Frequenzbereiche des Lebensbereichs

Hörbereich durch den Raum beeinflusst wird. Bis 107 Hz entspricht das Verhalten des Schalls einer Welle und oberhalb von 428 Hz verhält er sich wie Lichtstrahlen.

Im kritischen Bereich von 107 Hz bis 428 Hz finden also Beugungen und Brechungen des Schalls verursacht durch den Raum statt.

In der nachfolgenden Abbildung 4 findet man den kritischen Bereich auf einer Klaviertastatur dargestellt.



eine radikale Umstellung ein besseres Klangerlebnis zu bekommen.

Im Normalfall empfindet man dies nicht als aussergewöhnlich unnatürlich, da auch die Stimmen von im Raum anwesenden Personen auf die gleiche Weise beeinflusst werden, passt es zu akustischem Raumklima. Allerdings kann es durch den Bereich «C» zu Ortungsproblemen kommen, da ein Instrument, welches durch die Lautsprecher wiedergegeben wird, je nach Tonhöhe an verschiedenen Positionen geortet werden kann.

3.4. Raummoden

Wie jedes physikalische Objekt hat auch ein Raum seine Resonanzfrequenzen. Dabei sind nicht die Eigenschwingungen der Wände oder z. B. der Decke gemeint, sondern die Resonanzfrequenzen des durch den Raum eingeschlossenen Volumens, sogenannte *Raummoden*. Diese Raummoden verursachen eine ungleichmässige Energieverteilung über den Frequenzbereich und können zu einem unausgewogenen Klangbild führen. Im Allgemeinen spielen Raummoden ab etwa 300 Hz eine untergeordnete Rolle, da ab dieser Frequenz die Raummoden einen geschlossenen «Klangteppich» bilden.

3.4.1. Axiale Raummoden

Unter axialen Raummoden versteht man die eindimensionalen Resonanzfrequenzen eines Raumes. Diese werden durch 2 parallele Flächen erzeugt, also. z. B. durch zwei gegenüberliegende Wände. In den Abbildungen 5 findet man die Frequenzen der axialen Moden des Lebensbereichs.

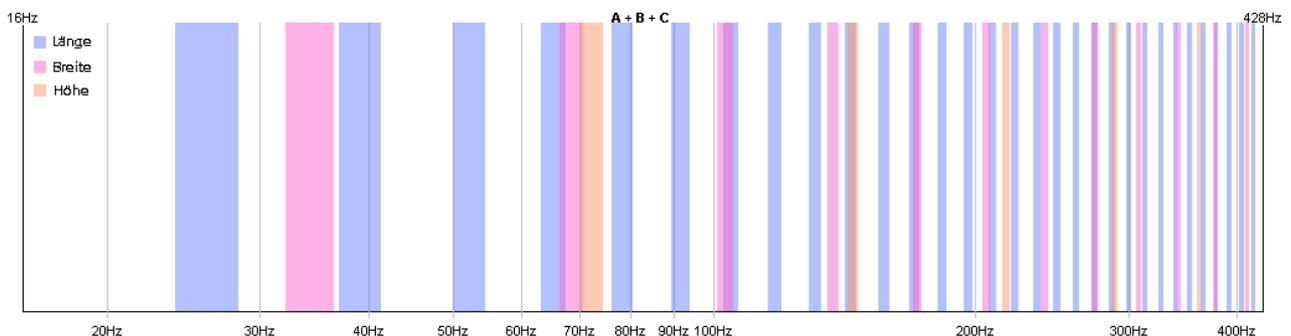


Abbildung 5: Axiale Raummoden

Da Raummoden etwas Normales sind, reagiert unser Ohr nicht besonders darauf, solange sich die Raummoden nicht überschneiden (psychoakustischer Effekt). Tritt dieser Fall jedoch ein reagiert das Ohr umso heftiger.

Zwei Überschneidungen findet man in diesem Fall zwischen 65 Hz und 75 Hz. Da sie wirklich sehr knapp sind, können sie in der Praxis je nach Beschaffenheit des Raumes gar nicht oder stärker auftreten. Bei den Messungen werden wir sehen, ob diese wieder zu finden sind. Normalerweise spielen die Raummoden ab etwa 300 Hz keine spezielle Rolle, da der Diffusschallanteil überwiegt. Im hier besprochenen Fall spielen die Raummoden ab 100 Hz keine grosse Rolle mehr, da der Diffusschall bereits ab dieser Grenze zu wirken beginnt (siehe nächstes Kapitel).

3.4.2. Tangentiale und diagonale Raummoden

Unter tangentialen Raummoden versteht man die zweidimensionalen Eigenresonanzen, welche durch 4 Begrenzungsflächen, z. B. die vier Wände, entstehen. Am besten stellt man sich diese als Schwingungen in einer Ebene senkrecht zu den vier Flächen vor. Tangentiale Raummoden haben zwar ungefähr nur die Hälfte der Energie der axialen, können jedoch einen entscheidenden Einfluss auf das Raumklima haben.

Und unter diagonalen Raummoden versteht man die dreidimensionalen Eigenresonanzen eines Raumes. Man kann sich diese als die Schwingungen von einer Ecke zur diagonal entgegengesetzten Ecke vorstellen. Diese Moden besitzen nur etwa ein Viertel der Energie der axialen Raummoden und beeinflussen das Raumklima deshalb nur untergeordnet.

In der Abbildung 6 sieht man die theoretischen Raummoden des Lebensbereichs mit der dazugehörigen Bandbreite¹:

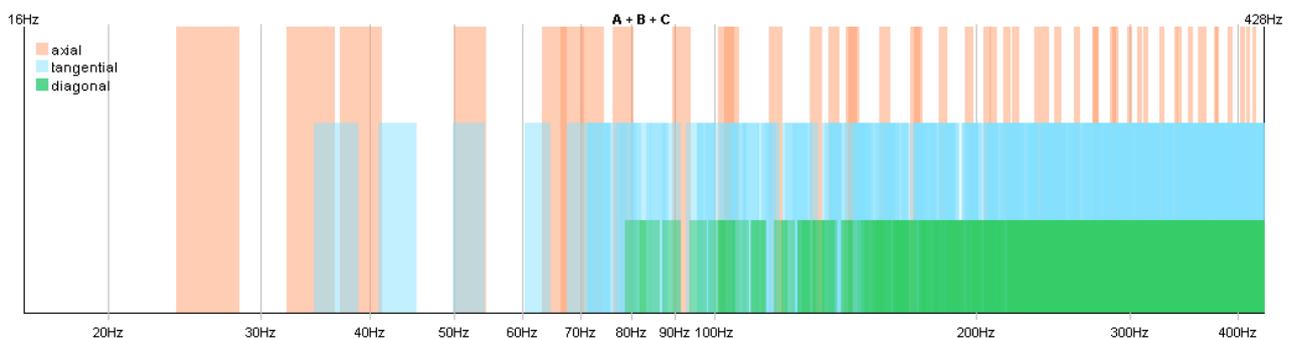


Abbildung 6: axiale, tangentiale und diagonale Raummoden

Die grosse Länge des Raumes verschiebt oben beschriebene Grenze von 300 Hz auf etwa 100 Hz herunter. Aus der Abbildung 6 erkennt man auch, dass die tangentialen Raummoden schon ab 35 Hz zu wirken beginnen und die diagonalen schon ab 80 Hz. Ab dieser Frequenz sieht man auch schon keine weissen Spalten mehr (die Einzige, die da wäre, wird durch eine axiale Raummode oberhalb 90 Hz geschlossen). Der Diffusschallanteil ist also schon ab 60 Hz geschlossen und unser Ohr kann die einzelnen Moden nicht mehr wahrnehmen, da ein geschlossener «Klangteppich» erzeugt wird. Das Ohr könnte aber auf die sich überschneidenden Raummoden um 100 Hz empfindlich reagieren, wenn diese stark angeregt werden.

3.5. Bewertung

Aus Sicht der Raummoden ist der Lebensbereich akustisch ein sehr guter Raum, denn sie verteilen sich regelmässig über den gesamten Frequenzgang und die tangentialen und diagonalen Raummoden setzen schon früh ein, sodass ab etwa 60 Hz ein geschlossener «Klangteppich» entsteht, der es verunmöglicht die einzelnen Raummoden zu hören.

Allerdings findet man um 100 Hz zwei fast deckungsgleiche axiale Raummoden, welche theoretisch

¹ Für die Abschätzung der Bandbreite wird eine Nachhallzeit von 0.4 Sekunden für alle Frequenzen angenommen.

hörbar sind. Die Messung zeigt (siehe Kapitel 5.4), dass diese aber zu wenig stark sind, um hörbar zu sein, obwohl sie von beiden Lautsprechern angeregt werden.

Der Raum stellt somit aus Sicht der Raummoden keine besondere Problematik für den Musikgenuss dar und durch eine geschickte Aufstellung der Lautsprecher und Möblierung wird man eine akustisch sehr befriedigende Lösung finden.

Da der kritische Bereich «C» ebenfalls vollumfänglich innerhalb des beschriebenen «Klangteppichs» liegt, dürfte sein Einfluss eher gering bleiben.

4. Simulation und Optimierungsvorschlag

Die nachfolgenden Simulationen wurden mit Cara 2.2 vorgenommen [CARA02].

4.1. Berechnung und Simulation der Ausgangslage

Begriff

Frühe Nachhallzeit: Unter der frühen Nachhallzeit oder einfach nur Nachhallzeit versteht man das Zeitintervall, innerhalb dessen der Schalldruck auf den tausendsten Teil seines Anfangswerts abgefallen ist. Die physikalische Bezeichnung lautet RT_{60} (RT: Reverberation Time; 60 dB). Abhängig von der Frequenz eines Tones nimmt RT_{60} innerhalb eines Raumes verschiedene Werte an.

4.1.1. Akustisches Raumklima

Die Nachhallzeiten in verschiedenen Frequenzintervallen (Tief-, Mittel- und Hochtonbereich) werden bezüglich eines international vereinbarten Toleranzbereichs überprüft. Dieser Bereich ist von der Raumgröße und vom Verwendungszweck abhängig. Für einen Wohnbereich liegt dieser in der Abbildung 7 zwischen den beiden grünen Linien. Die Nachhallzeiten können zu gross (hallig), «ideal» oder zu klein (trocken) sein.

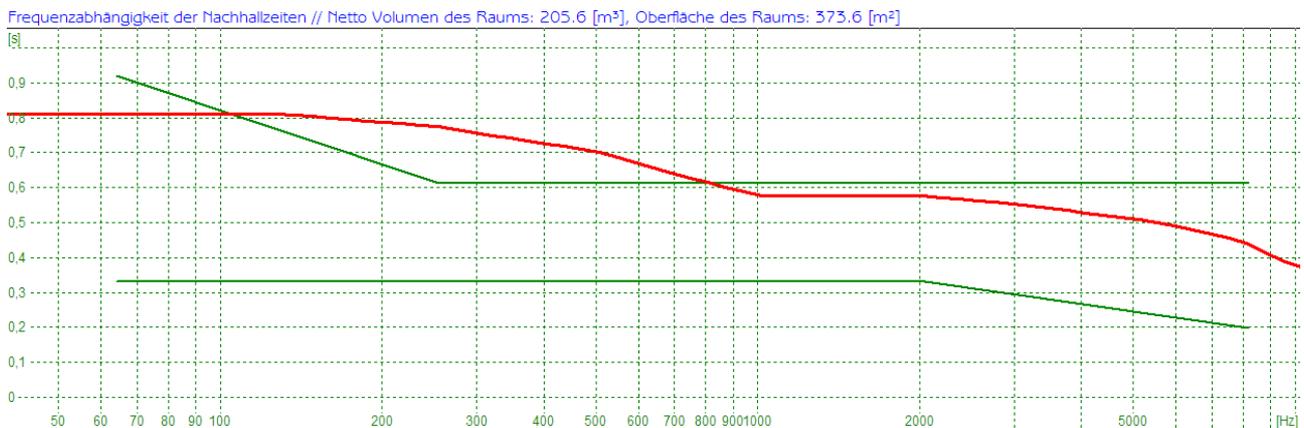


Abbildung 7: Simulierte Nachhallzeiten abhängig von der Frequenz, [CARA02]

Ideal wäre es, wenn die Nachhallzeiten (rote Linie, Abbildung 7) innerhalb der grünen Begrenzungen zu liegen kommt. Im hier besprochenen Fall sind diese grundsätzlich zwischen 100 Hz und 800 Hz zu

gross. Man vergleiche dies mit dem kritischen Frequenzbereich in Abbildung 3, welche genau innerhalb dieses Bereiches liegt.

Der Raum könnte somit in der Praxis die mittleren Tonhöhen (Grundtöne der menschlichen Stimme und der meisten Musikinstrumente) störend beeinflussen.

Allerdings wurde in der Wohnung eine «akustische Decke» zur Isolation zu den Nachbarn eingebaut. Leider sind die Absorptionswerte dieser Decke nicht bekannt, sodass sie nicht genau simuliert werden kann. Ein kurzer Test mit einer stark absorbierenden Decke hat gezeigt, dass ohne weiteres auch der mittlere Bereich innerhalb der grünen Begrenzung liegen könnte. Da nur die Decke davon in der Simulation betroffen ist, spielt dies für die Lautsprecheraufstellungsoptimierung nur eine untergeordnete Rolle. Die Messungen werden darüber Klarheit verschaffen.

4.1.2. Schalldruckpegel und Ortung

Begriffe

Gesamtschall: der gesamte Schall, der am Hörplatz eintrifft, darin enthalten sind sämtliche Reflexionen durch die Wände und Möblierung. Betrachtet man im Allgemeinen eine Gesamtschallkrurve, so sollte man sich über die vielen Spitzen und Einbrüche nicht wundern. Da sie normal sind, hat unser Ohr / Gehirn gelernt, diese zu glätten und nur die ersten Millisekunden für die Ortung und Beurteilung der Qualität zu benutzen.

Direktschall: Frequenzgang ohne jeglichen Raumanteil. Die ist also der Schallanteil, welche von den Lautsprechern direkt beim Hörer ankommt. Einbrüche im Frequenzgang werden meist von Interferenzen der Lautsprecher untereinander verursacht. Auch hier gilt: schmalbändige Einbrüche kann unser Ohr problemlos korrigieren.

Erste Wellenfront: Dies entspricht dem Direktschall plus alle Schallwellen, welche innerhalb der ersten beiden Millisekunden im Gehör eintreffen. Diesen Schallanteil braucht der Mensch vor allem für die Ortung und Beurteilung der Klangqualität. In einem Kopfhörer entspricht sie dem Direktschall. Bei einer guten Lautsprecheraufstellung sollte sich die erste Wellenfront der Direktschallamplitude angleichen, ohne dass man direkt zwischen den Lautsprechern sitzt (Kopfhörerposition).

Lokalisation/Ortung: Diese Kennzahl beschreibt die Güte der Lokalisation. +1 ist der Wert für eine korrekte Lokalisation, bei -1 meint der Hörer der Ton kommt aus der entgegengesetzten Richtung.

Ergebnisse der Ausgangslage

Die Ergebnisse der Berechnung der Ausgangslage sind in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt.

Die obigen Begriffe werden in Abbildung 8 gebraucht, und man erkennt, dass die «erste Wellenfront» (grüne Linie) und der Direktschall (blaue Linie) starke Einbrüche über den gesamten Frequenzgang erleiden. Dies bewirkt eine Verschlechterung der Ortbarkeit, da nicht alle Frequenzen der ersten Wellenfront klar von vorne geortet werden können (vgl. Abbildung 9, grüne Linie). Hierunter leidet die räumliche Abbildung der Musik.

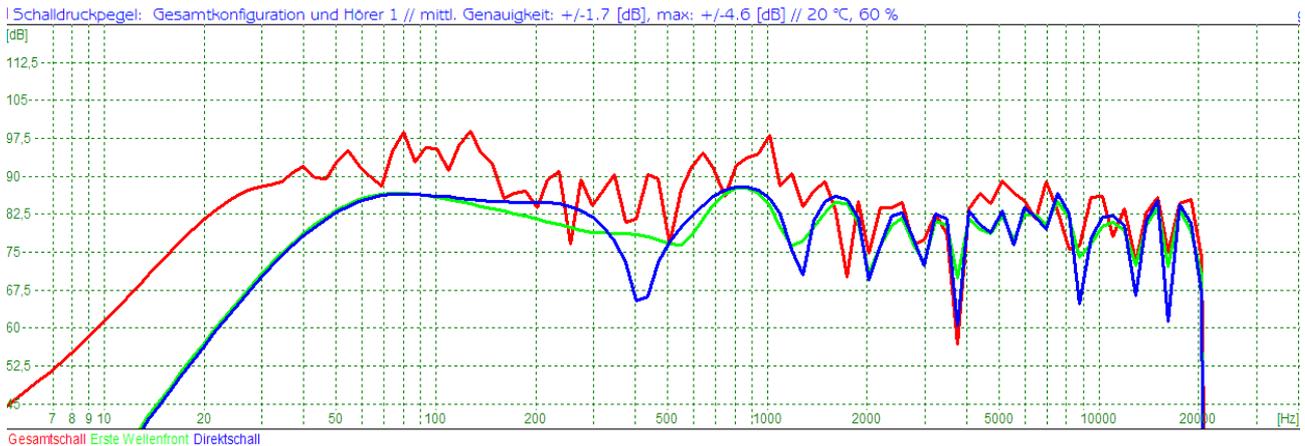


Abbildung 8: Schalldruckpegel (Frequenzgang am Hörplatz) [CARA02]

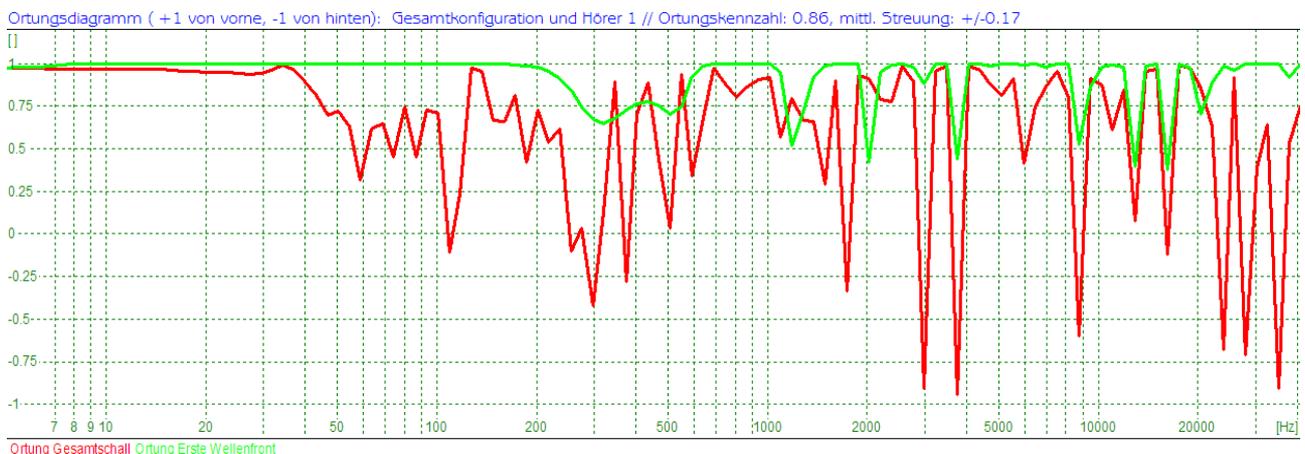


Abbildung 9: Ortungsdiagramm [CARA02]

4.1.3. Kennzahlen der Ausgangslage

Begriffe

Raumeindruck und Seitenschallpegel: Das Verhältnis (in dB) der Energiedichten der Schallwellen, welche beim Hörer seitlich (rechts oder links) eintreffen, zu den Schallwellen, welche beim Hörer (virtuell) von vorne¹ eintreffen, wird als Seitenschallpegel definiert.

Der Seitenschall lässt die Schallquelle vergrößert erscheinen. Der durch den Seitenschall entstehende Raumeindruck ist zu unterscheiden von dem Räumlichkeitseindruck, der sich alleine aus dem Nachhall ergibt, welcher ein Gefühl über die tatsächliche Größe des Raumes vermittelt. Seitenschallpegel von deutlich über 0 dB bewirken einen deutlich merkbaren Raumeindruck. In kleinen Räumen erreicht man dies aber sehr selten.

Störabstand [Signal-to-Noise Ratio, SNR]: Der Störabstand bezeichnet das Verhältnis zwischen dem nützlichen und dem störenden Schallanteil. Alle Anteile, welche das menschliche Ohr dem Direktschall und der ersten Wellenfront zu ordnen kann, werden als nützlicher Anteil definiert. Im Allgemeinen sind dies sämtliche Schallwellen, welche in den ersten 50 ms im Ohr eintreffen².

¹ Genauer: Aus der Meridianebene eintreffen.

² In der Simulation wird diese Grenze von 50 ms nicht fest angenommen, sondern zwischen 35 ms und 95 ms gesetzt dafür

Alle Schallanteile, die später eintreffen, werden als störend definiert.

Das Verhältnis dieser beiden Anteile ist ein Mass für die Klarheit bzw. Deutlichkeit von Musikproduktionen. Werte über 0 dB gelten bereits als sehr gut. Für kleine Räume ist dies leicht zu erreichen, da im Normalfall nur grosse Räume (z. B. Hallen, Kirchen) damit Probleme haben. Für eine sehr gute High-End-Anlage sollte man versuchen, diesen Wert auf über +20 dB zu bringen.

Für die Anfangsaufstellung betragen diese Kennzahlen:

| | |
|---|-----------------------------|
| Genauigkeit (mittlere / maximale Abweichung) [\pm dB]: | ± 1.7 dB / ± 4.6 dB |
| Frühe Nachhallzeit (RT_{60}): | 0.164 Sekunden |
| Raumeindruck, Seitenschallpegel: | -3.5 dB |
| Störabstand [Signal-to-Noise Ratio]: | +16.5 dB |
| Lokalisation/Ortung | +0.86 |

Qualitätskennzahlen

Sämtliche Qualitätskennzahlen sind in Prozent gehalten und sind ein Mass für die Abweichung. Also je grösser sie sind, desto schlechter ist die Anlage aufgestellt. Je kleiner desto besser. Werte über 100 % gelten als ungenügend. Für eine Hi-Fi Anlage sollte die «totale Optimierungskennzahl» unter 30 % fallen und für eine High-End-Anlage unter 25 %.

Für die Anfangsaufstellung betragen diese Werte:

| | |
|--|----------------|
| Frequenzspektrum: | 107.40 % |
| Lokalisation / Ortung | 82.86 % |
| Deutlichkeit / Klarheit (SNR) | 6.43 % |
| Gewichteter Mittelwert ¹ | 77.39 % |
| Totale Optimierungskennzahl² | 65.16 % |

4.1.4. Bewertung der Ausgangslage

Mit Ausnahme der Deutlichkeit, welche für kleine Räume sehr selten ein Problem ist, sind sämtliche Qualitätskennzahlen einer High-End-Anlage unwürdig. Insbesondere sollte der Störabstand mindestens 20 dB betragen.

Es wird ein grosses Potenzial der Anlage verschenkt!

Die Aufstellungsoptimierung wird diese Qualitätskennzahlen minimieren.

¹ (2 x Frequenzspektrum + 2 x Lokalisation + Deutlichkeit) / 5

² Dies ist der Mittelwert der Kennzahl *gewichteter Mittelwert* der einzelnen Lautsprecher. Bei Mehrkanalanlagen wird diese Kennzahl nach der Wichtigkeit der Lautsprecher zusätzlich gewichtet.

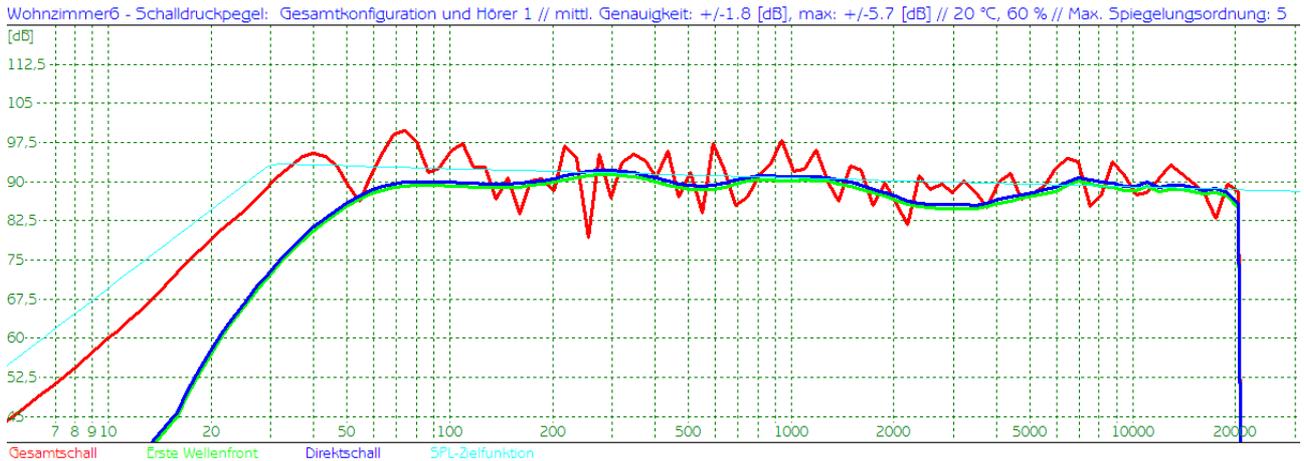


Abbildung 11: Schalldruckpegel der optimierten Aufstellung, [CARA02]

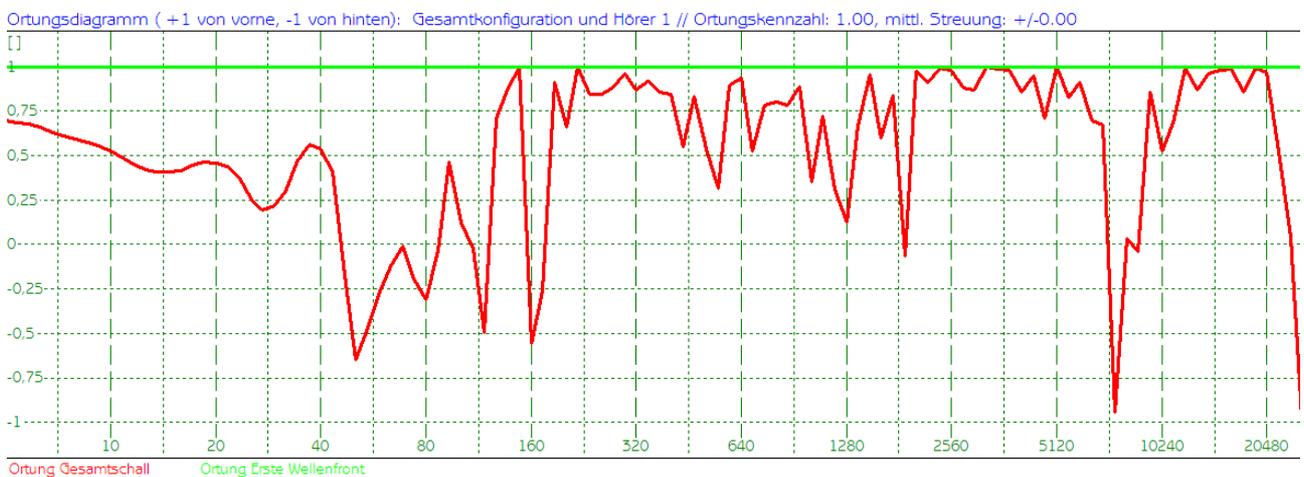


Abbildung 12: Ortungsdiagramm, der optimierten Aufstellung, [CARA02]

4.2.4. Kennzahlen der Optimierung

| | |
|---|-----------------------------|
| Genauigkeit (mittlere / maximale Abweichung) [\pm dB]: | ± 1.8 dB / ± 5.7 dB |
| Frühe Nachhallzeit (RT_{60}): | 0.193 Sekunden |
| Raumeindruck, Seitenschallpegel: | -2.6dB |
| Störabstand [Signal-to-Noise Ratio]: | +20.5dB |
| Lokalisation/Ortung | +1.00 |

Qualitätskennzahlen

| | |
|------------------------------------|----------------|
| Frequenzspektrum: | 55.70 % |
| Lokalisation / Ortung | 1.77 % |
| Deutlichkeit / Klarheit (SNR) | 4.81 % |
| Gewichteter Mittelwert | 23.95 % |
| Totale Optimierungskennzahl | 22.36 % |

4.2.5. Bewertung der Optimierung

Die «Totale Optimierungskennzahl» ist unter 25 % gekommen, was für eine High-End-Anlage anzustreben ist (für eine gute Hi-Fi-Anlage sollte diese Zahl unter 30 % liegen).

Der Störabstand ist wunschgemäß auf über 20 dB gestiegen und die Ortung beträgt nun +1.

Der Seitenschallpegel hat sich zwar verbessert, bleibt aber unter 0 dB.

Im nachfolgenden Kapitel findet man die Verteilung des gewichteten Mittelwerts als «Landkarte».

4.2.6. Verteilung im Raum

In Abbildung 13 findet man die Verteilung des gewichteten Mittelwerts im Lebensraum. Aus dieser «akustischen Landkarte» kann man die akustisch angenehmen Bereiche (Schwarz bis Dunkelblau) herauslesen. Man beachte, dass es im vorliegenden Fall auch solche Bereiche ausserhalb des Stereodreiecks gibt. Die Ortung ist natürlich in diesen Bereichen nicht gegeben.

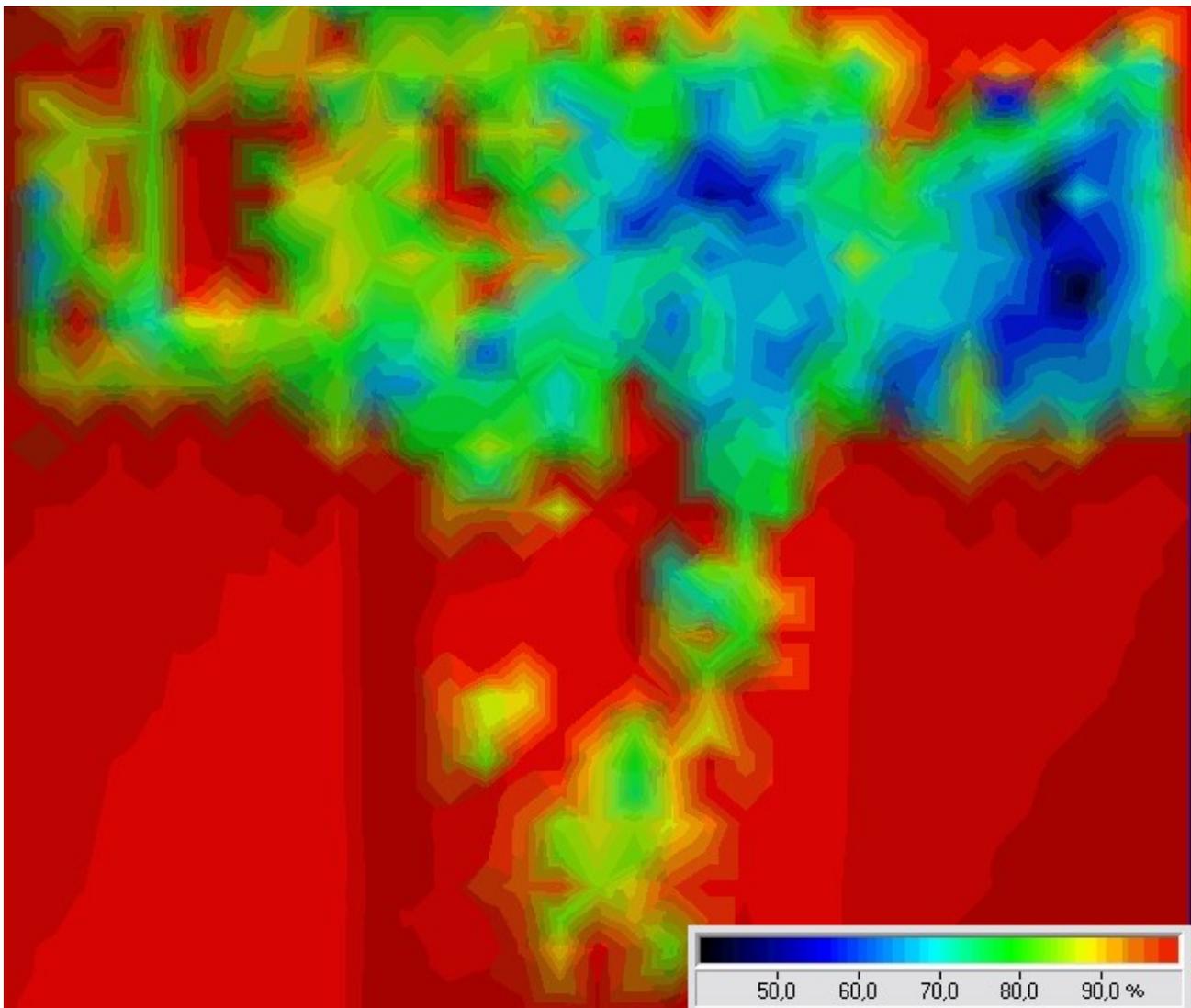
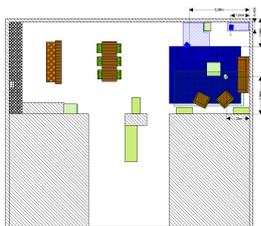


Abbildung 13: Verteilung des gewichteten Mittelwerts



Orientierung

5. Messungen

5.1. Einleitung

Sämtliche Messungen wurden mit dem Programm ETF5 [ETF] durchgeführt.

Die hier besprochenen Messungen beziehen sich auf die letzte Aufstellung der Lautsprecher und des Hörplatzes, wie sie heute stehen. Der Hörplatz befindet sich also ausserhalb durch die Simulation bestimmten Ortes. Die Grafiken der beiden anderen Messungen findet man im Anhang B.

5.2. Impulsantwort

Im theoretischen Idealfall oder im Freien findet man bei einer Impulsantwortmessung zum Zeitpunkt 0 einen Impuls bis 100 dB und anschliessend nur noch Rauschen. In kleinen Räumen kommt es aber zu Reflexionen durch die Wände. Diese erkennt man an weiteren Spitzen in den Abbildungen 14 und 15. Man sollte versuchen eine Aufstellung zu finden, welche die ersten Reflexionen möglichst spät erzeugt. Insbesondere gilt dies für die ersten beiden Millisekunden, da das Ohr in diesem Zeitintervall die Ortung vornimmt.

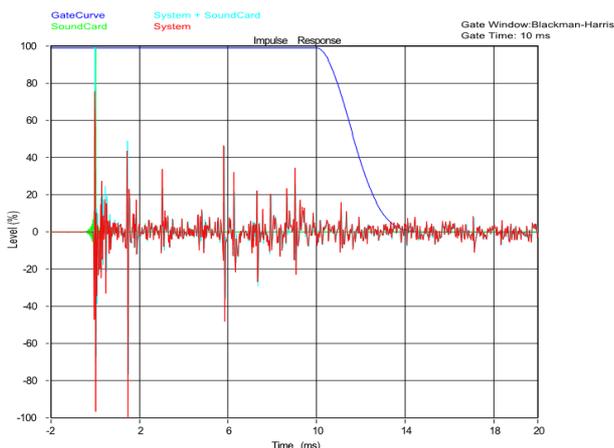


Abbildung 14: Impulsantwort Raum & linker Lautsprecher

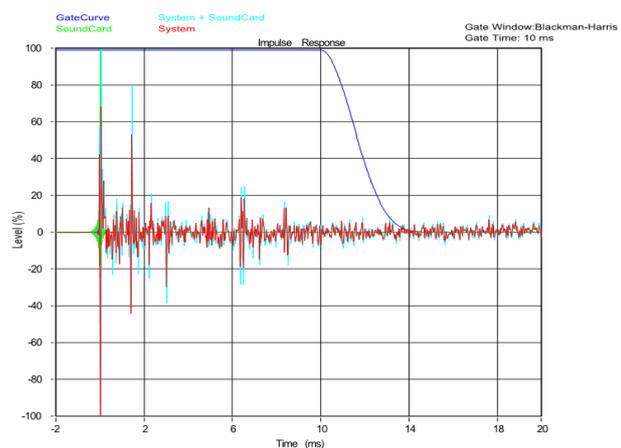


Abbildung 15: Impulsantwort Raum & rechter Lautsprecher

Durch die Grösse und T-Form des Raumes kommt es, wie erwartet, zu einer Vielzahl von Reflexionen. Da der linke Lautsprecher «zentraler» im Raum steht, erzeugt er bis etwa 11.2ms noch Reflexionen.

Auffallend sind die starken Reflexionen innerhalb der ersten beiden Millisekunden. Dies wird durch die wandnahe Platzierung des Hörplatzes verursacht.

5.3. Frequenzlinearität [Linear Frequency Response]

Die Wände eines kleinen Raumes wirken auf den Frequenzgang wie ein Kammfilter [**Comb-Filter**; Comb = Kamm; auf Schweizerdeutsch: Strähl (vgl. Abbildungen 16 und 17)]. Dies wird durch die Überlagerung des direkten Signals mit den Reflexionen der Wände verursacht und führt zu regelmässigen Frequenzgangeinbrüchen. Bezogen auf den Frequenzgang «überhört» unser Ohr zwar

diese Einbrüche, aber sie haben einen starken negativen Effekt auf die Abbildung bzw. Ortung. In kleinen Räumen kann man diese Filterung zwar nicht verhindern, aber man sollte versuchen, eine Aufstellung (Lautsprecher und Hörplatz) zu finden, sodass dieser Effekt möglichst spät auftritt, da unser Ohr die Ortung und Qualität in den ersten Millisekunden vornimmt.

Da unser Ohr diese Einbrüche psychoakustisch zu minimieren vermag, leidet der **gehörte Frequenzgang** im Normalfall nicht so stark, wie man dies anhand der Grafiken meinen könnte. D. h., schmalbändige Einbrüche sind normalerweise im Frequenzgang nicht zu hören, da sie vom Menschen herausgefiltert werden.

Wie in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt, haben wir hier im vorliegenden Fall eine starke Reflexion innerhalb des Ortungsintervalls (0-2ms). Dadurch entsteht viel zu früh eine Kammfilterung, wie man sie in Abbildungen 16 und 17 sieht (Gate-Time = Zeitfenster: 2ms). Die Ortung leidet sicher darunter.

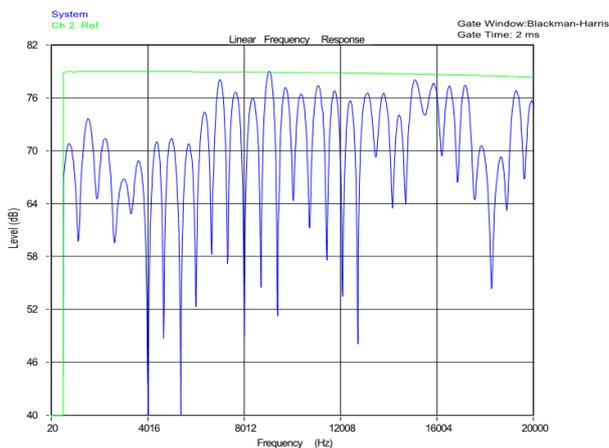


Abbildung 16: Linker Lautsprecher, Zeitfenster 2 ms

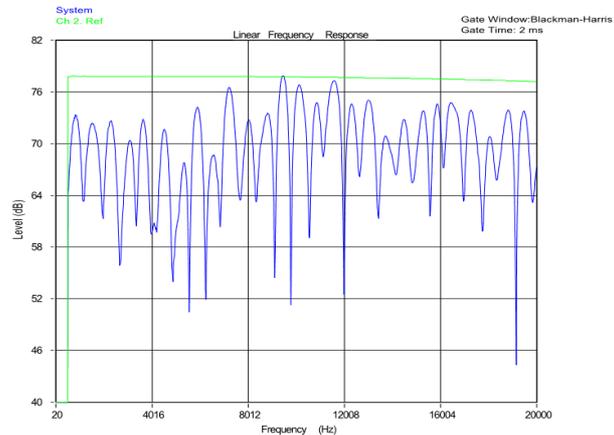


Abbildung 17: Rechter Lautsprecher, Zeitfenster: 2 ms

5.4. Frequenzgang 20 Hz - 200 Hz

In Abbildung 18 und 19 findet man den Frequenzgang zwischen 20 Hz und 200 Hz beider Lautsprecher. Für jeden Lautsprecher werden die Frequenzgänge zum Zeitpunkt 0 ms (blaue Kurve), dargestellt.

Auch hier gilt: Unser Ohr mag grösstenteils die Einbrüche zu eliminieren, d. h., der **gehörte** Frequenzgang ist subjektiv glatter als der Gemessene. Allerdings reagiert unser Ohr empfindlich auf Resonanzfrequenzen, da sie mehr Zeit brauchen, um sich abzubauen.

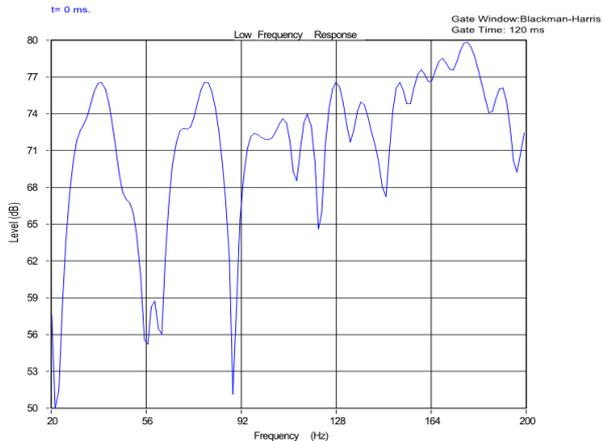


Abbildung 18: Unterer Frequenzgang linker Lautsprecher

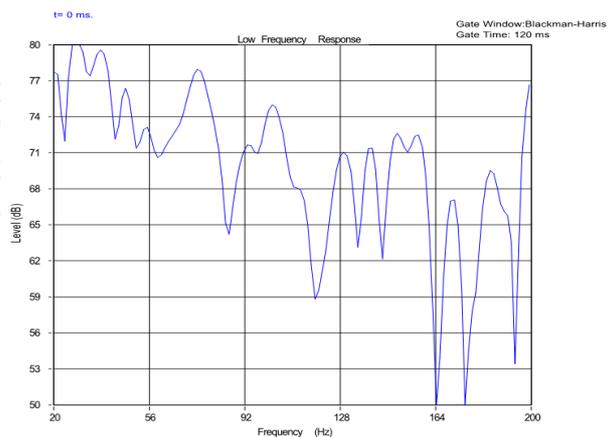


Abbildung 19: Unterer Frequenzgang rechter Lautsprecher

In Abbildung 18 sieht man, dass der linke Lautsprecher die Resonanzfrequenz um 40 Hz und die doppelte Frequenz von 80 Hz anzuregen vermag. Vergleicht man dies mit Abbildung 5, Seite 5, so sieht man, dass dies die entsprechenden Resonanzfrequenzen der Länge des Raums sind.

Der Frequenzgang des rechten Lautsprechers wirkt in der Grafik im Tiefstbass viel ausgeglichener. Wie aus dem Nachfolgenden hervor geht, sind dies aber die Raumresonanzen.

Betrachtet man diesen Frequenzbereich über die Zeit in der 3d-Ansicht, Abbildungen 20 und 21, so sieht man, dass beide Lautsprecher die Resonanzen um 30 Hz und um 100 Hz anregen. Durch die Eckposition des rechten Lautsprechers werden die beiden sich überschneidenden axialen Raummoden um 100 Hz der Länge und Breite in Abbildung 5 stärker angeregt als durch den linken. Und zusätzlich wird durch diese Eckposition der Tiefstbass stärker angeregt. Durch T-Form des Raums haben wir noch eine zusätzliche Achse von 11.2 m welche genau etwa die Grundresonanz von 30 Hz erzeugt. Diese vermögen beide Lautsprecher anzuregen.

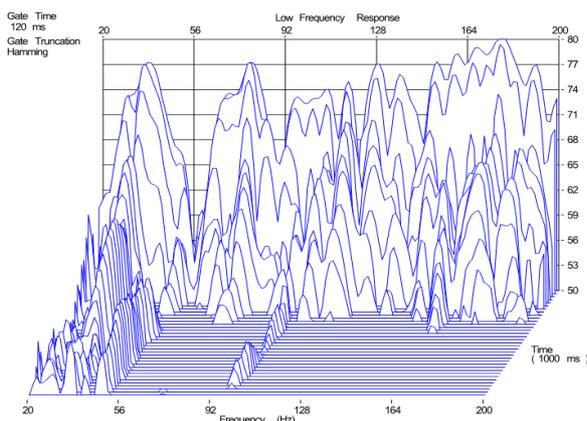


Abbildung 20: Unterer Frequenzbereich linker Lautsprecher

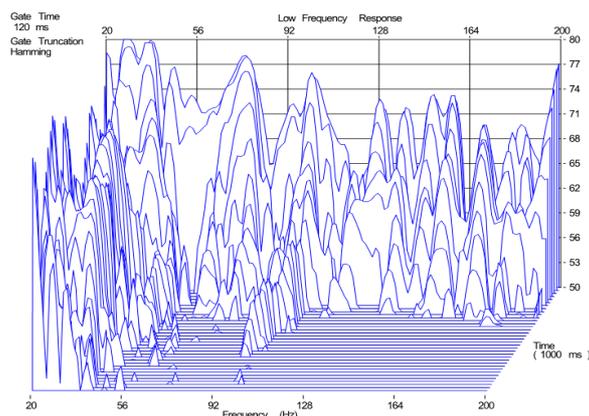


Abbildung 21: Unterer Frequenzbereich rechter Lautsprecher

Es fällt auf, dass der Raum unterhalb von 50 Hz sehr schlecht abklingt.

Betrachtet man die gleichen Abbildungen mit einer Skala von 60 dB bis 80 dB (Abbildungen 23 und 24) so sieht man, dass die Resonanz um 100 Hz nicht wirklich eine Rolle spielt, da sie schon früh unter

60 dB fällt und somit den geforderten Störabstand von 20 dB erfüllt. Es bleibt aber die starke Grundresonanz vor allem des rechten Lautsprechers.

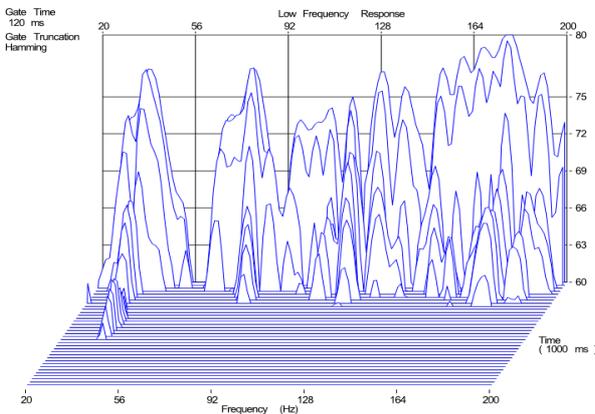


Abbildung 22: Unterer Frequenzbereich linker Lautsprecher

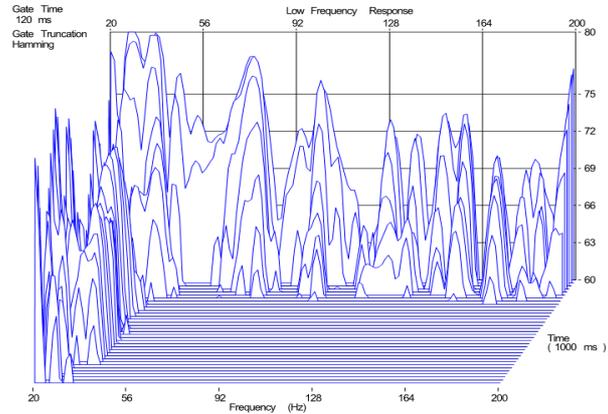


Abbildung 23: Unterer Frequenzbereich rechter Lautsprecher

5.5. Frequenzgang 200 Hz – 20 kHz

Im Gegensatz zu Frequenzgangmessungen, welche man in Fachzeitschriften und in den Datenblättern der Hersteller findet, ist eine Frequenzgangmessung eines Lautsprechers in einem Raum viel welliger, da der Gesamtschall gemessen wird und nicht nur der Direktschall. Das ist normal! Denn versucht man die Welligkeit z. B. mit einem Equalizer zu eliminieren, so klingt es meist sehr unnatürlich, da unser Ohr nur die ersten Millisekunden zur Klangbeurteilung braucht, also grösstenteils den Direktschall der Lautsprecher und die erste Wellenfront. Die Musik würde unnatürlich klingen, obwohl der Gesamtschall linearer wäre.

Die hier gezeigten Frequenzgänge wurden über $\frac{1}{3}$ -Oktaven gemittelt.

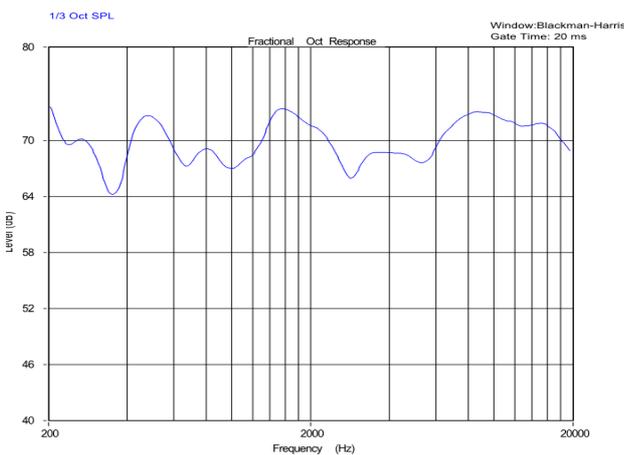


Abbildung 24: Frequenzgang 20 Hz - 20 kHz linker Lautsprecher

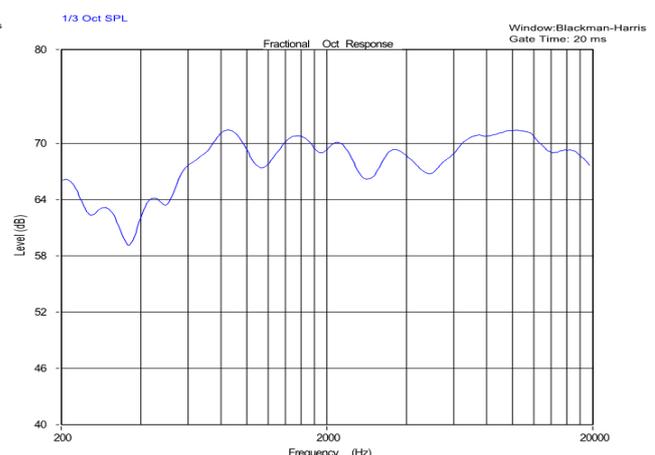


Abbildung 25: Frequenzgang 20 Hz - 20 kHz rechter Lautsprecher

Der Frequenzgang des rechten Lautsprechers erleidet am Hörplatz einen Einbruch bei ca. 300 Hz. Dies könnte durch eine verbesserte Platzierung eliminiert werden.

5.6. Psychoakustischer Frequenzgang

Da ein menschliches Ohr Töne und Klänge völlig anders wahrnimmt als ein Mikrofon, stimmen gemessene Frequenzgänge selten wirklich mit den gehörten überein. Unser Ohr ist toleranter. Ein Mikrofon erfasst immer alles! Flüstert z. B. ein Mensch neben einem Presslufthammer, so ist das Geflüster für einen Menschen zwar nicht zu hören, aber auf einer Mikrofonaufnahme vorhanden. Ähnliche Effekte verursachen, dass schmalbändige Frequenzeinbrüche «überhört» werden. Auch kann das Gehör zwischen dem Nutzsignal und den späten Wandreflexionen nach 50 ms sehr gut unterscheiden. Ein Mikrofon nimmt aber alles gleichwertig auf. In der Psychoakustik hat man Verfahren entwickelt und Gemessene in «gehörte» Frequenzgänge über zu führen. Zur Illustration wird ein solches Verfahren auf die Messung der Endaufstellung angewandt.

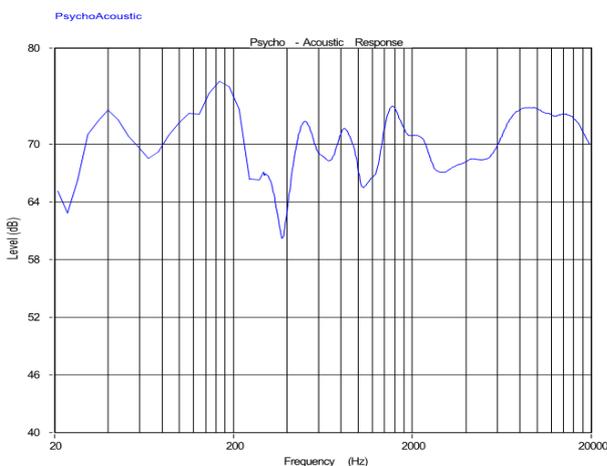


Abbildung 26: Psychoakustischer Frequenzgang linker Lautsprecher

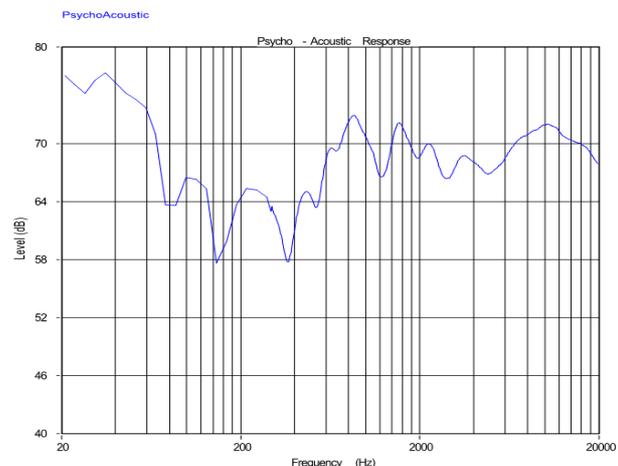


Abbildung 27: Psychoakustischer Frequenzgang rechter Lautsprecher

Man vergleiche dies mit den Abbildungen 18, 19, 24 und 25. Es wird deutlich welche Frequenzgangeinbrüche grösseren Einfluss haben, und welche praktisch ignoriert werden können. Um noch bessere Aussagen über den psychoakustischen Frequenzgang zu bekommen, müsste man noch mehr Messungen an verschiedenen Orten vornehmen. Die Erfahrung zeigt, dass sich der psychoakustische Frequenzgang vor allem in den oberen Frequenzen nochmals glättet. Durch kleinere Bewegungen unseres Kopfes hören wir ja normalerweise nicht einen völlig veränderten Frequenzgang.

5.7. Energieverteilung

Damit unser Gehör den Direktschall von den Reflexionen gut unterscheiden kann, sollte die Gesamtenergie nach dem Anfangsimpuls um etwa 20 dB fallen.

Betrachtet man die zeitliche Energieverteilung in Abbildung 28 und 29, so sind die Reflexionen wieder deutlich erkennbar (vgl. Abbildungen 14 und 15). Die Reflexionen innerhalb der ersten 6 ms bringen die Schallenergie wieder deutlich über die geforderten -20 dB (siehe rote 80 dB Linie).

Um den Zeitpunkt 30 ms ist nochmals ein deutlicher Anstieg der Energie zu verzeichnen. Dieser überschreitet wieder die geforderten -20 dB. Sehr wahrscheinlich wird dies durch den Eingangsbereich

verursacht, da dieser sehr sparsam möbliert ist und somit der eingehende Schall auch nicht bedämpft wird bzw. innerhalb dieses Bereichs verteilt wird.

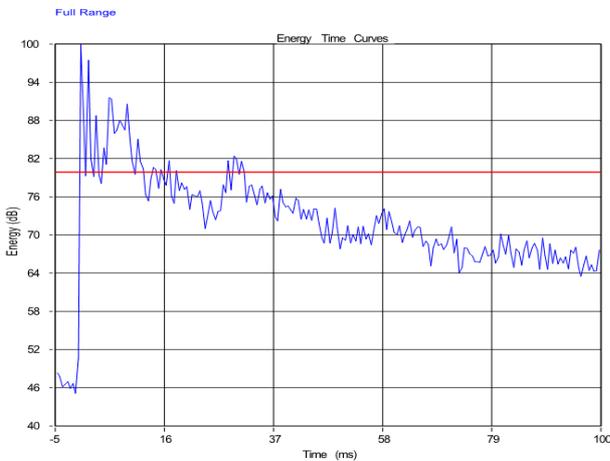


Abbildung 28: Energieverteilung linker Lautsprecher

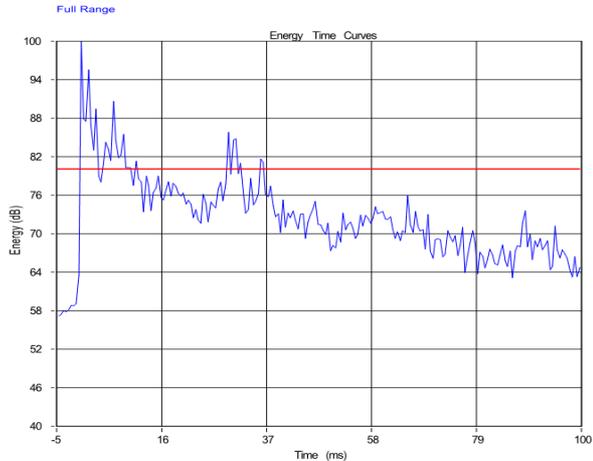


Abbildung 29: Energieverteilung rechter Lautsprecher

Vergleicht man diese beiden Kurven mit den Energieverteilungskurven im Anhang B, so sieht man, dass man durch eine Umplatzierung der Lautsprecher keine grosse Verbesserung erreichen kann. Möchte man hier im Allgemeinen Verbesserungen vornehmen, dann muss man den Raum selber akustisch behandeln oder eine entsprechende Möblierung finden.

5.8. Nachhallzeiten

Die gemessenen Nachhallzeiten RT_{60} werden in Abbildung 30 wiedergegeben:

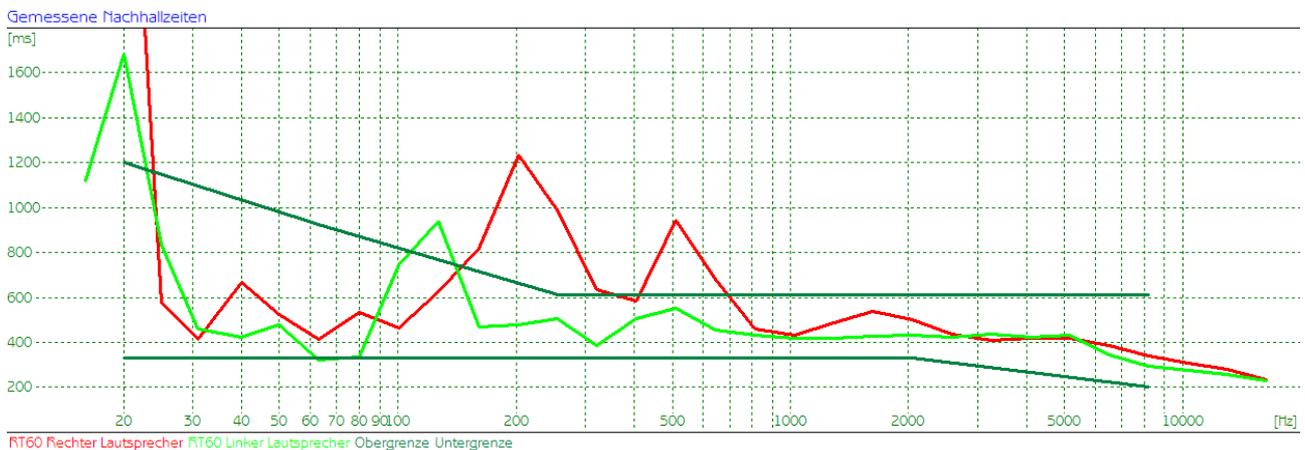


Abbildung 30: gemessene Nachhallzeiten RT_{60}

Die in der Simulation (vgl. Abbildung 7) vorhergesagte Problematik zwischen 150Hz und 800Hz werden durch die Messung bestätigt. Man sieht, dass dies vor allem durch die Platzierung des rechten Lautsprechers verursacht wird.

Und wie schon früher gesehen klingt der Bass unterhalb von 30 Hz sehr lange nach.

In den übrigen Bereichen erfüllt der Raum die Anforderungen für einen sehr guten Musikgenuss.

5.9. Bewertung der Ergebnisse und Empfehlungen

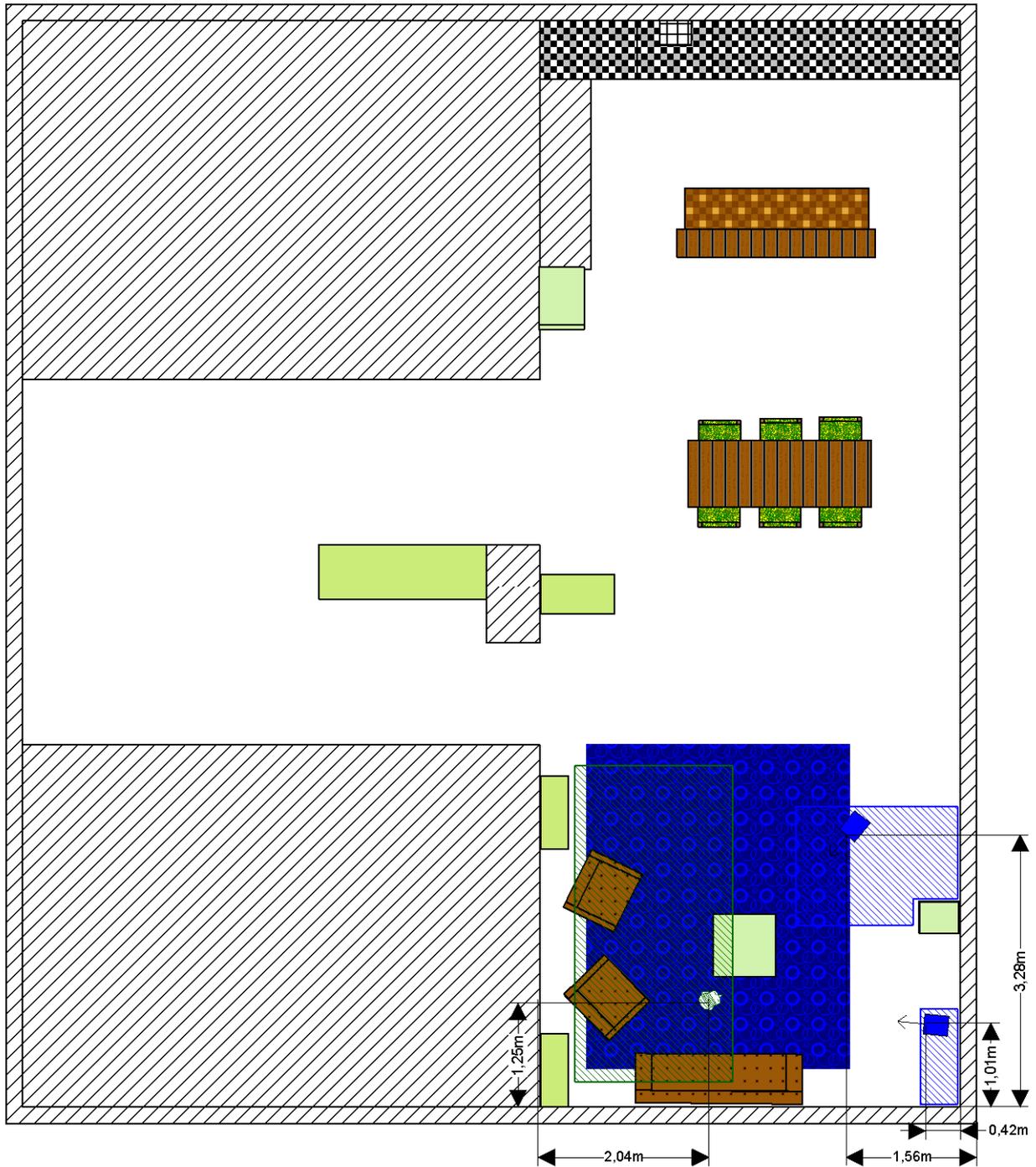
- Wie die Impulsantwort aufzeigt, treten in den ersten beiden Millisekunden die ersten Reflexionen auf. In diesem Zeitintervall nimmt unser Ohr die Ortung vor und Reflexionen sind in diesem Zeitraum unbedingt zu vermeiden. Zumindest beim «aktiven» Hören, sollte man den Hörplatz tiefer in den Raum setzen (vgl. Abbildung 13).
- Vor allem beim rechten Lautsprecher treten lange Nachhallzeiten im Bassbereich (unter 50 Hz) auf. Wenn es die Möblierung erlaubt, lautet die Empfehlung diesen weiter aus seiner Eckposition zu nehmen.
Erlaubt die Einrichtung dies nicht und möchte man den Bassbereich verbessern, so sollte man versuchen mit Hilfe von akustischen Massnahmen, z. B. einem parametrischen Equalizer, dies zu verringern.
- Die Nachhallzeiten zusammen mit der Simulation zeigen, dass die «Akustikdecke» wenig Schallenergie absorbiert. Sie isoliert vor allem zu den Nachbarn.
Um die Nachhallzeiten zwischen 150 Hz und 800 Hz zu senken, kann man versuchen den Raum z. B. mit mehr Büchergestellen oder anderen Möbeln stärker zu dämpfen.
- Aus der Impulsantwort, Frequenzlinearität und der Energieverteilung geht deutlich hervor, dass der gewählte Hörplatz zu nah an den Wänden ist. Eine Positionierung analog der Simulation, wird die in den Messungen aufgezeigten Probleme grösstenteils lösen.
Daher lautet die Empfehlung, den Hörplatz beim «aktiven» Musikhören näher an den optimalen Hörplatz analog Anhang A zu bringen. Dadurch treten die ersten Reflexionen später auf und die räumliche Abbildung des Musiksignals verbessert sich wesentlich.
- Um die Energiespitzen bei 30 ms zu glätten, muss man wahrscheinlich vor allem den Eingangsbereich stärker möblieren oder andere akustische Massnahmen ergreifen.
Die Messungen der Nachhallzeit zeigen, dass die Simulation recht genau ist. Also bevor man Investitionen wie neue Möbel oder Büchergestelle speziell für diese Problematik tätigt, kann mithilfe weiterer Simulation der Nutzen überprüft werden.

5.9.1. Zusammenfassung

Die Messungen zeigen auf, dass durch eine Verschiebung des Hörplatzes eine einfache kostengünstige Klangoptimierung erreicht werden kann.

Werden die späten Energiespitzen nicht als störend empfunden, so empfiehlt sich hier nichts zu unternehmen, da unser Gehör sehr gut zwischen dem Nutzsignal, also der Musik und den späten Wandreflexionen unterscheiden kann.

Anhang A: Aufstellungsergebnis der Simulation

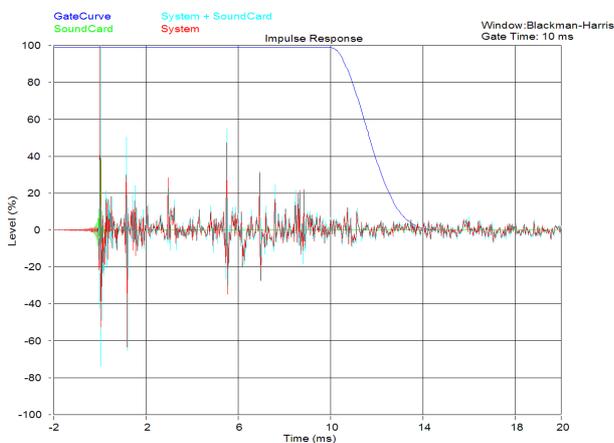


Anhang B: weitere Messungen

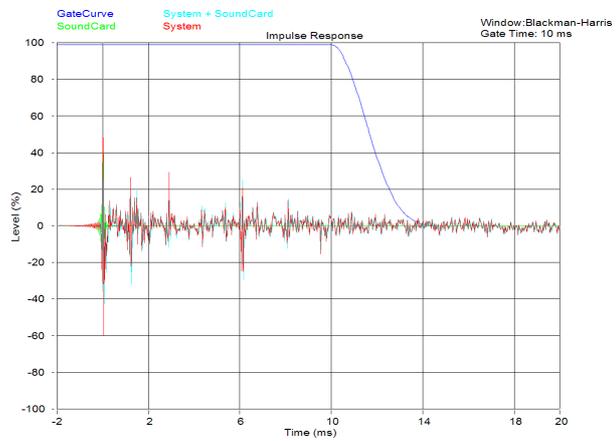
In den hier gezeigten Grafiken bezieht sich die «Anfangsaufstellung» auf die vorgefundene Lautsprecheraufstellung bei den Messungen und nicht auf die Anfangsaufstellung in der Simulation. Die «Optimale Aufstellung» bezieht sich auf den durch die Simulation ermittelte Aufstellungsvorschlag nur der Lautsprecher. Der Hörplatz wurde aus Einrichtungsgründen bei der Messung an seiner Stelle belassen! In Kapitel findet man die entsprechenden Grafiken der Endaufstellung der Lautsprecher und des Hörplatzes.

Sämtliche Messungen wurden mit dem Programm ETF5 [ETF] durchgeführt.

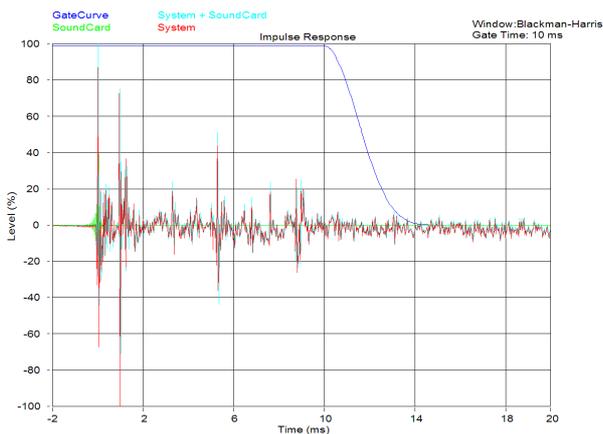
Impulsantwort



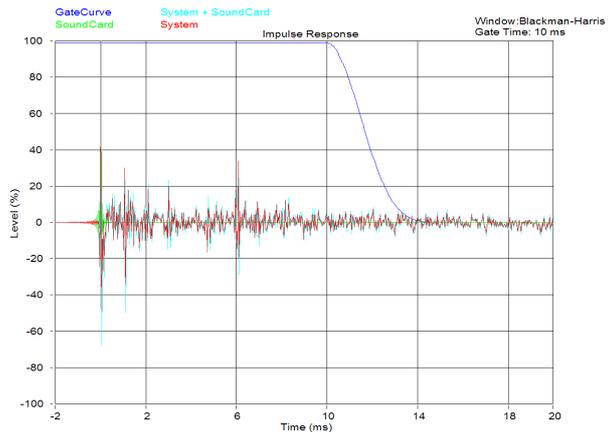
Anfangsaufstellung linker Lautsprecher



Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher

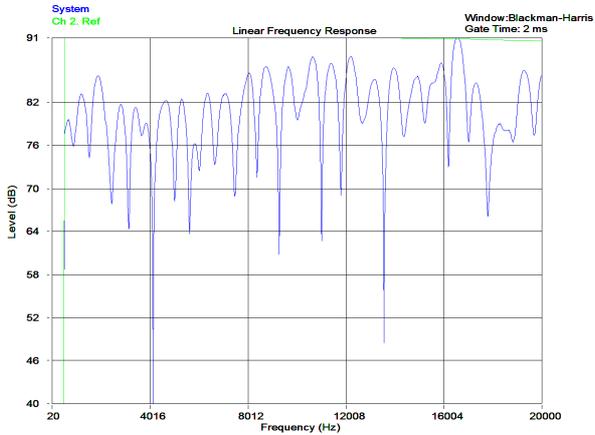


Optimale Aufstellung linker Lautsprecher

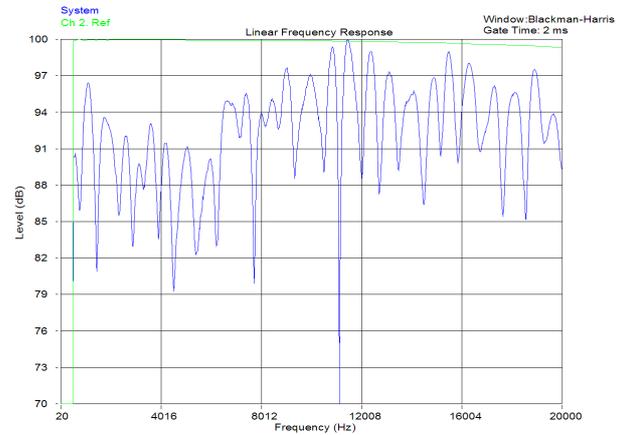


Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher

Frequenzlinearität

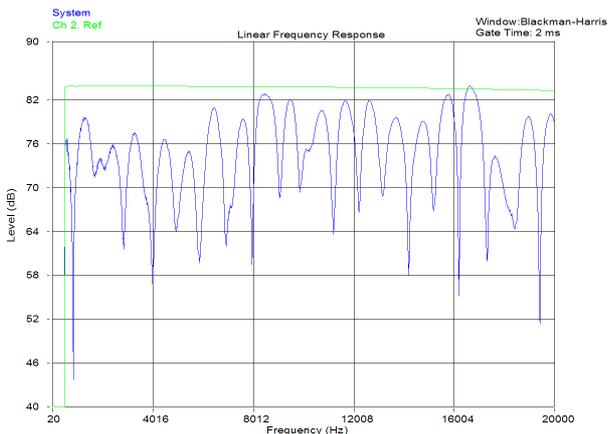


Anfangsaufstellung linker Lautsprecher

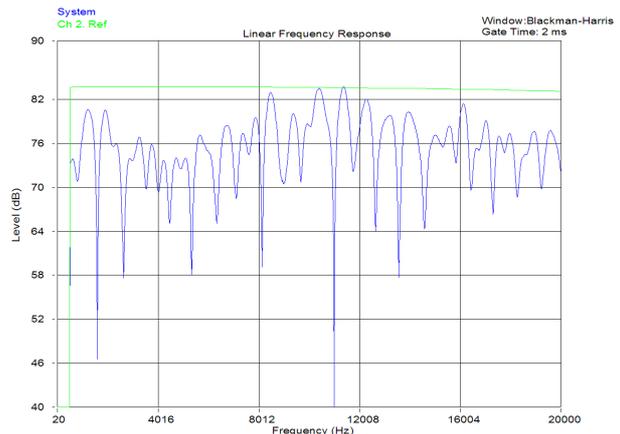


Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher

Die 10 dB mehr im rechten Kanal sind eine falsche Skalierung. In Wirklichkeit waren die Messungen gleich laut.



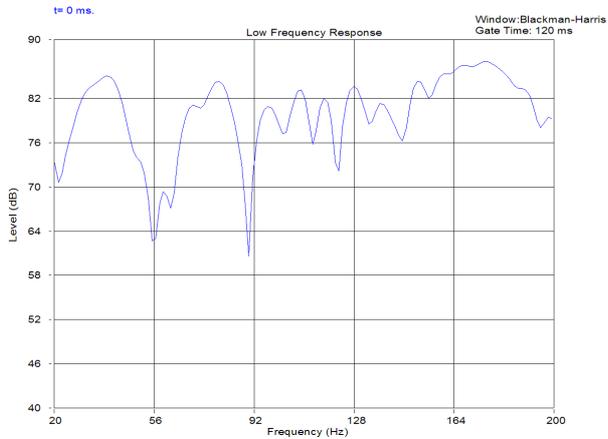
Optimale Aufstellung linker Lautsprecher



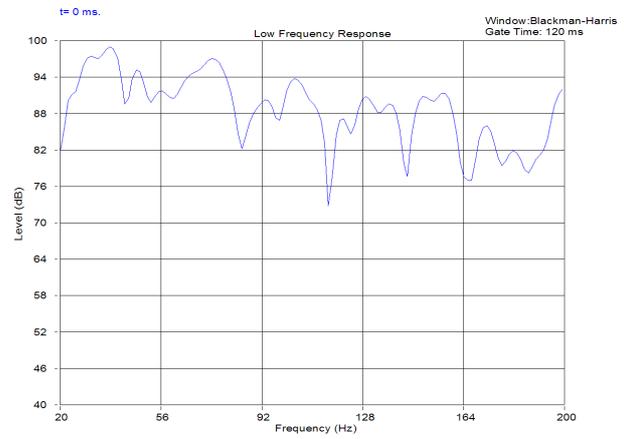
Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher

Die Kammfilterung bleibt durch die nicht optimale Wahl des Hörplatzes bei allen Messungen erhalten.

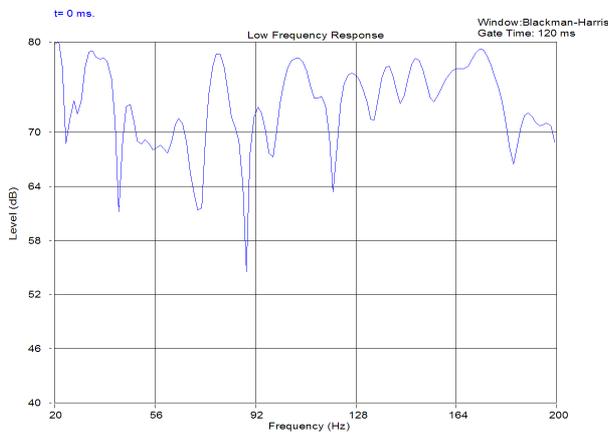
Frequenzgang 20 Hz – 200 Hz



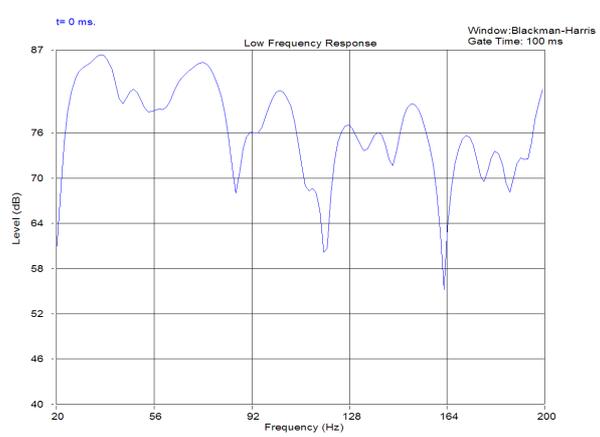
Anfangsaufstellung linker Lautsprecher



Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher

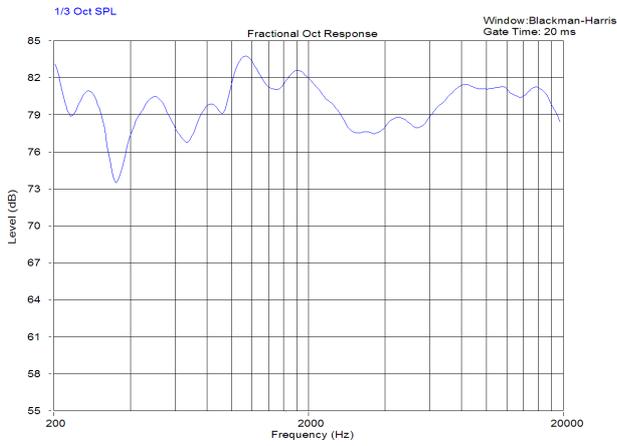


Optimale Aufstellung linker Lautsprecher

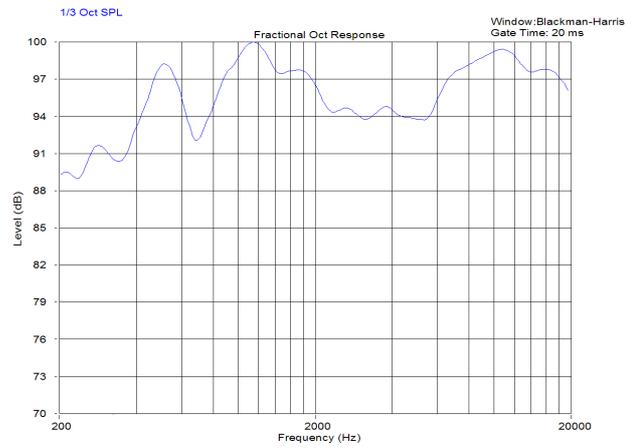


Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher

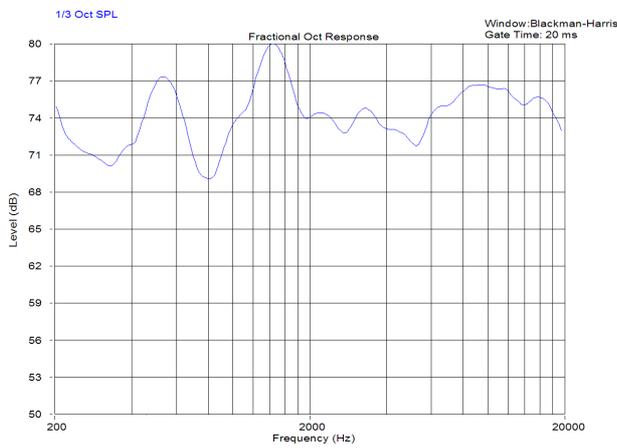
Frequenzgang 200 Hz - 20 kHz



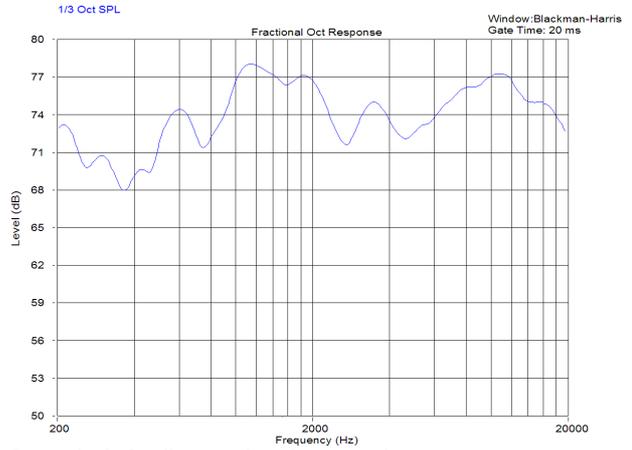
Anfangsaufstellung linker Lautsprecher



Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher

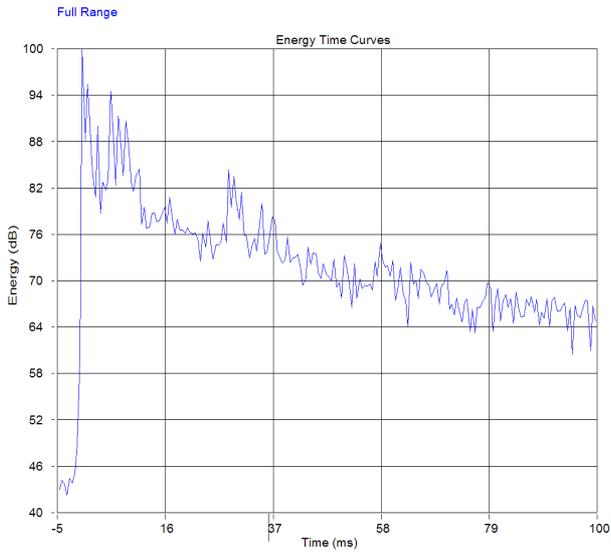


Optimale Aufstellung linker Lautsprecher

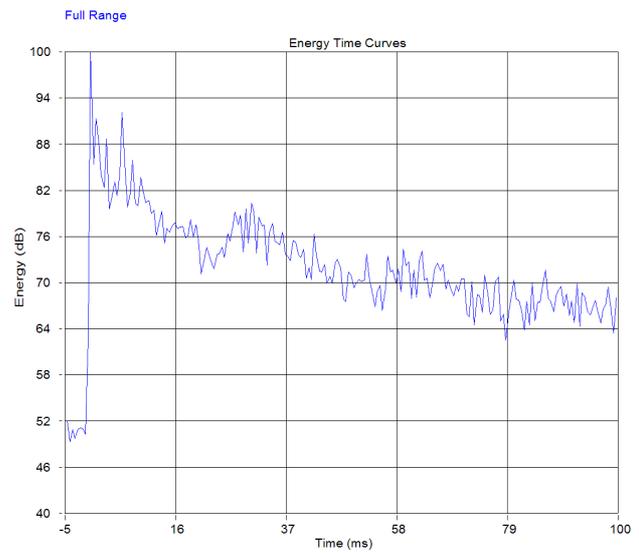


Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher

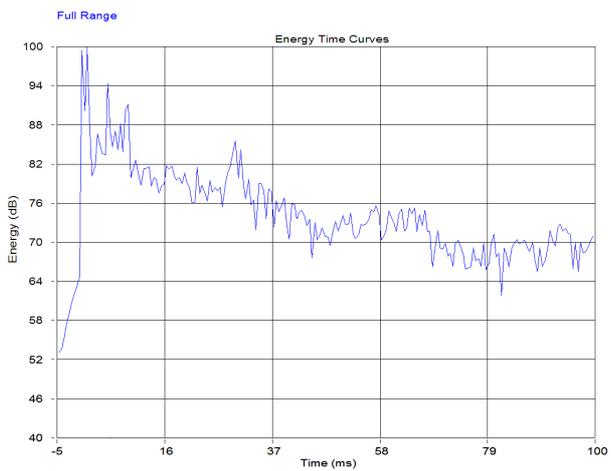
Energieverteilung



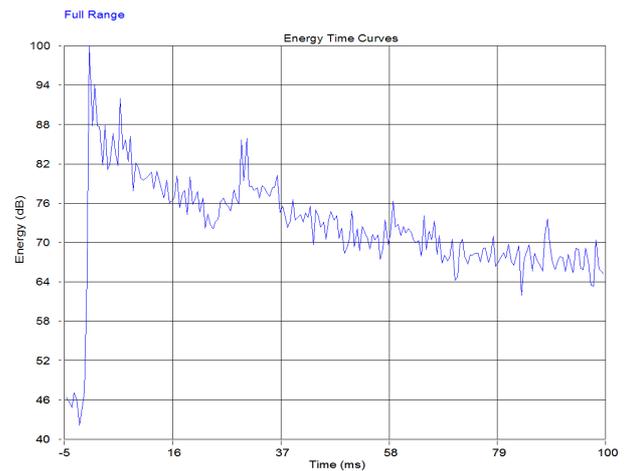
Anfangsaufstellung linker Lautsprecher



Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher

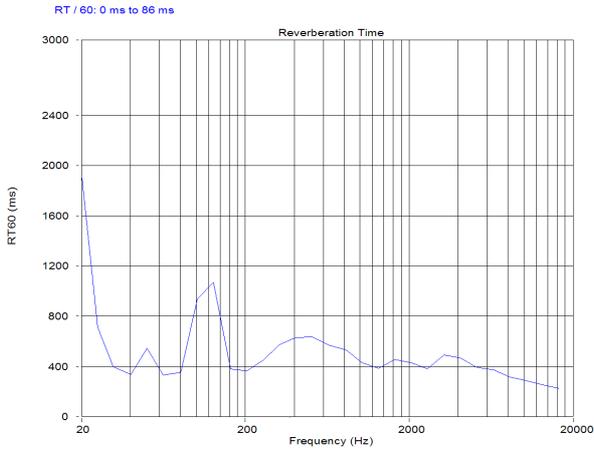


Optimale Aufstellung linker Lautsprecher

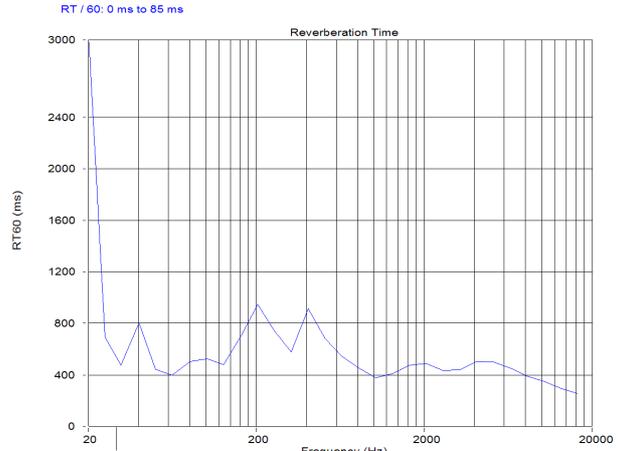


Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher

Nachhallzeiten



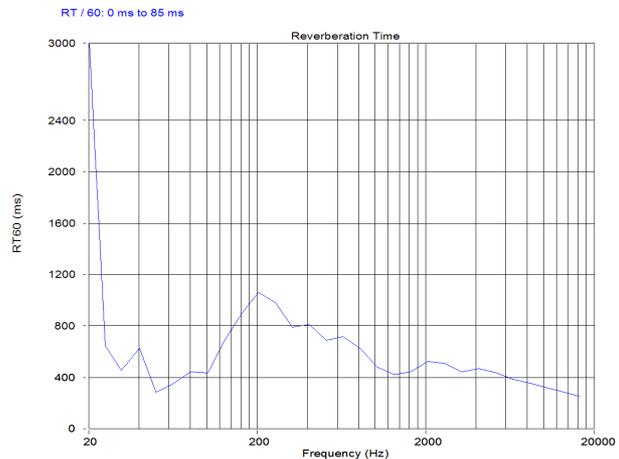
Anfangsaufstellung linker Lautsprecher



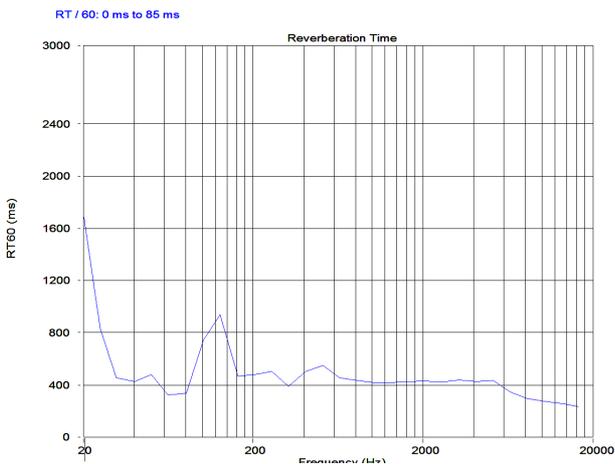
Anfangsaufstellung rechter Lautsprecher



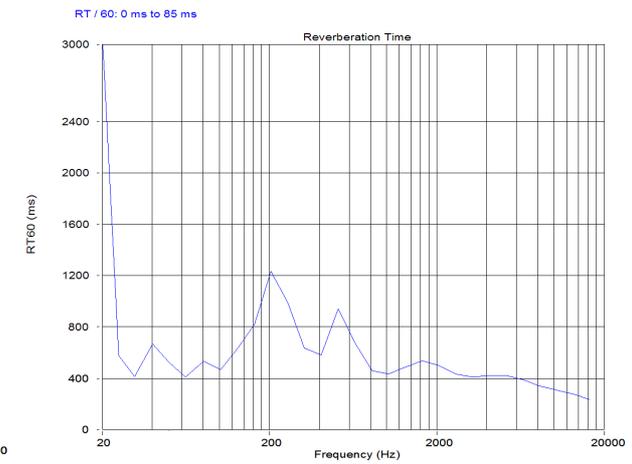
Optimale Aufstellung linker Lautsprecher



Optimale Aufstellung rechter Lautsprecher



Endaufstellung linker Lautsprecher



Endaufstellung rechter Lautsprecher

Anhang C: weiterführende Literatur

Im Literaturverzeichnis findet man die genauen dazu gehörenden Angaben. Am schnellsten hat man aber den Zugriff darauf, indem man in einer Suchmaschine den entsprechenden Titel eingibt.

Master Handbook of Acoustics: komplette und verständliche Einführung in die Akustik.

[FAE00]

Small Room Acoustics De-Mythologized: In diesem Papier wird zuerst das Verhalten des Schalls in realen Räumen untersucht und aufgezeigt, wie Echo, Echos, stehende Wellen, Resonanzen und Diffusion entstehen. Es wird die Frage diskutiert, wie diese objektiven Eigenschaften eines Tones in die subjektiven Eindrücke transferiert werden können. Auch wird betrachtet, wie die Architektur und die Materialien die objektive Akustik und somit die subjektive Akustik beeinflussen. Auch der Einfluss von Aufnahmen wird in die Überlegungen einbezogen.

[AC107]

Kreative Raum-Akustik: Voraussetzungen und Vorgehensweisen für die Raumgestaltung mit Klang und für Klang. Die Akustik ist auf subtile Weise für das Wohlbefinden im Raum verantwortlich. Bewusstes Hören beeinflusst das Entwerfen von Räumen nicht minder als bewusstes Sehen. Dieses Buch zeigt wie.

[KREA01]

Raumakustik in der Praxis: eine allgemeine Einführung in die Problematik für verschiedene Typen von Räumen. Auch werden erste Massnahmen aufgezeigt.

[RIP04]

Der Raum ist das Ziel: ein Interview mit Dr. Roland Gauder über die akustischen Gesetze, welche in Wohnräume gelten, und wie man erste Verbesserungen unter Berücksichtigung des menschlichen Verhaltens herbeiführt.

[DRZ]

Im Rahmen des Möglichen: «Erlaubt eine stereofone Aufnahme-Wiedergabe-Kette die dreidimensionale Abbildung eines Klanggeschehens?». Dieser Artikel zeigt auch die Grenzen der Stereophonie auf.

[IRM]

Über den Einfluß der Richtcharakteristik tieffrequenter Schallquellen auf die Anregung der Moden kleiner Abhörräume: Der Titel dieses Papier sagt schon alles.

[ERS]