
TONINGENIEURSPROJEKT

EINSATZBEREICH VON LINE-ARRAYS UND PUNKTSCHALLQUELLEN

Ermittlung der Einsatzbereiche

durchgeführt am
Signal Processing and Speech Communications Laboratory
Graz University of Technology, Austria

von
Christoph Santer, 01131350

Betreuer:
Dipl.-Ing. Thorsten Rohde

Graz, 18. Februar 2020

Danksagung

Ich möchte mich ganz besonders bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Rohde für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Ganz explizit auch für die Bereitstellung einer seiner EASE-Lizenzen zur Durchführung der Simulationen. Außerdem möchte ich mich bei meinen Eltern für die Korrektur dieser Arbeit bedanken.

Abstract

If you use separate point sources or a line array for a sonication, depends on the situation you have to deal with. Often line arrays are used, even though from a technical point these expensive and difficult systems are not necessary. Therefore the physical basics of both systems are explained and the pros and cons are discussed. Also the setup and positioning of the systems are discussed. Subsequently simulations are used to find out for which configurations a line array works better than a system of point sources.

Kurzfassung

Ob einzelne Punktschallquellen oder ein Line Array für die Beschallung benutzt werden, hängt davon ab, welche Konfiguration für die anstehende Aufgabe besser geeignet ist. Doch häufig werden in der Praxis Line Arrays eingesetzt, obwohl die Notwendigkeit eines solch komplexen und teuren Systems technisch gar nicht notwendig erscheint. Daher werden die physikalischen Grundlagen der beiden Konzepte dargelegt und die Vor- und Nachteile diskutiert. Es werden außerdem die verschiedenen Möglichkeiten der Aufstellung der Systeme und die bei der Aufstellung zu beachtenden Eigenschaften besprochen. Anschließend wird mittels Simulationen in exemplarischen Räumen versucht herauszufinden, ob ein Line Array wirklich die besseren Ergebnisse liefert oder doch ein System aus Punktschallquellen die bessere Wahl ist.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Erläuterung der Thematik	7
1.2	Motivation	7
1.3	Ergebnis und Kapitelübersicht	8
2	Vom Punktstrahler zum Line-Array	9
2.1	Wellenausbreitung	9
2.1.1	Kugelwelle	9
2.1.2	Zylinderwelle	9
2.1.3	Ebene Welle	10
2.2	Punktquellen	10
2.2.1	Cluster	11
2.3	Endliche Linienquelle aus einzelnen Punktschallquellen	12
2.3.1	Richtverhalten und Waveguides	13
2.3.2	Abstrahlverhalten und Curving	17
2.3.3	Array processing	18
3	Einsatzbereiche, Beschallungskonzepte und äußere Einflüsse	19
3.1	Beschallung im Bassbereich	19
3.1.1	Links, Rechts und Center	20
3.1.2	Cardioid and Beamforming	21
3.2	Mitten und- Hochtonbereich	22
3.2.1	Im Nahbereich der Bühne	22
3.2.2	Delaylines	23
3.2.3	Einfluss der Raumakustik	24
3.2.4	Klimatische Einflüsse	24
3.2.5	Pros and cons	25
4	Simulierte, praxisbezogene Beispiele	27
4.1	Verwendete Software	27
4.1.1	EASE	27
4.1.2	Array Calc	28
4.2	PA	28
4.2.1	Punktschallquelle	28
4.2.2	Line-Array	29
4.2.3	Herausforderer KV2 Audio	32
4.3	Parameter zur Beurteilung der Ergebnisse	33
4.4	Simulation in verschiedenen Räumen	34
4.4.1	Kleiner Veranstaltungsraum	35
4.4.2	Veranstaltungsraum mittlerer Größe	38
4.4.3	Großer Veranstaltungshalle	42
4.4.4	Kirche	46
4.4.5	Open Air	49
5	Diskussion, Fazit und Ausblick	53
	Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	55
A	Anhang	59

1

Einführung

1.1 Erläuterung der Thematik

In der Beschallung gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche physikalische Modelle auf deren Basis die Entwicklung von Lautsprechern stattfindet.

Die einfachste und wahrscheinlich geläufigste Art der Beschallung basiert auf dem Konzept der Punktschallquelle, welche in ihrer idealisierten Form eine einfache Schallquelle ist, die eine Kugelwelle abstrahlt. Weitere Erläuterungen dazu folgen in Kapitel 2.1.1. Durch den Einbau der Punktquelle in ein Chassis, zur Erhöhung der Wirksamkeit, und durch die Aufteilung der Wiedergabe des Frequenzspektrums auf mehrere Treiber gehen die Eigenschaften der idealen Kugelwellenabstrahlung zwar verloren, dennoch liegt dieses Prinzip aber der Funktion der Punktschallquelle zu Grunde. Die meisten Lautsprecher in unserem Alltag funktionieren nach diesem Prinzip.

Werden nun unendlich viele Punktschallquellen zusammen gebracht und in einer Linie angeordnet, wobei zwischen 2 Quellen immer der gleiche Abstand ist, so wird eine Linienquelle erzeugt. Idealisiert ist diese Linienquelle unendlich lang und wirkt auch nicht mehr wie einzelne Punktschallquellen, sondern wirkt als eine durchgehende Linienschallquelle. Diese Quelle strahlt eine Zylinderwelle ab, deren Eigenschaften wiederum später in Kapitel 2.1.2 besprochen werden. Line Arrays funktionieren nach diesem Prinzip. Es werden mehrere Punktschallquellen zu einer Linie zusammengefügt und es wird versucht, eine Zylinderwellenabstrahlung zu erreichen. Durch die endliche Länge des Arrays und weitere physikalische Einflüsse ist dies nur begrenzt möglich.

Die Funktionsweise der einzelnen Treiber soll in dieser Arbeit keine genauere Betrachtung erfahren. Vielmehr soll Aufschluss darüber gegeben werden, welches der beiden Konzepte bei einer bestimmten Beschallungssituation herangezogen werden soll.

1.2 Motivation

In den vergangenen Jahren gab es in der „Beschallungsindustrie“ zahlreiche Neu- und Weiterentwicklungen, die zu einer Vielzahl neuer Produkte am Markt führten. So wurden Line Arrays zu einem der wichtigsten Tools bei der Beschallung und werden bei vielen Konzerten heutzutage als Beschallungskonzept gewählt. In erster Linie sind Line Arrays auf großen Konzerten mit vielen tausenden Besuchern zu sehen. Doch im Laufe der letzten Jahre kamen Line Arrays immer öfter schon bei weniger Zuhörern und in immer kleineren Räumen zum Einsatz. Hersteller versuchen vermehrt Systeme in verschiedenen Größen und mit verschiedensten Einsatzmöglichkeiten auf den Markt zu bringen, um dem Kunden für jede Konzert- oder Beschallungssituation, das richtige Tool zur Verfügung stellen zu können. Und so wollen immer mehr Kunden Line Arrays bei ihren Veranstaltungen zum Einsatz bringen. Es scheint so, als wären Line Array Systeme zu einem Statussymbol für gewisse Betriebe und Personen geworden, unabhängig von der Sinnhaftigkeit ihres Einsatzes.

Doch, macht ein Line Array wirklich immer Sinn? Ist es wirklich immer die beste Wahl oder wäre ein System aus Punktschallquellen oftmals die bessere Wahl? Bis zu welcher Größe von Raum und Publikum reichen Punktschallquellen aus, ehe besser Line Arrays zum Einsatz kommen? Ist diese Frage technisch und objektiv überhaupt so zu beantworten oder wird dies immer eine Frage des Geschmacks bleiben? Diese Fragestellungen sollen in der folgende Arbeit behandelt werden.

1.3 Ergebnis und Kapitelübersicht

Am Ende dieser Arbeit soll ein besseres Verständnis für den Einsatzbereich von Line Arrays und Punktschallquellen gefunden werden. Es wäre auch wünschenswert einen kleinen Leitfaden zur Entscheidung bei Neuanschaffungen geben zu können und zu erforschen, inwieweit der Kauf eines teuren Line Array Systems wirklich Sinn macht. Simulationen sollen dabei helfen über die Einsatzbereiche der verschiedenen Beschallungskonzepte Aufschluss zu geben.

Dazu werden in Kapitel 2 die physikalischen Grundlagen näher erläutert. In Kapitel 3 wird theoretisch darauf eingegangen, für welche Einsatzbereiche die verschiedenen Beschallungskonzepte in Frage kommen. Diese theoretischen Überlegungen werden anschließend mit Simulationen überprüft und die Ergebnisse in Kapitel 4 dargestellt.

2

Vom Punktstrahler zum Line-Array

Im folgenden Kapitel wird auf die Grundlagen, die zum Verständnis der Funktionsweise eines Line-Arrays notwendig sind, näher eingegangen. Während einfache, „normale“ Punktschallquellen kugelförmige Abstrahlcharakteristik aufweisen, wird bei Line-Arrays versucht eine zylinderförmige Abstrahlung zu erreichen.

2.1 Wellenausbreitung

2.1.1 Kugelwelle

Bei einer Punktschallquelle, also einer einzelnen Schallquelle im Raum, wird eine Kugelwelle abgestrahlt. Hierbei breitet sich die Welle in streng konzentrischen Wellenfronten von der Quelle weg aus. Die Flächen gleicher Phase sind also konzentrisch zum Sender gelegene Kugeloberflächen. Dadurch nimmt die Energiedichte einer Kugelwelle mit $\frac{1}{r^2}$ ab und die Wellenamplitude mit $\frac{1}{r}$. Dies ergibt sich aus der Vergrößerung der Fläche, auf welche sich die Energie verteilt, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Leistungsdichte verringert sich pro Entfernungsverdoppelung auf ein Viertel, der Druck auf die Hälfte. So ergibt sich bei einer Punktschallquelle pro Entfernungsverdoppelung zur Quelle ein Abfall von 6 dB. [3, S. 1]

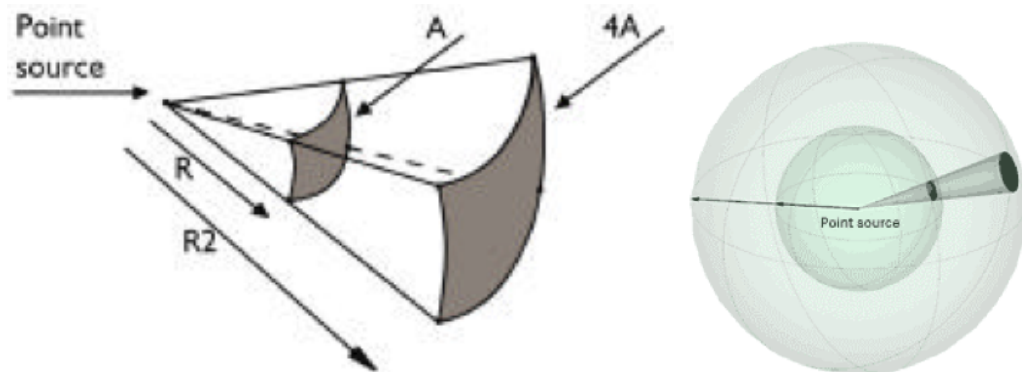


Abbildung 2.1: Ausbreitung einer Kugelwelle von einer Punktquelle weg.

2.1.2 Zylinderwelle

Bei einer Zylinderwelle wird als Quelle eine unendliche lange Linienquelle angenommen. Diese besteht zumeist aus vielen einzelnen diskreten Punktquellen, welche in gleichem Abstand zueinander auf einer Linie angereiht sind. Die Flächen gleicher Schwingungsphase bilden eine Zylinderfläche, in deren Zentrum die Quelle liegt. Mit zunehmenden Abstand zur Quelle nimmt die Energiedichte ab, in diesem Fall verteilt sich die Energiedichte pro Entfernungsverdopplung

auf die doppelte Fläche. Dadurch nehmen Leistungsdichte und Druck pro Entfernungsverdoppelung um nur 3 dB ab. [3, S. 1]

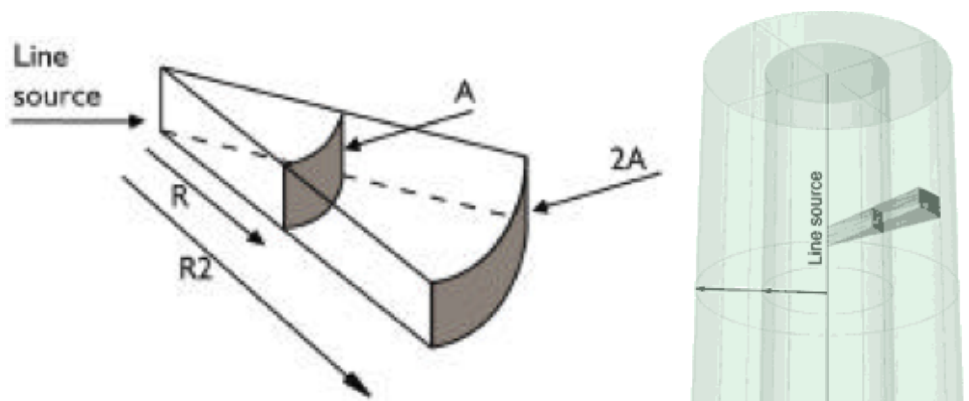


Abbildung 2.2: Ausbreitung einer Zylinderwelle von einer Linienquelle weg.

2.1.3 Ebene Welle

Zu guter Letzt sei noch das Prinzip der ebenen Wellenausbreitung erwähnt. Eine ebene Welle wird von einer unendlich ausgedehnten und homogen schwingenden Fläche ausgestrahlt. Alle Flächen gleicher Phasenlage sind zur Ursprungsfläche parallel und breiten sich senkrecht zum Ursprung aus. Sie ist also eine eindimensionale Welle. Die Energiedichte ist unabhängig von Entfernung und Position überall gleich groß und es kommt daher zu keinem Pegelabfall mit der Entfernung. Real kann eine solche Welle aber in großem Maßstab nicht erzeugt werden und sie bleibt daher eine Utopie für die Beschallung.

Dies sind physikalische Grundprinzipien, die nur bei idealen physikalischen Bedingungen vollständig gelten. Das bedeutet z.B., dass eine Punktquelle in keinem Gehäuse verbaut sein darf oder eine Line Array unendlich lang sein muss. In der Praxis werden diese Kriterien natürlich nicht erfüllt und die Eigenschaften der Schallquellen verändern sich. Dennoch bleibt ihr Grundprinzip aber immer gültig, auch wenn sich die Randbedingungen ändern.

2.2 Punktquellen

Wie im vorhergegangenen Kapitel 2.1.1 bereits erklärt, funktionieren die meisten Lautsprecher nach dem Prinzip der Punktquelle. Diese gilt aber natürlich nur in idealisierter Form. In der Realität wird die kugelförmige Abstrahlung nur im Tieftonbereich erreicht, ehe zu den Höhen hin eine immer stärker gerichtete und gebündelte Abstrahlung der Schallenergie stattfindet.

Wie bereits erwähnt werden in dieser Arbeit die Funktionsweisen von Lautsprechern keiner näheren Betrachtung unterzogen. Ganz allgemein aber sei erwähnt, dass es verschiedene Wandler-systeme gibt, welche je nach Einsatzbereich im Lautsprecherbau zum Einsatz kommen. Durch die Wahl eines passenden Gehäuses kann das Frequenzverhalten des Lautsprechers beeinflusst werden. Durch Hörnern wird der Wirkungsgrad erhöht, in dem die Membran an die Schallkennimpedanz von Luft angepasst wird. Diese Wirkungsgraderhöhung kann durch die zusätzliche Verwendung einer Druckkammer noch weiter gesteigert werden.

Die Verwendung von Breitbandlautsprechern wird in der professionellen Beschallung tunlichst vermieden, da einige Effekte dagegen sprechen. (Siehe [1, S. 163]). Da ein gutes Abstrahlverhalten von 20 Hz bis 16 kHz also für einen Breitbandlautsprecher nicht zu realisieren ist, werden

Mehrwegsysteme bevorzugt. Es wird das Eingangssignal mittels Frequenzweiche in zumeist 2 oder 3 Teile (Tief, Mittel und Hochtonbereich) aufgeteilt und diese jeweils einem Treiber zugeführt. (Abbildung 2.3) Dabei werden die Radien der Membrane mit zunehmender Frequenz immer kleiner, also von der größten Membran für den Tieftonbereich hin zur kleinsten im Hochtonbereich. Dies hat einen positiven und erwünschten Effekt auf die Richtwirkung des Lautsprechers. Dieser wird vom Radius der Membran r_M und der Wellenzahl κ , also

$$\kappa \cdot r_M = \frac{\omega}{c} \cdot r_M = \frac{2\pi f}{c} \cdot r_M \quad (2.1)$$

bestimmt. Um eine möglichst ungerichtete Abstrahlung zu erreichen, ist also mit steigender Frequenz eine immer kleinere Membran notwendig. Für ungerichtete Abstrahlung sollte Gleichung 2.1 kleiner 1 sein. [1]

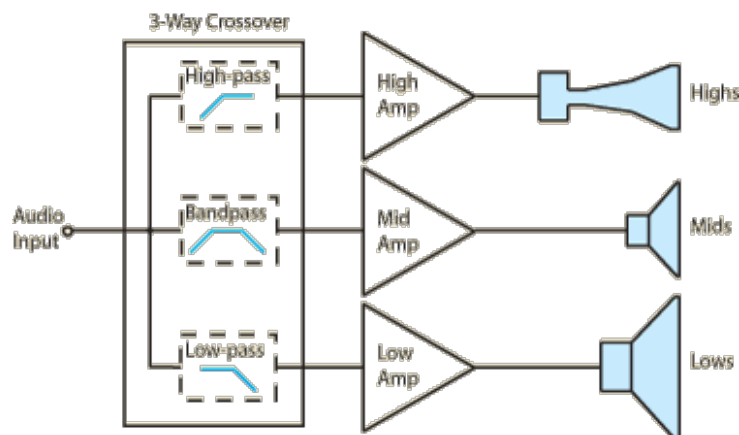


Abbildung 2.3: 3-Weg Frequenzweiche.

2.2.1 Cluster

Mit einem einzelnen Lautsprecher bzw. 2 oder mehr bei Stereo- bzw. LCR-Beschallung stößt man schnell an Grenzen und so wird versucht, durch mehrere Lautsprecher, die zu einem Cluster angeordnet werden, bessere Beschallungsergebnisse zu erreichen. So werden meist Cluster aus mehreren Lautsprechern, die sowohl horizontal als auch vertikal neben- bzw. übereinander angeordnet werden, gebildet.

Bis zu einer Frequenz deren $\frac{\lambda}{2}$ -Wellenlänge länger als der Abstand zwischen zwei Lautsprechern ist, funktioniert das Cluster und es gibt eine Verstärkung, da diese Frequenzen sich konstruktiv überlagern. Dies ist gut in der oberen linken Grafik in Abbildung 2.4 zu erkennen, in welcher die Überlagerung von zwei Schallquellen mit einem Abstand von 1 m bei 125 Hz dargestellt ist. Steigt die Frequenz aber und die $\frac{\lambda}{2}$ -Wellenlänge wird kürzer als der Abstand zwischen den Quellen, so bilden sich durch die Überlagerung der Schallwellen, sowohl konstruktive als auch destruktive Überlagerungen. Abhängig von der Frequenz entstehen so unerwünschte Interferenzmuster im Raum, welche zu stark ortsabhängigen Ergebnissen in der Beschallung führen. Dies ist wiederum in Abbildung 2.4 zu erkennen, wobei die Grafiken links unten bzw. die beiden auf der rechten Seite die Ausbreitung und Überlagerung der Schallwellen bei 400, 1000 und 4000 Hz zeigen.[8]

Durch die Bedingung, dass der Abstand zwischen 2 Treibern nicht größer als $\frac{\lambda}{2}$ sein darf ehe Interferenzen entstehen, ergibt sich für einen Abstand der Lautsprecher von 1 m, wie in Abbildung 2.4 angenommen, und einer Schallgeschwindigkeit von 340 m/s, eine Grenzfrequenz von 170 Hz.

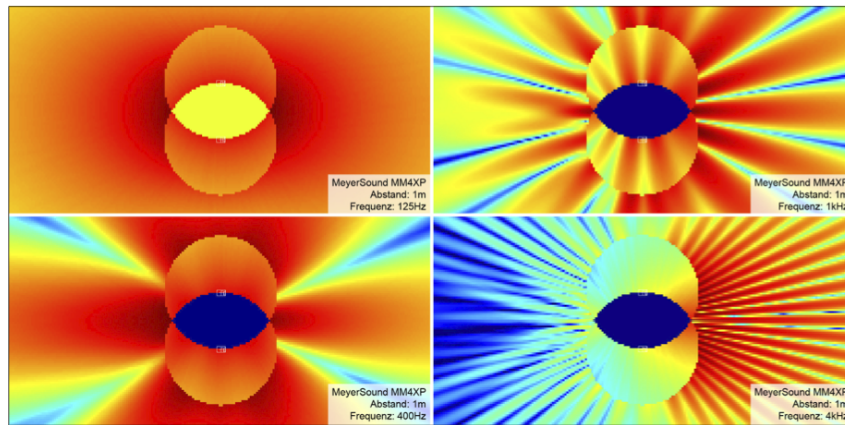


Abbildung 2.4: Überlagerung von 2 Punktquellen bei verschiedenen Frequenzen.

Möchte man eine Beschallung bis 16 kHz mittels Clusterbildung realisieren, so dürfte der Abstand der Treiber nicht mehr als 1 cm betragen. Dies ist rein physikalisch schon sehr schwer bis gar nicht machbar.

Es kann nun versucht werden durch stark bündelnde Hornsysteme und eine gewinkelte Aufstellung der Schallquellen ein besseres Ergebnis für den gesamten Bereich der zu beschallenden Fläche zu erreichen, wie in Abbildung 2.5 skizziert wird. Dennoch bleiben die Überlappungsbereiche kritisch und Hörer in diesem Bereich werden mit dem Ergebnis nicht zufrieden sein. [3]



Abbildung 2.5: Vertikales Lautsprechercluster.

2.3 Endliche Linienquelle aus einzelnen Punktschallquellen

Nachdem die Bildung eines gewöhnlichen Clusters, wie in Kapitel 2.2.1 gezeigt, nicht optimal ist, widmen wir uns nun der Linienquelle.

Im Kapitel 2.1.2 wurde von einer unendlich langen Linienquelle ausgegangen, welche natürlich nur in der Theorie existiert. In der Praxis kommen endliche Linienquellen bestehend aus einzelnen Punktschallquellen zum Einsatz, was zu einem Verlust der idealen Eigenschaften von Zylinderwellen führt und so einige Probleme mit sich bringt, die bestmöglich gelöst werden müssen.

Eine unendlich lange Linienschallquelle besitzt Zylinderwellenverhalten - eine endlich lange Linienschallquelle besitzt diese Zylinderwellenverhalten nur mehr bis zu einer gewissen räumlichen Ausdehnung, ehe die Ausbreitung in eine sphärische übergeht. Umso länger die Linien-

quelle ist, umso weiter auch der Radius in dem sich eine Zylinderwelle ausbreitet. Dieser Radius trennt somit die Abstrahlung in Nah- und Fernfeld - es herrscht also Zylinderwellenverhalten im Nahfeld ehe dies im Fernfeld in Kugelwellenverhalten übergeht. Wie groß das Nahfeld, auch Fresnel-Zone genannt, einer Linienschallquelle ist, ist natürlich auch stark frequenzabhängig. Der Übergang vom Nah- zum Fernfeld kann nun rechnerisch ermittelt werden.[3, 4]

$$r_{border} = \frac{3 \cdot l^2 \cdot f}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{3lf}\right)^2} \quad (2.2)$$

Da für den üblichen Frequenzbereich, in dem das Array betrieben wird, das Ergebnis der Wurzel in Gleichung 2.2 meist 1 liefert, kann die Formel vereinfacht werden:

$$r_{border} = \frac{l^2 \cdot f}{2 \cdot c} \quad (2.3)$$

Dabei steht l für die Länge des Arrays in m , f für die Frequenz in Hz und c für die Schallgeschwindigkeit in m/s .

2.3.1 Richtverhalten und Waveguides

Die vertikale Richtcharakteristik, oder auch Richtverhalten, kann für das Fernfeld nach Gleichung 2.4 berechnet werden.

$$R(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{c} \cdot l \cdot f \cdot \sin \alpha\right)}{\frac{\pi}{c} \cdot l \cdot f \cdot \sin \alpha} \quad (2.4)$$

Hauptsächlich wird diese vertikale Richtcharakteristik beschrieben durch den -6 dB Öffnungswinkel des Hauptmaximums, welcher durch Gleichung 2.5 (siehe [3, S.3])

$$D_v = 2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{0,6}{3 * l * f / 1000}\right) \quad (2.5)$$

oder Gleichung 2.6 (siehe [4, S.2]) berechnet werden kann:

$$BW_{-6dB} = 2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1,9 * \lambda}{3 * l * \pi}\right) \quad \text{wobei} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (2.6)$$

Beide Gleichungen liefern ähnliche Ergebnisse. Der Öffnungswinkel nimmt also mit steigender Frequenz ab und wird so immer gerichteter, was auch dazu führt, dass die Beschallung mit zunehmender Distanz immer höhenlastiger wird.

Für ein gut funktionierendes Line-Array ist es unbedingt notwendig, dass bei der Abstrahlung eine kohärente Wellenfront erzeugt wird. Ist dies nicht der Fall, so bilden sich ab der Grenzfrequenz, ab welcher die $\frac{\lambda}{2}$ -Wellenlänge kleiner als der Abstand zwischen 2 Treibern ist, ungewollte Nebenmaxima. Für ein 2 m langes Array, bei welchem der Abstand zwischen den einzelnen Treibern 20 cm beträgt, liegt so die Grenzfrequenz bei 1700 Hz . In Abbildung 2.6(a) ist die Richtcharakteristik für das 1000 Hz -Band dargestellt. Da diese unter der Grenzfrequenz liegt, bilden sich keine Nebenkeulen. Erst bei der Betrachtung der Richtcharakteristik des 2000 Hz -Bandes in Abbildung 2.6(b) zeigen sich Nebenkeulen. Anhand der stark unterschiedlichen Ausprägung

der Nebenkeulen für die 3 Terzbänder im 2000 Hz -Band zeigt sich, wie stark frequenzabhängig die Richtcharakteristik ist.

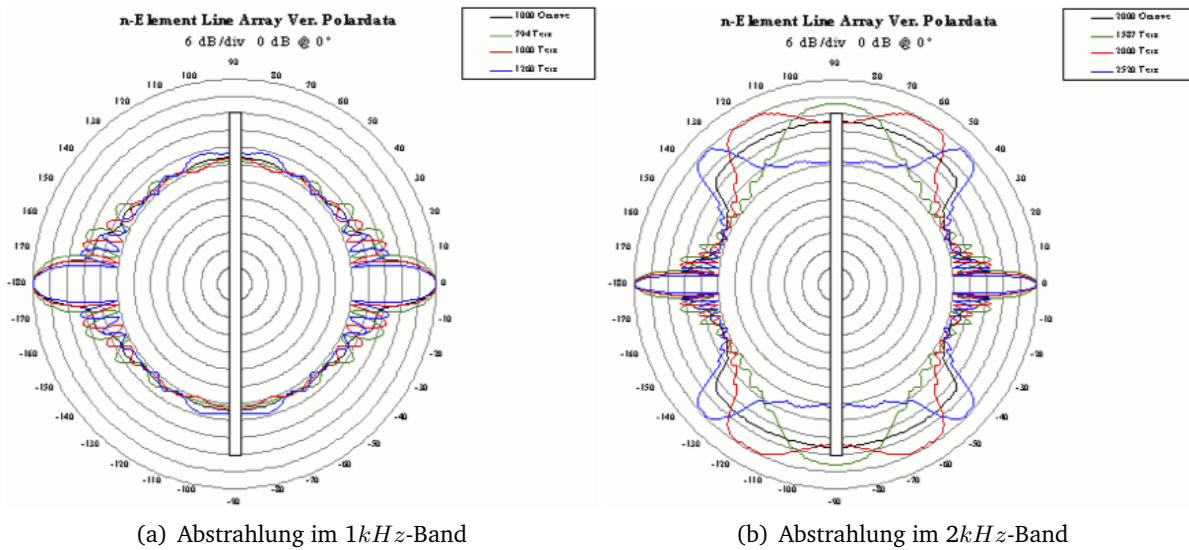


Abbildung 2.6: Vergleich von vertikaler Richtcharakteristik von 2 m langer Linienquelle ohne Waveguide.

Wie man also erkennt, ist dies für den Tief- und Mitteltonbereich kein Problem, da die Treiber so angeordnet werden können, dass ihr Abstand zueinander kleiner als die halbe Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz ist. So ist es in der Praxis üblich $8''$ -Treiber eng aneinander gereiht zu verbauen, um so Zylinderwellenabstrahlung bis ca. 1500 Hz zu ermöglichen. Will man aber ein System, das bis 16 kHz funktioniert, so kann diese Bedingung nicht mehr erfüllt werden. Insbesondere, wie schon zuvor erwähnt, für die obere Grenze von 16 kHz , bei welcher die Wellenlänge nur mehr 21 mm beträgt und die Treiber dadurch nur mehr 1 cm Abstand zueinander haben dürften, kann dieses Kriterium nicht erfüllt werden. [3]

Daher muss eine Lösung gefunden werden, um dem Line-Array „echten“ Zylinderwellencharakter zu geben. Dies erfolgt mit Hilfe sogenannter *Waveguides*. Durch diese Bauteile wird die sphärische Abstrahlung in eine kohärente Wellenfront überführt, wie in Abbildung 2.7 zu sehen ist.

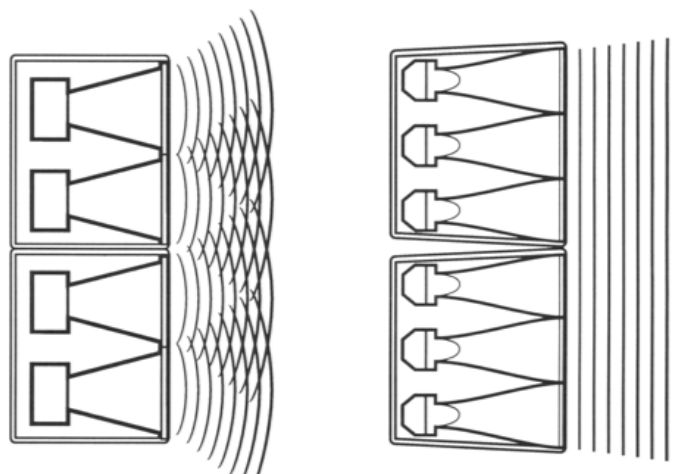


Abbildung 2.7: Vergleich von sphärischer (links) zu kohärenter Abstrahlung (rechts).

In Abbildung 2.8(b) ist nun schön zu sehen, dass durch den Einsatz von Waveguides zur

Bildung einer kohärenten Wellenfront die Nebenkeulen im 2000 Hz -Band bei einem Array mit 2 m Länge und 20 cm Treiberabstand verschwinden.

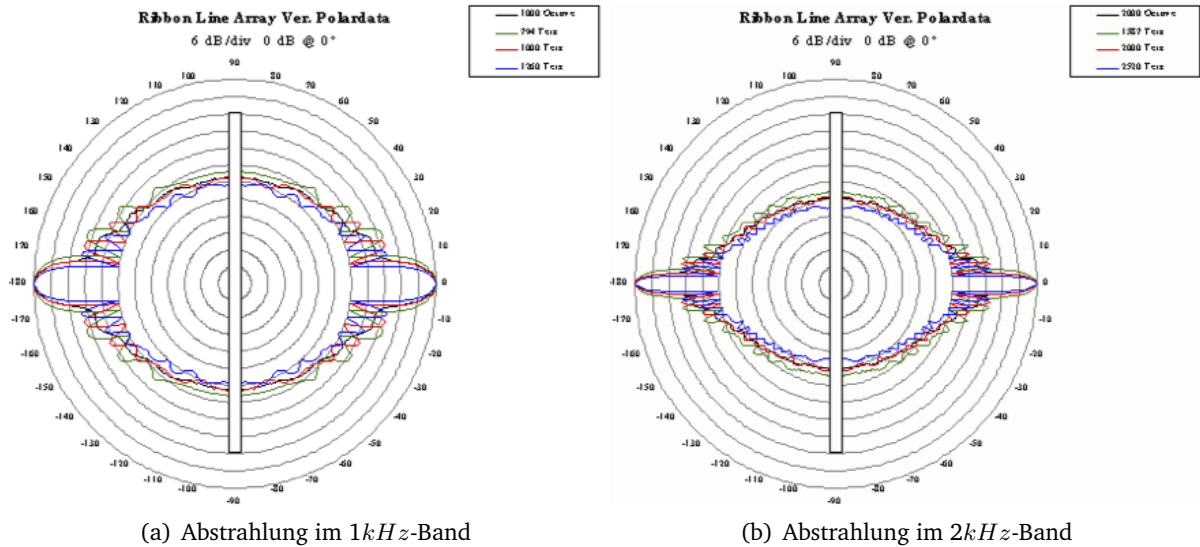


Abbildung 2.8: Vergleich von vertikaler Richtcharakteristik von 2 m langer Linienquelle mit Waveguide.

Waveguides werden von verschiedenen Herstellern nach unterschiedlichen Konzepten gefertigt. Im folgenden seien die wichtigsten Konzepte kurz erklärt.[3]

- **Koerzitive Waveguides:** Es wird durch die Verwendung eines konventionellen Kompressionstreibers mit einem sehr langen Horn und einer kleinen (im Vergleich zur Länge des Horns) schlitzenartigen Schallaustrittsöffnung ein geringer Laufzeitunterschied der Schallanteile erreicht. Dies ist die einfachste, aber nicht beste Lösung, da die Wellenfront nicht ganz kohärent ist. Die Phasendifferenz der gekrümmten Wellenfront darf nicht größer als $\lambda/4$ sein, um mit dem nächsten Waveguide darunter oder darüber noch kohärent zu koppeln.
- **Schallführung in Kanälen:** Bei dieser Variante des Waveguide wird der Schallfluss in vielen kleinen, von einander separierten Schallkanälen geführt. Betrieben wird dieser Waveguide auch von einem konventionellen Drucktreiber. Durch die Kanäle wird der Schall zu den Austrittsöffnungen geführt, wo er sphärisch austritt. Durch den geringen Abstand der Austrittsöffnungen weisen diese aber eine kohärente Kopplung und damit ein Zylinderwellenverhalten auf. Man könnte sagen, dass durch die separate Schallführung eine Schallquelle in viele kleine, fiktive Quellen aufgeteilt wird und dadurch die Grenzfrequenz für Zylinderwellenabstrahlung nach oben verschoben wird.



Abbildung 2.9: Hydra der Firma ElectroVoice.

- **DOSC:** Die französische Firma *L-Acoustic* hat ein Prinzip patentiert, das nach der *Wavefront Sculpture Technology (WST)* arbeitet. Dabei wird wiederum ein konventioneller Kompressionstreiber verwendet. Durch eine spezielle Schallführung werden alle Schallanteile kontinuierlich derart umgelenkt, dass sie aus der spiralförmigen Mündung phasengleich austreten, wie in Abbildung 2.10(a) zu sehen ist. Durch diesen Phasenplug weisen alle Pfade vom Treiberanschluss bis zur Austrittsöffnung eine konstante Länge auf.

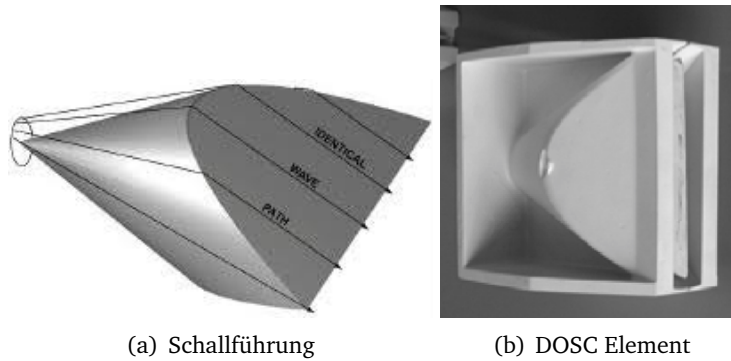


Abbildung 2.10: DOSC-Waveguide der Firma L-Acoustics.

- **Parabolische Reflexion:** Durch einen parabolisch geformten akustischen Spiegel wird der Schall, der vom Kompressionstreiber erzeugt wird, umgelenkt, wodurch alle Schallanteile die selbe Laufzeit erhalten und so phasengleich die Austrittsöffnung erreichen. In Abbildung 2.11 ist dieser Ansatz dargestellt. Dieses Konzept wurde von der Firma *NEXO* entwickelt. Auch elliptisch oder hyperbolisch geformte Spiegel werden als Waveguide verwendet.

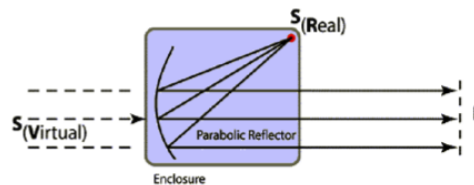


Abbildung 2.11: Prinzip des parabolischen Reflektors.

- **Bändchenhochtöner:** Dies ist zwar kein Waveguide, wie bei den ersten 4 Konzepten, dennoch sei dieses Prinzip hier angeführt. Eher bei Lautsprechern für kleinere Auditorien anzutreffen sind Bändchenhochtöner. Hierbei ist extrem massearmes Aluminiumbändchen zwischen zwei entgegengesetzt gepolten Magnetplatten gespannt. Die Funktionsweise ist dieselbe wie bei einem Tauchspulenwandler, allerdings mit dem Vorteil, dass hier Spule und Membran identisch sind. Das Bändchen schwingt im Betrieb isophasisch und erzeugt so eine zylindrische Abstrahlung. Auf Grund des sehr geringen Wirkungsgrades kommt dieses Konzept allerdings nur im Hochtonbereich und auch nur bei kleineren Lautsprechern zum Einsatz.

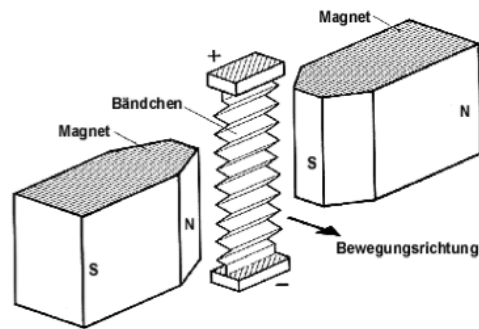


Abbildung 2.12: Funktionsweise eines Bändchenlautsprechers.

2.3.2 Abstrahlverhalten und Curving

Das horizontale Abstrahlverhalten eines Line Arrays ist prinzipiell nicht variabel und hängt nicht von der Anzahl der Elemente, also der Länge des Arrays ab. Typischerweise ist ein Abstrahlwinkel zwischen 70° und 120° , der auch für die verschiedenen Elemente des Arrays variiert werden kann. So kann für die Elemente, die auf den nahen Publikumsbereich ausgerichtet sind, ein weiter und für die Elemente, die auf den weit entfernten Publikumsbereich gerichtet sind, ein enger Abstrahlwinkel gewählt werden.

Nun, um das vertikale Abstrahlverhalten zu verstehen, müssen zwei Effekte besprochen werden: Wie bereits anhand von Gleichung 2.3 gezeigt, hängt der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld von der Frequenz und der Länge des Arrays ab. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Frequenz sich der Bereich des Nahfelds immer weiter ausdehnt. Durch die länger anhaltende Zylinderwellenausbreitung fällt der Pegel mit steigender Frequenz immer langsamer ab und daher wird das Frequenzspektrum bei einem geraden Array mit zunehmender Distanz immer höhenlastiger.

In 2.5 und 2.6 ist zu erkennen, dass der Öffnungswinkel mit zunehmender Frequenz immer kleiner wird. Dies bedeutet, dass außerhalb der vertikalen Abstrahlachse das Frequenzspektrum immer tieftonlastiger wird.

Beides sind unerwünschte Effekte einer Linienquelle und treten sowohl für die ideale Linienquelle endlicher Länge, als auch für gerade Line-Arrays auf.[3]

Man könnte dieses Problem lösen, indem man, wie es bei Zeilenlautsprechern üblich ist, die Pegel der äußeren Treiber mit zunehmender Frequenz senkt. Dies führt dazu, dass die wirksame Länge des Arrays im Hochtonbereich verkürzt wird. Durch Anpassung des Schalldrucks im Hochtonbereich an den maximalen im Tieftonbereich erreichbaren Schalldruck, wird das Problem so für die Hauptachse gelöst und das Frequenzspektrum bleibt über die gesamte Distanz ausgewogen.

Die Öffnungswinkel bleiben davon unbeeinflusst. Außerhalb der Hauptabstrahlachse bleibt der tieftonlastige Bereich bestehen. Durch die Aufteilung eines Line Arrays in einzelne Elemente, kann man beide Probleme auf einmal in den Griff bekommen.

Beim *Curving* werden die einzelnen Elemente zueinander gewinkelt und es entsteht dabei ein gekrümmtes Array, siehe Abbildung 2.13. Dadurch wird eine Aufweitung des vertikalen Abstrahlverhaltens im Mittel- und Hochtonbereich erreicht und man kann durch Curving des Arrays den vertikalen Abstrahlwinkel skalieren. Um dabei ein Aufreißen der Wellenfront zu vermeiden, sollten die einzelnen Elemente einen geringen Öffnungswinkel der vertikalen Abstrahlcharakteristik und einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen.

Durch das Curving wird die akustisch wirksame Länge des Arrays im Hochtonbereich verkürzt. Es ist, je nach Position des Hörers im Auditorium, immer nur ein Teil des Arrays im Hochtonbereich von Bedeutung, während im Tieftonbereich die gesamte Länge des Arrays akustisch



Abbildung 2.13: Curving eines Line-Arrays.

wirksam bleibt. Dadurch wird der Frequenzgang für weit entfernte Punkte im Auditorium ausgeglichen, indem der Übergang von Nah- zu Fernfeld für alle Frequenzen auf den selben Abstand zur Quelle gebracht werden.

Der von den unteren Elementen des Arrays, welche nun direkt auf den Nahbereich der Quelle gerichtet sind, erzeugte Hochtonanteil darf nun auf Grund der Nähe zum Publikum nicht reduziert werden, sondern muss zur Ausgleichung des übermäßigen Tieftonanteils in diesem Bereich verwendet werden. Dadurch kann der zweite unerwünschte Effekt einer endlichen Linienquelle kompensiert und ein linearer Frequenzgang für den gesamten Publikumsbereich erreicht werden.

Die Verwendung eines Line Arrays muss also sorgfältig geplant sein, um die vertikale Abstrahlcharakteristik und damit den linearen Frequenzgang des Systems in gewünschter Form zu erhalten. Die Kunst ist es, das Array so zu curven, dass es für jeden Frequenzbereich im gesamten Zuhörerraum mit einer anderen Länge wirkt, um so einen linearen Frequenzgang zu realisieren.

2.3.3 Array processing

Den physikalischen Schwierigkeiten eines Line-Arrays kann auch mittels Signalverarbeitung begegnet werden. Moderne Line Arrays, vor allem von Hersteller *d&b*, werden aus aktiven Modulen zusammengestellt. Jedes Element des Arrays ist dabei mittels Netzkabel verbunden. Durch die Eingabe der Raumgeometrie und der Position und Form des Arrays in die Kalkulationssoftware wird vom System für jedes Modul des Arrays mittels Ray-tracing eine spezielle Konfiguration errechnet. Durch FIR-, IIR-Filter und Anpassung der Verstärkerleistung wird so für 249 Frequenzbänder (bei *d&b*) der ideale Frequenzgang eingestellt. Die errechneten Daten werden anschließend in die Prozessoren der Module übertragen und das Array dadurch angepasst. Dadurch können auch raumakustische Effekte berücksichtigt werden. So kann z.B. die Luftabsorption von hohen Frequenzen für weit entfernte Positionen kompensiert werden. [9]

3

Einsatzbereiche, Beschallungskonzepte und äußere Einflüsse

Nachdem nun die Funktionsweise der Beschallungskonzepte erklärt wurde, soll nun auf die Einsatzmöglichkeiten eingegangen werden. Dazu werden im folgenden Kapitel einige Herangehensweisen erläutert und es wird versucht, Vor- und Nachteile zu erkennen. Außerdem werden äußere Einflüsse besprochen, die bei der Auswahl der Beschallungsanlage unbedingt berücksichtigt werden müssen.

3.1 Beschallung im Bassbereich

Dem Bassbereich sollte bei der Planung immer besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da er sich in vielerlei Hinsicht anders als der Mitten- und Hochtonbereich verhält. Wie schon in den Kapiteln zuvor beschrieben, ist die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von der Frequenz abhängig. Im tieffrequenten Bereich breitet sich Schall kugelförmig aus, da er aufgrund der langen Wellenlänge um Ecken und Kanten herum gebeugt wird. Ein Subwoofer strahlt daher sowohl nach vorne als auch nach hinten die gleiche Leistung ab.

Die Positionierung eines Subwoofer kann daher seine Abstrahlcharakteristik stark beeinflussen. Stellt man einen Subwoofer im Freifeld auf, so wird er rundum den gleichen Schalldruck emittieren. Bei der Positionierung an einer Wand wird die nach hinten abgestrahlte Energie von der Wand reflektiert. Durch den geringen Laufzeitunterschied und die lange Wellenlänge ergeben sich positive Interferenzen und damit ein Plus von 3 *dB*. In einer Ecke verdoppelt sich dieser Effekt noch einmal und es entsteht ein Plus von 6 *dB*.

Des Weiteren beeinflussen sich zwei Subwoofer gegenseitig stark, da es zu mehr oder weniger markanten Auslöschungen im Raum kommen kann, je nachdem, wie diese zueinander positioniert sind.

Subwoofer kommen dann zum Einsatz, wenn im zu verstärkenden Signal viel akustische Information im untersten Frequenzbereich, also zumeist zwischen 30 und 100 *Hz*, vorhanden ist. Bei einer reinen Sprachbeschallung, wie sie in Kirchen oder bei Konferenzen zu finden ist, sind Subwoofer nicht notwendig, eventuell sogar störend. Diese tiefen Frequenzen werden bei Sprache zumeist ohnehin mittels Low-Cut-Filter aus dem Signal gefiltert, da sie zu einem Brummen oder unerwünschten Störgeräuschen führen können, welche die Sprachverständlichkeit negativ beeinflussen. Bei der Wiedergabe von Musik aber kommen Subwoofer oft in großer Zahl zum Einsatz. Die große Anzahl ist notwendig, da unser Gehör unterschiedlich empfindlich ist. Bei 1000 *Hz* weist es die höchste Empfindlichkeit auf, ehe es zu den Tiefen hin abnimmt. Um diesen Effekt auszugleichen muss also weitaus mehr Energie im tieffrequenten Bereich eingebracht werden, als in den hohen Mitten.

Subwoofer sind immer Punktschallquellen und kommen sowohl bei der Beschallung mittels Punktschallquelle, als auch mittels Line-Array zum Einsatz. Da sie aber in beiden Fällen den gleichen Gesetzen unterliegen, werden sie in den anschließenden Vergleich nicht mit einbezogen. Dennoch seien einige Methoden der Beschallung im tieffrequenten Bereich angeführt.

3.1.1 Links, Rechts und Center

Die wohl am weitest verbreitete Aufstellung von Bassboxen ist ein oder mehrere Boxen sowohl links als auch rechts der Bühne. Diese Konfiguration funktioniert im Nahbereich der einzelnen Lautsprecherpositionen auch sehr gut. In gewissen Bereichen jedoch überlagern sich die Wellen und es kommt zu Auslöschungen im Raum, wie in Abbildung 3.1 durch die blauen Bereiche niedrigen Schalldrucks zu sehen ist. Je nach Distanz zwischen den beiden Lautsprechern können die Basslöcher im Raum größer oder kleiner ausfallen.

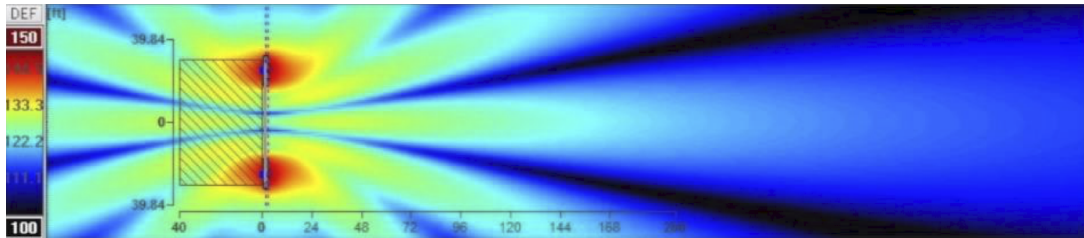


Abbildung 3.1: Links-Rechts-Aufstellung von Subwoofern.

Durch die Verwendung einer dritten Position in der Mitte der Bühne, dem Center, kann das Beschallungsmuster verbessert werden. Im Nahbereich der Bühne sind nun weniger blaue Bereiche niedrigen Schalldrucks zu erkennen (Abbildung 3.2). Jedoch bleibt die Beschallung sehr lückenhaft und es gibt immer wieder Bereiche mit schlechter Abdeckung.

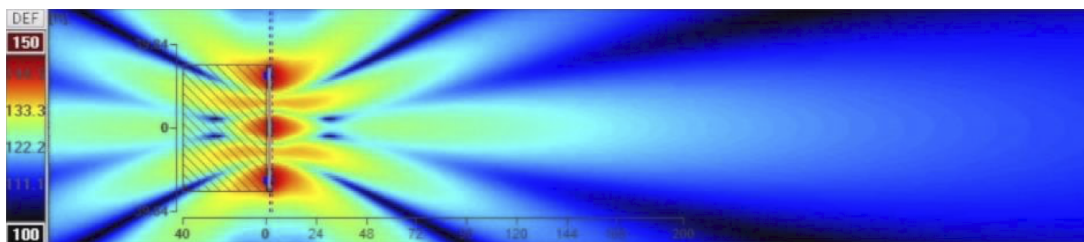


Abbildung 3.2: Links-Center-Rechts-Aufstellung von Subwoofern.

Schiebt man nun alle Lautsprecher in der Mitte der Bühne zusammen, so entsteht eine Abstrahlcharakteristik, die mit zunehmender Entfernung vom Ursprung abnimmt. Die Bildung von störenden Nebenkeulen bzw. Löchern bleibt aus (Abbildung 3.3). Das Maximum dieser Aufstellung befindet sich aber nun in einem sehr kleinen Bereich und wird daher zu keiner sehr homogenen Beschallung führen.

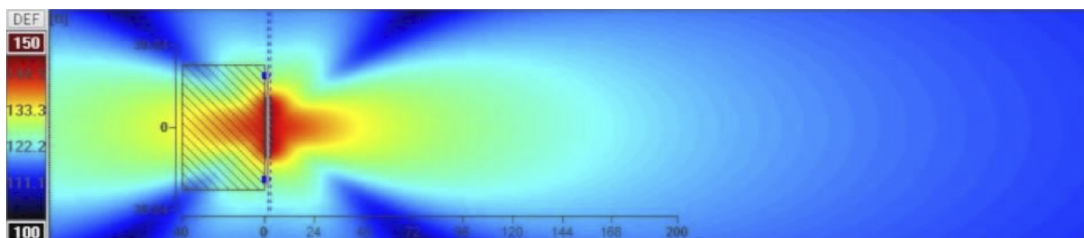


Abbildung 3.3: Center-Aufstellung von Subwoofern.

Stellt man nun die einzelnen Lautsprecher in einem bestimmten Abstand zueinander in einer Linie auf, kann das Maximum der Schallabstrahlung verbreitert werden, siehe Abbildung 3.4. Nun muss dieser Abstand natürlich kleiner der halben Wellenlänge der höchsten abgestrahlten Frequenz sein, damit es zu positiven Interferenzen kommt. Durch die angeführte Trennfrequenz kann also der größtmögliche Abstand berechnet werden.

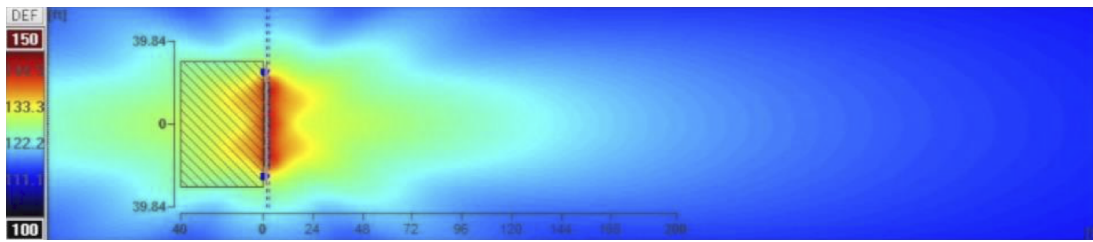


Abbildung 3.4: Linien-Aufstellung von Subwoofern.

Bei der Linienaufstellung tritt aber das Problem auf, dass mit zunehmender Distanz zwischen den Elementen der Linie natürlich auch ungewünschte Interferenzen auftreten. Um diesen zu begegnen kann das Signal der einzelnen Lautsprecher und damit der Ausspielzeitpunkt verzögert werden. Es wird ein Nullpunkt gewählt, meist in der Mitte der Bühne, und von diesem aus auf beide Seiten hin der Ausspielzeitpunkt der einzelnen Lautsprecher immer weiter verzögert. Dies kann aber zu einer Verschlechterung der Impulstreue des Systems führen. Man kann diesem Problem auch physikalisch begegnen indem die Lautsprecher nach außen hin immer weiter nach hinten positioniert werden, um so die Laufzeit auszugleichen.

3.1.2 Cardioid and Beamforming

Bei den zuvor besprochenen Konfigurationen gilt wie gesagt immer, dass sowohl nach vorne, als auch nach hinten, die selbe Energie emittiert wird. Dies kann dazu führen, dass der Bass auf der Bühne zu einem Problem wird, speziell wenn mehrere Mikrofone auf der Bühne verwendet werden. Daher wird versucht der Bassverstärkung eine Richtwirkung zu geben und so den Pegel auf der Bühne zu verringern, auch Beamforming genannt. [11]

Zumeist geschieht dies, durch die Auslöschung der Energie, die nach hinten abgestrahlt wird. Dazu werden 2, 3 oder mehr Lautsprecher zusammen gestellt, wobei einer davon umgedreht, also entgegen der Abstrahlrichtung aufgestellt wird. Dieser Lautsprecher wird zeitlich verzögert und seine Phase invertiert. Dadurch findet eine Auslöschung der Wellen statt. Dies verursacht eine Reduktion um 10-15 dB im Bereich hinter den Boxen, wie in Abbildung 3.5 zu sehen.

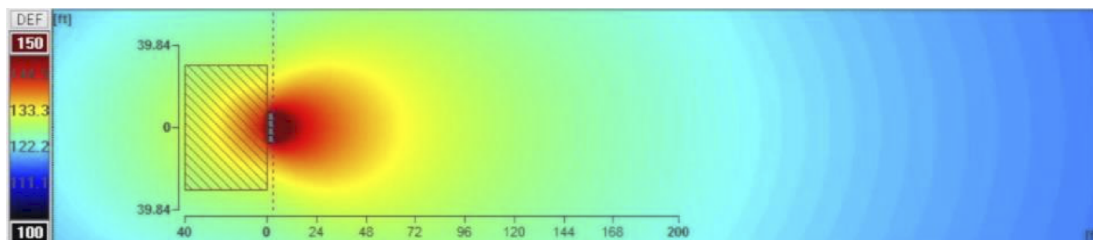


Abbildung 3.5: Cardioid-Aufstellung von Subwoofern.

Auch sogenannte Endfire-Arrays verringern den Pegel nach hinten, sogar bis zu 30 dB . Für diese Konfiguration, die ursprünglich aus der Antennentechnik stammt, werden Bässe hintereinander aufgestellt und alle auf den hintersten Lautsprecher verzögert. Dadurch wird eine engere Abstrahlung und je nach Konfiguration, eine Reduktion um des Pegels nach hinten um bis zu 30 dB erreicht.

Viele Hersteller versuchen Beamforming bei ihren Subwoofern zu realisieren, damit auch ein einzelner Lautsprecher schon eine Richtwirkung aufweist. Hier wäre z.B. die Firma *Lambda Labs* anzuführen, die dies mit ihrem *DH-18* erreicht.

3.2 Mitten und- Hochtonbereich

Nachdem die Möglichkeiten zur Beschallung im tieffrequenten Bereich besprochen wurde, geht es nun darum, auch für den Mitten- und Hochtonbereich verschiedene Konzepte und Effekte, auf welche geachtet werden sollte, zu besprechen. Dabei wird sowohl auf die Verwendung von Punktschallquellen als auch von Line Arrays eingegangen.

Dabei muss natürlich unterschieden werden, in welcher Umgebung eine Beschallung realisiert werden soll. Vor allem zwischen Indoor und Outdoor muss klar unterschieden werden, da im Open-Air Bereich, durch den Wegfall der Raumakustik, andere Eigenschaften zählen als in geschlossenen Räumen. Zu Beginn werden also Konzepte besprochen, die sowohl drinnen als auch draußen zur Verwendung kommen, ehe zwischen diesen beiden differenziert wird und die spezifischen Eigenschaften erläutert werden.

3.2.1 Im Nahbereich der Bühne

Bei kleinen Veranstaltungen ist es nahezu immer der Fall, dass es zu einer Stereo-Beschallung kommt, also der Aufstellung von einer oder mehrerer Lautsprecher jeweils links und rechts der Bühne. Ergänzt durch Subwoofer, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, ergibt sich so, die wohl häufigste und gängigste Beschallungsmethode überhaupt.

Nimmt die Breite der Bühne zu, so entsteht ein „Loch“ mittig vor der Bühne, in welchem die Abdeckung sehr schlecht ist. Diesem wird oftmals mittels einer oder mehrerer Boxen mittig über der Bühne entgegengewirkt. Diese sollte in etwa auf gleicher Höhe wie die Haupt-PA^a angebracht sein. Ist dies nicht möglich, da z.B. die Bühne zu hoch ist, dann werden oftmals sogenannte „Midfills“ verwendet. Diese werden an der vorderen Bühnenkante aufgestellt und versorgen die ersten Reihen des Publikums. Auch „Downfills“ kommen zum Einsatz um die nahen Besucherreihen abzudecken. Die Abbildung 3.6 zeigt, wie diese genau wirken sollen.

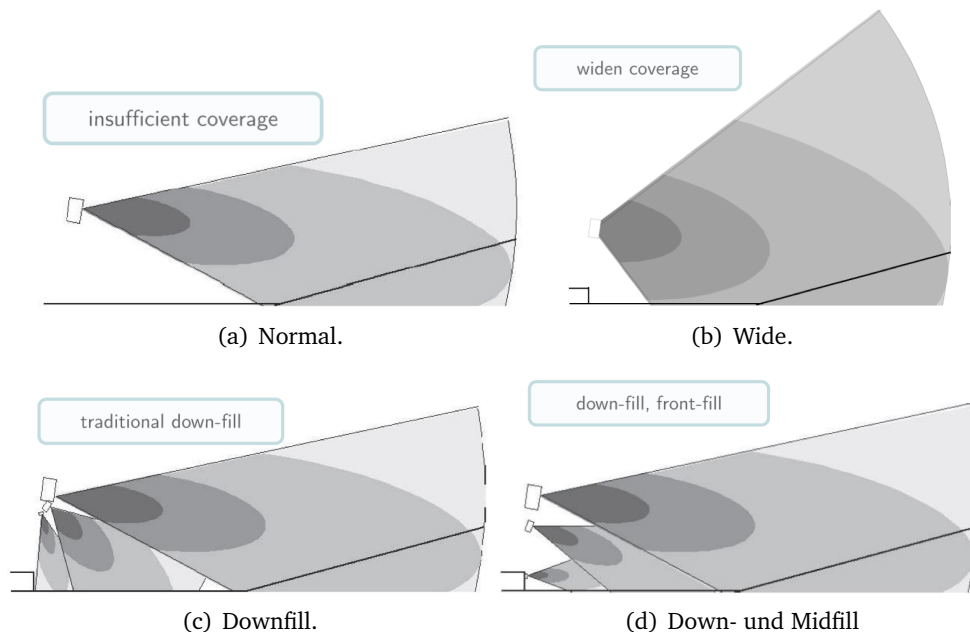


Abbildung 3.6: Die verschiedenen Möglichkeiten der Verwendung von Fills.

In Abbildung 3.6 wird nur die vertikale Abstrahlcharakteristik dargestellt. Natürlich aber werden abhängig von der Breite der Bühne bzw. dem Abstand zwischen linker und rechter PA meh-

^a PA steht für *Public Address* oder *Power Amplifier* und bedeutet Beschallungsanlage.

rere z.B. Midfills verwendet, um auch horizontal eine lückenlose Beschallung zu realisieren. Midfills und Downfills kommen vor allem bei großen Line-Array Systemen zum Einsatz, während die Center-Lösung eher bei Systemen aus Punktschallquellen eingesetzt wird.

Oftmals muss ein großer Öffnungswinkel, von der Bühne aus gesehen, beschallt werden, da das Publikum auch noch weit rechts bzw. links außen steht oder sitzt. Um diesen großen Winkel realisieren zu können, werden oft „Outfills“ leicht hinter der Main-PA etwas weiter außen positioniert, wie in Abbildung 3.7 zu sehen.



Abbildung 3.7: Links die Main-PA und rechts das Outfill.

3.2.2 Delaylines

Bei langen Räumen oder großen Distanzen kommen Delaylines zum Einsatz. Es werden dazu in einem gewissen Abstand zur Haupt-PA vor der Bühne Lautsprecher aufgestellt, um das Signal „aufzufrischen“. Dabei sind zwei Dinge zu beachten:

- **Laufzeitkorrektur:** Da der Schall eine gewisse Zeit braucht, um sich von der Bühne bis zum Delaypunkt auszubreiten, muss das Signal des Delaylautsprechers so verzögert werden, dass dieser erst in dem Moment ausspielt, wenn der Direktschall von der Bühne den Punkt der Delayposition erreicht. Wird diese Laufzeit nicht berücksichtigt wirkt eine Delayline eher negativ, da sich wiederum negative Interferenzen ergeben können, die im weiter von der Bühne entfernten Publikumsbereich zu unerwünschten Ergebnissen führen können.
- **Pegelanpassung:** Der Pegel der Delayline sollte nur so laut sein, dass der Zuhörer dennoch das Gefühl hat, dass der Schall von der Bühne kommt und nicht aus einem Lautsprecher der Delayline. Die Delayline, darf das Signal also nur „auffrischen“, nicht aber eine höhere Verstärkung als die Haupt-PA bieten.

Das Konzept der Delayline kann theoretisch unendlich verlängert werden. Es können also immer weiter von der Bühne entfernte Delaylines aufgestellt werden. Auch der horizontale Beschallungswinkel kann so vergrößert werden indem z.B. mehrere Delaylines auf einer Kreisbahn in einem gewissen Abstand zur Bühne plaziert werden. In Abbildung 3.8 wird dies skizziert.

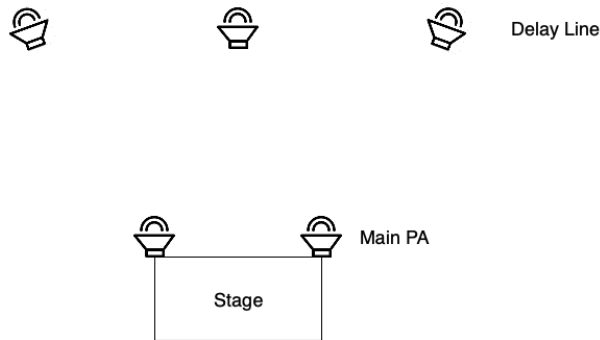


Abbildung 3.8: Skizze einer Delayline.

3.2.3 Einfluss der Raumakustik

In allen geschlossenen Räumen muss bei der Positionierung der Beschallung vorab genau auf die raumakustischen Eigenschaften eingegangen werden. Umso länger die Nachhallzeit des Raumes wird, umso schwieriger wird die Planung. Es sollte darauf geachtet werden, Reflexionen zu vermeiden, da diese das Hörerlebnis negativ beeinflussen. Daher sollte die Aufstellung der Lautsprecher so gewählt werden, dass möglichst wenige Reflexionen entstehen und die Quelle möglichst direkt auf die Zuhörer gerichtet ist. Abbildung 3.9 veranschaulicht dies.



(a) Abstrahlverhalten bei gerader Aufstellung.

(b) Verminderung von frühen Reflexionen durch leichte Winkelung der Box.

Abbildung 3.9: Vergleich von PA-Aufstellungen.

Natürlich ist dabei auch das vertikale wie auch horizontale Abstrahlverhalten des Lautsprechers entscheidend.

3.2.4 Klimatische Einflüsse

Das Klima beeinflusst vor allem eine Beschallung im Open-Air Bereich. Kalte oder warme Luftströme einer Lüftungsanlage bzw. warme Luft, verursacht durch das Publikum, sind nicht zu vernachlässigen. Sie können die Beschallung auch in geschlossenen Räumen negativ beeinflussen.

Im Open-Air Bereich spielen Temperaturunterschiede eine wesentlich größere Rolle. Unterschiedliche Temperaturschichten weisen unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten auf. Dadurch kommt es zu unterschiedlichen Brechungen der Schallwellen. Je höher die Temperatur, desto höher auch die Schallgeschwindigkeit. In der Atmosphäre wird der Schall immer in Richtung der Region mit niedrigerer Schallgeschwindigkeit gebrochen. Steigt also die Temperatur mit der Höhe an, so wird der Schall eher zur Erdoberfläche hin gebrochen. Mit abnehmender Temperatur in höheren Lagen verhält sich dies umgekehrt. [18]

Außerdem beeinflusst die Luftfeuchtigkeit sowohl in geschlossenen Räumen als auch im Freien das Verhalten der Schallabstrahlung. Höhere Luftfeuchtigkeit bedeutet geringere Dämpfung

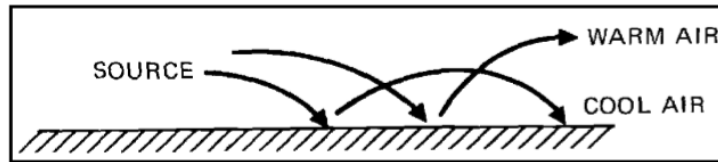


Abbildung 3.10: Einfluss der Temperatur.

der hohen Frequenzen (siehe Abbildung 3.11).

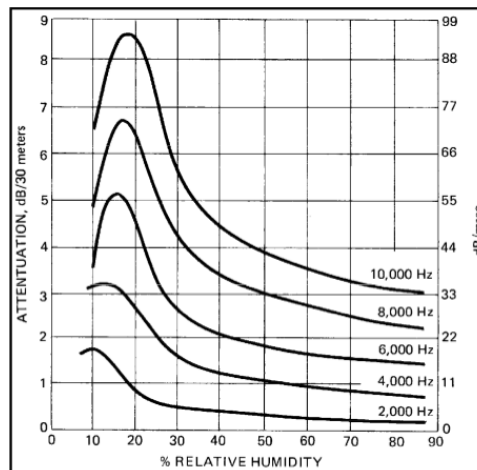


Abbildung 3.11: Einfluss der Luftfeuchtigkeit.

Der Wind spielt vor allem im Freien eine große Rolle. Er kann, sofern er aus oder gegen die Beschallungsrichtung bläst, die Schallgeschwindigkeit verändern und so die Brechung der Schallwellen beeinflussen. Seitenwinde können den Schall nach links oder rechts ablenken. In Abbildung 3.12 ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeit die Brechung stark beeinflussen kann. Nimmt die Stärke des Windes mit der Höhe zu, so steigt wie auch bei der Temperatur die Schallgeschwindigkeit an. Dadurch wird der Schall nach unten zum Boden hin gebrochen. Geringere Reichweiten der Beschallung sind die Folge.

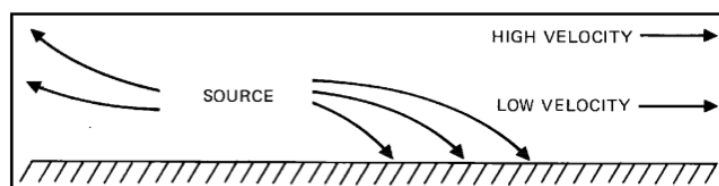


Abbildung 3.12: Einfluss des Windes.

3.2.5 Pros and cons

Punktschallquellen eignen sich bestens zum Einsatz in kleinen Räumen oder Räumen mit geringer Höhe. Durch ihr Abstrahlverhalten können sie im Nahbereich der Bühne zu einem guten Beschallungsergebnis führen. Ihr horizontaler als auch vertikaler Abstrahlwinkel kann zumeist gewählt werden, sodass er bestmöglich für die jeweilige Situation angepasst werden kann. Individuelle Möglichkeiten der Aufstellung bieten eine hohe Flexibilität in der Konfiguration. Durch die Verwendung von Midfills und gegebenenfalls auch Delaylines kann der Wirkungsbereich

recht einfach erweitert werden. So kann mit einigen wenigen Lautsprechern und einer überlegten Aufstellung dieser im Raum, in vielen Fällen ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden.

Jedoch haben Punktschallquellen den Nachteil, dass sie sich nur schwer zu einem Cluster verbinden lassen, um so den Schalldruck zu erhöhen. Um ein Cluster ohne große Auslöschungen realisieren zu wollen, bedarf es spezieller Punktstrahler, die dafür vorgesehen sind. Der Bau mehrerer Delaylines gestaltet sich schnell als sehr komplex und zeitaufwendig, da die große Zahl an Lautsprechern im Raum mit Signalen versorgt werden muss. Auch die Signalaufbereitung gestaltet sich äußerst schwierig, da viele Kanäle gebraucht werden, um die verschiedenen Delayzeiten realisieren zu können. Daher werden Punktschallquellen für große Beschallungsaufgaben schnell unpraktikabel.

In großen Sälen und Hallen erreichen Line Arrays eine deutlich bessere Abdeckung. Durch den geringen Verlust bei zunehmender Entfernung, kann oftmals auf eine Delayline verzichtet werden. Durch die Möglichkeit die horizontale Abstrahlcharakteristik der einzelnen Module des Arrays zu variieren, kann im Nahbereich ein breiter Öffnungswinkel und für weiter entfernte Bereiche ein immer schmalerer Abstrahlwinkel gewählt werden. Dadurch werden störende Reflexionen besser vermieden. Jedes Array setzt sich dabei aus mehreren Lautsprechern zusammen, was zu einem höheren Materialaufwand führt. Die Boxen werden aber alle am selben Ort gehängt und auch die Signalaufbereitung gestaltet sich einfacher. In Kombination mit den Linienstrahlereigenschaften und der damit verbesserten Reichweite, bekommt ein Line Array oft den Vorzug gegenüber einem System aus Punktschallquellen.

Line Arrays erfordern eine gewisse Raumhöhe, um auch richtig von der Decke geflogen^b werden zu können. Auch die Einbringung der Last in die Decke muss möglich sein, denn nicht jedes Gebäude kann diese Last auch aufnehmen. Gestackte, also am Boden aufgestellte Line Arrays erreichen meist nicht die gewünschte Wirkung, da das gewünschte Curving nur schwer realisierbar ist. Ein Line Array erfordert eine Menge an Know How. Natürlich können auch bei der Aufstellung von Punktschallquellen gravierende Fehler gemacht werden, im Normalfall aber, sind diese recht einfach aufzubauen und zu bedienen. Bei Line Arrays gestaltet sich dies komplexer, da bei der Aufstellung eines solchen Systems weitaus mehr Dinge beachtet und kalkuliert werden müssen. Eine entsprechende Vorkenntnis ist notwendig, um ein gut funktionierendes Array zu konzipieren und anschließend auch zu realisieren.

Letztlich spielt auch der Kostenfaktor bei der Anschaffung eine wichtige Rolle. Dabei ist zu anzumerken, dass ein Line Array System mit dem notwendigen Zubehör deutlich teurer ist, als ein System aus Punktschallquellen. Oftmals wird die Frage welches System angeschafft wird, gerade bei Festinstallationen, vom zur Verfügung stehenden Budget entschieden.

^b Als *Fliegen* bezeichnet man das aufhängen eines Line Arrays an mechanischen oder elektrischen Kettenzügen an der Raumdecke.

4

Simulierte, praxisbezogene Beispiele

Die in Kapitel 3 besprochenen Einsatzbereiche und Beschallungskonzepte werden im folgenden Kapitel durch Simulationen überprüft.

4.1 Verwendete Software

4.1.1 EASE

Bei der Simulation der Räume und der elektroakustischen Beschallung kam die Software *EASE* zum Einsatz. Die Bezeichnung *EASE* ist ein Akronym und steht für Enhanced Acoustic Simulator for Engineers. Die Software wurde in den letzten Jahrzehnten zum Standard für die Planung elektroakustischer Anlagen. Die meisten Hersteller von Lautsprechern bieten auf ihrer Homepage die Daten ihrer Systeme für die Planung in *EASE* zum Download an. In diesem Download sind die Polardaten der Lautsprecher enthalten, auf deren Basis die Kalkulation der Beschallung erfolgen kann. [14]

Um einen Raum simulieren zu können, wird dessen Geometrie importiert (CAD-Plan, Sketch-Up Zeichnung, etc.) oder direkt in der Software konstruiert. Anschließend muss für jede Wand der Absorptionsgrad eingegeben werden. Um das Modell zu vervollständigen werden noch die Flächen, welche vom Publikum eingenommen werden, definiert. Das Programm wertet in der späteren Simulation dann die Eigenschaften des Raumes für diese Flächen aus. Zu guter Letzt können dann die verschiedenen Beschallungssysteme in das Modell eingefügt und im Raum positioniert werden.



Abbildung 4.1: Software EASE.

Durchgeführt werden die Simulationen mit *AURA Mapping*, welches in *EASE* implementiert ist. *AURA* steht für „Analysis Utility for Room Acoustics“ und basiert auf den „CAESAR-Algorithmen“ der Universität Aachen. Verwendet werden nicht die Standardeinstellung, sondern eine Einstellung mit verbesserter Auflösung (Intermediate Resolution) und Länge (Long). Es wird auch ein Scattering Factor von 20 % berücksichtigt, sofern beim verwendet Material keine anderen Daten dafür gespeichert sind.

Für alle Räume gleichbleibend ist der gedachte Störgeräuschpegel von 40 dB.

4.1.2 Array Calc

Außerdem kam die Planungssoftware für Beschallungsanlagen der Firma *d&b* namens *ArrayCalc* in Version 10 zum Einsatz. Damit werden Line Array Systeme geplant und für den jeweiligen Raum bzw. Open Air ideal angepasst. Die Daten, die mit Hilfe der Software kalkuliert wurden, werden direkt in *EASE* eingegeben, ohne weitere Schritte durchführen zu müssen. Neigungswinkel, Pegel und viele weitere Parameter können so einfach und schnell kalkuliert werden. [21]

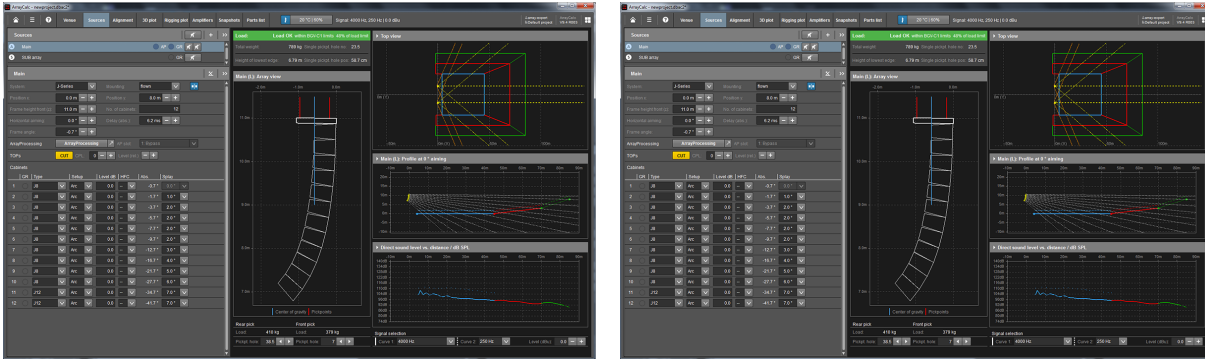


Abbildung 4.2: Oberfläche des *d&b ArrayCalc*.

Die Software bietet auch die Möglichkeit Array Processing in den Berechnungsvorgang zu implementieren. Die Software errechnet dabei verschiedene FIR- und IIR- Filter um den Frequenzgang des Systems zu glätten. Dabei wird für jede einzelne Box ein Setting gefunden, dass zum bestmöglichen Ergebnis führt. Dieser Prozess ist jedoch sehr undurchschaubar und das Firmengeheimnis eines jeden Herstellers. Aus diesem Grund wird das Array Processing nicht verwendet.

4.2 PA

Am Markt gibt es unzählige verschiedene Anbieter und Produkte, die für die Verwendung bei dieser Simulation in Frage kämen. Dennoch sind es im Kern immer die selben physikalischen Eigenschaften, die der Funktionsweise zu Grunde liegen. Auf dieser Basis wurde die Entscheidung, welche Lautsprecher zu Einsatz kommen sollten, eher pragmatisch als nach einer genauen Analyse der verschiedenen Produkte getroffen.

Wichtig ist auch zu erwähnen, dass die Pegel der Systeme immer so weit reduziert wurden, dass der maximale Schalldruck von 100 dB nicht überschritten wird. Zumeist darf dieser Schallpegel bei Konzerten nur kurzzeitig erreicht werden, während der mittlere Schallpegel über eine gewisse Zeit geringer sein muss. Um die Ergebnisse leichter vergleichen zu können, wurde versucht immer 100 dB als Maximum zu erreichen.

Die Wahl fiel auf Produkte der Firma *d&b*. Diese pflegt eine Kooperation mit *EASE* und daher sind alle Lautsprecher-Daten in *EASE* vorhanden. Prinzipiell ist es so, dass es von jedem Lautsprecher von *d&b* 2 Varianten gibt: eine mit enger horizontaler und eine mit weiter horizontaler Abstrahlung. [15]

4.2.1 Punktschallquelle

Als Punktschallquelle für die Simulationen werden Lautsprecher der *d&b V-Serie* verwendet. Diese Serie bietet 3-Weg-Boxen, die aus 2 $10''$ -Tieftönern, einem $8''$ -Mitteltontreiber und einem

1,4"-Hochton-Kompressionstreiber bestehen. Es gibt zwei verschiedene Modelle, die zum Einsatz kommen, die sich nur in der Abstrahlcharakteristik unterscheiden. Der *V7P* bietet einen horizontalen Abstrahlwinkel von 75° und einen vertikalen von 40° . Beim *V10P* beträgt der horizontale Winkel 110° , der vertikale ebenfalls 40° . Der Lautsprecher kann sowohl hochkant, als auch liegend betrieben werden. Zu diesem Zweck kann das Horn um 90° verdreht werden.[19]

V7P bzw. V10P	
Frequenzgang	59 Hz - 18 kHz
Maximaler Schalldruck	140 dB
Konfiguration	Passiver 3-Wege Hochleistungs-Punktquellenlautsprecher
Nennimpedanz	8 Ω
Belastbarkeit (RMS/peak 10 ms)	500/2000 W
Nennabstrahlwinkel (h x v)	V7P: 75° x 40° , V10P: 110° x 40°
Bestückung	2 x 10"-Tieftontreiber mit Neodym-Magnet
	1 x 8"-Mitteltontreiber mit Neodym-Magnet
	1 x 1,4"-Kompressionstreiber
	Passive Frequenzweiche
Maße (H x B x T)	700 x 308 x 466 mm
Gewicht	33 kg

Tabelle 4.1: Kennwerte der Punktschallquellen der d&b V-Serie



Abbildung 4.3: Ein d&b V7P-Lautsprecher.

4.2.2 Line-Array

Wie ganz zu Beginn der Arbeit bereits erwähnt, werden Line-Arrays in verschiedenen Größen angeboten. Deshalb werden bei den Simulationen auch 2 verschiedene Systeme verwendet. In Räumen, also im indoor Bereich, kommen die Line Array Lautsprecher der *d&b V-Serie* zum Einsatz. Die *V-Serie* bietet ein kompaktes Line Array, dessen Module mit 34 kg noch recht leicht zu fliegen sind. Da die einzelnen Lautsprecher den Punktstrahlern der *V-Serie* sehr ähnlich sind, können die Systeme auch gut verglichen werden. [19]

V8 bzw. V12	
Frequenzgang	67 Hz - 18 kHz
Maximaler Schalldruck	142 dB
Konfiguration	Passiver 3-Wege Hochleistungs-Line-Array-Lautsprecher
Nennimpedanz	8 Ω
Belastbarkeit (RMS/peak 10 ms)	500/2000 W
Nennabstrahlwinkel (horizontal)	V8: 80°, V12: 120°
Öffnungswinkel	0° - 14° (in 1° Schritten)
Bestückung	2 x 10"-Tieftontreiber mit Neodym-Magnet
	1 x 8"-Mitteltontriebter mit Neodym-Magnet
	2 x 1,4"-Kompressionstreiber
	Passive Frequenzweiche
Maße (H x B x T)	310 x 700 x 460 mm
Gewicht	34 kg

Tabelle 4.2: Kennwerte der Lautsprecher des Line-Arrays der d&b V-Serie



Abbildung 4.4: Ein Line Array bestehend aus 4 d&b V8-Lautsprechern

Für die Beschallung im open-air Bereich und in großen Hallen werden weit größere Systeme verwendet, wie die *d&b SL-Serie*. Ein Lautsprecher dieser Serie wiegt bereits 80 kg und hat mit einem maximalen Schalldruck von 150 dB nochmal 10 dB mehr an Leistung, als der Lautsprecher der *V-Serie*. [20]

Wie in Tabelle 4.3 ersichtlich, besitzen *GSL8* und *GSL12* 2 Tieftontreiber vorne und 2 weitere an den Seiten. Die beiden seitlichen Treiber koppeln nach vorne und schaffen so einen größeren Headroom^c im Tieftonbereich. Nach hinten löschen sich die Wellen aus und der Störpegel hinter dem System wird reduziert. [22]

^c Headroom: deutsch Aussteuerungsreserve, beschreibt den Bereich zwischen Nennpegel und maximalen Pegel. Umso größer der Headroom, desto mehr Leistungsreserve hat das System

GSL8 bzw. GSL12	
Frequenzgang	45 Hz - 18 kHz
Maximaler Schalldruck	150 dB
Konfiguration	Großformatiger 3-Wege Line-Array-Lautsprecher
Nennimpedanz	4 /Ω
Belastbarkeit (RMS/peak 10 ms)	800/3200 W
Nennabstrahlwinkel (horizontal)	GSL8: 80°, GSL12: 120°
Öffnungswinkel	0° - 7° (in 1° Schritten)
Bestückung	2 x 14Tieftontreiber Front
	2 x 10Tieftontreiber Seite
	1 x 10Mittelontreiber
	3 x 1.4"Kompressionstreiber mit 3.4Schwingspule
	passive Frequenzweiche
Maße (H x B x T)	391 x 1300 x 627 mm
Gewicht	80 kg

Tabelle 4.3: Kennwerte der Lautsprecher des Line-Arrays der d&b SL-Serie

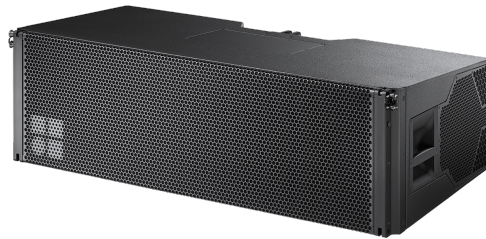


Abbildung 4.5: Ein d&b GSL8-Lautsprecher.

Zusätzlich besitzen die Line Arrays von d&b gewisse Konfigurations- und Eistellungsmöglichkeiten, um die Performance zu verbessern: [23]

- **ARC bzw. LINE Modul:** Es gibt von jedem Lautsprecher zwei verschiedene Konfigurationen - ARC oder LINE Ausführung. Je nach dem wie stark das Curving des Arrays ist, wird eine ARC- oder LINE-Box verwendet. Bleibt der Zwischenwinkel^d zwischen 3 oder mehr Modulen des Arrays kleiner als 2°, dann werden LINE-Module verwendet. Ist das Array stärker gekrümmt, so kommen ARC-Module zum Einsatz. Beide Arten können in einem Array vorkommen. Die LINE-Konfiguration wird vorrangig in Bereichen, die auf weit entfernte Zuhörerbereiche gerichtet sind, verwendet. Der Unterschied zwischen den beiden Setups besteht darin, dass der Mittel- und Hochtonbereich bei den LINE-Elementen reduziert wird, um so die Überhöhung im erweiterten Nahfeld zu kompensieren.
- **CUT mode:** Aktiviert einen Low-Cut-Filter, der den Bassbereich der Box absenkt. Diese

^d Winkel zwischen 2 Lautsprechern des Arrays

Funktion wird verwendet, um das Array auf die Verwendung in Kombination mit Subwoofern vorzubereiten. Diese Funktion kommt in den folgenden Simulationen nicht zum Einsatz, da keine zusätzlichen Subwoofer verwendet werden und daher die Fullrange^e Eigenschaften der Systeme von Interesse sind.

- **HFC function:** Befinden sich Zuhörerbereiche, die vom Line Array abgedeckt werden sollen, in großer Entfernung, so kann die *High Frequency Compensation* aktiviert werden. Dabei wird die frequenzabhängige Schallabsorption der Luft kompensiert, in dem der Hochtonbereich angehoben wird. Es gibt zwei verschiedene Einstellungen, *HFC1* und *HFC2*. *HFC1* ist für den Bereich zwischen 30 und 60 m vom Array entfernt ausgelegt - darüber hinaus wird *HFC2* verwendet.
- **CPL function:** Die *Coupling*-Funktion wird verwendet, um Kopplungseffekte des Arrays zu kompensieren. Diese Kopplungseffekte wirken vor allem im Tieftonbereich und führen zu einer Überhöhung des Pegels. *CPL*-Funktion setzt daher bei 2 kHz ein und erreicht die maximale Dämpfung bei 100 Hz. Die Dämpfungswerte steigen mit der Länge des Arrays und lassen sich daher zwischen 0 und -9 dB einstellen. Alle Elemente des Arrays müssen mit dem gleichen *CPL*-Wert konfiguriert werden.

ARC bzw. *LINE* sind Lautsprechereigenschaften, die nicht verstellt werden können. *CUT*, *HFC* und *CPL* sind die DSP-Einstellungen, welche frei gewählt werden können.

4.2.3 Herausforderer KV2 Audio

Ein kleine Revolution probiert der tschechische Hersteller *KV2 Audio* zu erreichen. Nachdem in den letzten Jahrzehnten das Line Array in der Großraumbeschallung zum Standard wurde, versucht diese Unternehmen eine Punktschallquelle für diese Anwendung bereit zu stellen. Das *VHD5.0 Constant Power Point Source Array* soll einem modernen Line Array um nichts nachstehen und durch die Vermeidung von Kammfilter- und Laufzeiteffekten sogar noch bessere Ergebnisse erzielen. [16]

Natürlich müssen wie beim Line Array mehrere Quellen wirken, um einen SPL zu generieren, der groß genug ist, um große Räume oder Flächen beschallen zu können. Dennoch wirken die einzelnen Treiber zusammen als Punktschallquelle. Durch analoges wie auch digitales „signal processing“ werden Auslöschungen und Überlagerungen vermieden, wodurch ein klarer und präziser Klang entsteht. Der Aufbau des *VHD5.0* ist in Abbildung 4.6 zu sehen.

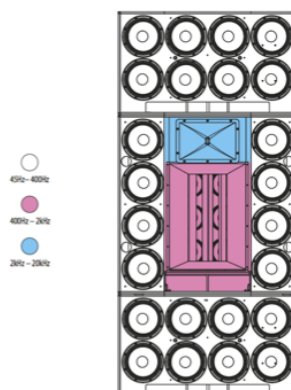


Abbildung 4.6: Der Aufbau des *VHD 5.0* der Firma *KV2 Audio*.

^e Fullrange: Verhalten des Lautsprechers über den gesamten Frequenzgang.

4.3 Parameter zur Beurteilung der Ergebnisse

Die Bewertung der Simulationen soll durch 3 Parameter erfolgen, die von EASE errechnet werden können. Diese sind:

- **SPL**

Der SPL (engl.: sound pressure level) gibt die Schalldruckverteilung im Raum an. Diese sollte natürlich über die gesamte zu beschallende Fläche möglichst gleichmäßig sein. Man kann sich die Druckverteilung von EASE sowohl für die direkte Schallausbreitung von der Quelle weg, aber auch den summierten Schalldruckpegel, bei dem Reflexionen mit berücksichtigt werden, anzeigen lassen. Die Schwankung des Schalldrucks sollte im Raum nicht mehr als 6 *dB* betragen, maximal jedoch 10 *dB*.

- **STI**

Der Speech Transmission Index, auf deutsch Sprachübertragungsindex, gibt Aufschluss über die Sprachverständlichkeit im Raum. Bei der Messung werden dabei sowohl die raumakustischen Eigenschaften des Raumes, als auch die Eigenschaften der elektroakustischen Anlage miteinbezogen. Der Wertebereich des STI liegt zwischen 0 und 1 und gliedert sich wie folgt:

STI Einteilung

Schlecht	0 bis 0,3
Schwach	0,3 bis 0,45
Angemessen	0,45 bis 0,6
Gut	0,6 bis 0,75
Ausgezeichnet	0,75 bis 1

Der STI muss mindestens 0,5 betragen, um zu gewährleisten, dass Notfalldurchsagen verstanden werden können. Natürlich liegt der Anspruch an den STI aber meist weit höher, da es möglichst einfach und ohne große Anstrengung möglich sein soll, die Darbietungen zu verstehen.

- **C80**

Das Klarheitsmaß C_{80} wird verwendet, um die musikalischen Eigenschaften eines Raumes zu bewerten. Es beschreibt die Zeitdurchsichtigkeit (Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne) und Registerdurchsichtigkeit (Unterscheidbarkeit der verschiedenen Instrumente) von Musik. Es setzt die Energie, die in den ersten 80 *ms* eintrifft in Verhältnis zur restlichen Energie:

$$C_{80} = 10 \cdot \log\left(\frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}}\right) \quad (4.1)$$

Bei einem C_{80} , das einen Wert über 0 *dB* aufweist, spricht man von hoher Durchsichtigkeit. Ein Ergebnis über 0 *dB* für alle Zuhörerplätze ist aber mit zunehmender Nachhallzeit immer schwerer zu erreichen, weshalb oftmals ein Kompromiss gefunden werden muss. Dieser sieht vor, dass ein C_{80} bis -3 *dB* an gewissen Plätzen zulässig ist. Im Bereich zwischen -3 *dB* und 0 *dB* „umhüllt“ die Musik den Zuhörer. Durch den Einsatz der Beschallungsanlage kann die Anzahl der frühen Reflexionen erhöht und somit die Durchsichtigkeit erhöht werden. Es ist aber auch Sache des Geschmacks, ob eher die Durchsichtigkeit oder die Räumlichkeit der Musik bevorzugt wird. Je nachdem varriert der angestrebte Wert für das Klarheitsmaß. [2]

4.4 Simulation in verschiedenen Räumen

Für die Vergleiche der Beschallungskonzepte werden nun einfache Räume geplant, welche exemplarisch eine möglichst große Gruppe an Räumen repräsentieren. Diese Räume werden der Einfachheit wegen als einfache Quaderräume simuliert. So wurden folgende Räume gewählt:

- Kleiner Veranstaltungsraum
- Veranstaltungsraum mittlerer Größe
- Große Veranstaltungshalle
- Kirche
- Open Air

Für jeden dieser Räume sollen nun in den folgenden Kapiteln mehrere Beschallungslösungen konzipiert und auf deren Wirksamkeit untersucht werden.

Vorab bleibt noch allgemein zu erwähnen, dass die Nachhallzeiten der Räume nach *DIN 18041* bestimmt wurden. Die Nachhallzeit wurde der Nutzung als Mehrzwecksaal angepasst wurde. Aus der resultierenden Nachhallzeit wurde mittels Oberfläche und Volumen des Raumes anschließend der Absorptionsgrad α bestimmt, der für die Simulation eingesetzt wurde.

4.4.1 Kleiner Veranstaltungsraum

Ein kleiner bis mittlerer Hörsaal, der Hörsaal i2 an der TU Graz, stellt die Grundlage für die Dimensionierung des kleinen Veranstaltungsraumes dar. Größere Klassen-, Seminar- und Besprechungsräume sollen durch diese Simulation repräsentiert werden.

Maße	
Länge	16,70 m
Breite	10,80 m
Höhe	3,80 m
Oberfläche S	569,72 m ²
Volumen V	685,37 m ³

In einem Raum dieser Größe errechnen sich je nach Nutzung drei verschiedene optimale Nachhallzeiten. [17]

$$\text{Musik: } T_{soll,A1} = 0.45 \cdot \log(V) + 0.07 = 1.35s \quad (4.2)$$

$$\text{Sprache: } T_{soll,A2} = 0.37 \cdot \log(V) - 0.14 = 0.91s \quad (4.3)$$

$$\text{Unterricht: } T_{soll,A3} = 0.32 \cdot \log(V) - 0.17 = 0.74s \quad (4.4)$$

Da die Nutzung dieser Räume eher zwischen Sprache und Unterricht gelegt werden soll, wurde die Nachhallzeit für diesen Raum mit 0.85 s angenommen. Aus der Formel 4.5 ergibt sich für den Absorptionsgrad ein α von 0.23.

$$\alpha = \frac{0.163 \cdot V}{T_{soll} \cdot S} \quad (4.5)$$

In Abbildung 4.7 ist nun der fertig geplante Raum zu sehen. Die grüne Fläche stellt den Bereich der Zuhörer, für welchen die Auswertung vorgenommen wird, dar. Die Position der Lautsprecher im Raum ist anhand der blauen Symbole ersichtlich.

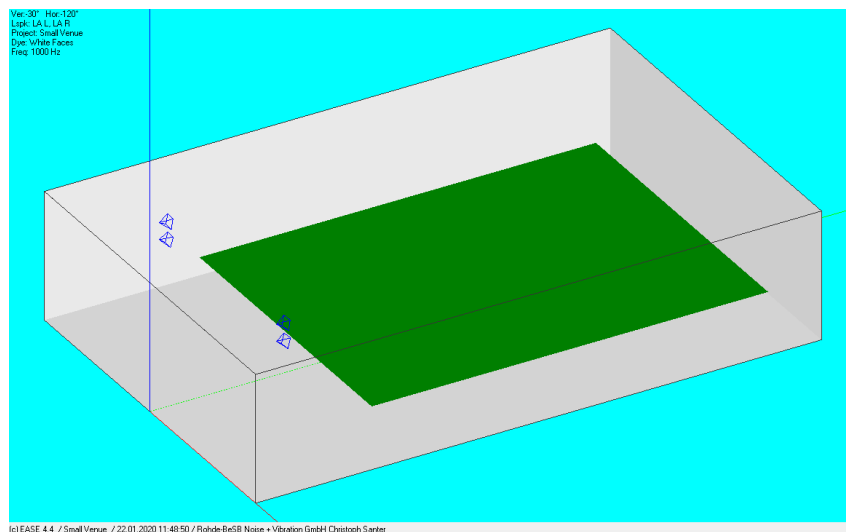


Abbildung 4.7: 3D-Plot des kleinen Raumes, exportiert aus EASE.

Planung der Beschallung

Die Planung der Beschallungsanlage sollte eine Fläche abdecken, die 4 m von der vorderen Wand weg beginnt und sich bis ans Ende des Raumes erstreckt. Rundum ist ein Meter zu den Wänden frei, um Zu- und Abgang zu ermöglichen. Die Abhörfläche ist in 1,2 m, da dies der durchschnittlichen Höhe der Ohren in sitzender Position entspricht.

Es wird eine Beschallung mit Punktschallquellen und ein Line Array für den Raum geplant, jeweils in Stereo-Ausführung, wie in Tabelle 4.4 angeführt. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich vorne in Raummitte.

System		X (m)	Y (m)	Z (m)	Hor (°)	Ver (°)
Punktschallquelle	L	3	2	3	- 3	- 15
	R	- 3	2	3	3	- 15
Line Array	L	3	2	3	- 3	- 9
	R	- 3	2	3	3	- 9

Tabelle 4.4: Position der Systeme im kleinen Raum.

Als Punktschallquelle kommen 2 V7P zum Einsatz, deren Pegel um 9 dB reduziert wurde, um wie in Kapitel 4.2 erwähnt ca. 100 dB Spitzenpegel zu erreichen. Die genaue Konfiguration des Line Arrays ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Number	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	HFC	CPL
1	V8	Arc	-15	0	-	- 3
2	V8	Arc	-15	3	-	
3	V8	Arc	-15	6	-	
4	V12	Arc	-15	3	-	

Tabelle 4.5: Konfiguration des Line Arrays im kleinen Raum.

Eregebnis

Die Simulation der beiden Systeme zeigt, dass die Punktschallquelle (Abbildung 4.8(a)) über den gesamten Frequenzverlauf den lineareren Verlauf erzielt, als das Line Array (Abbildung 4.8(b)). Generell ist aus den Ergebnissen (siehe Anhang) zu erkennen, dass ein Line Array System für diesen kleinen Raum überdimensioniert ist.

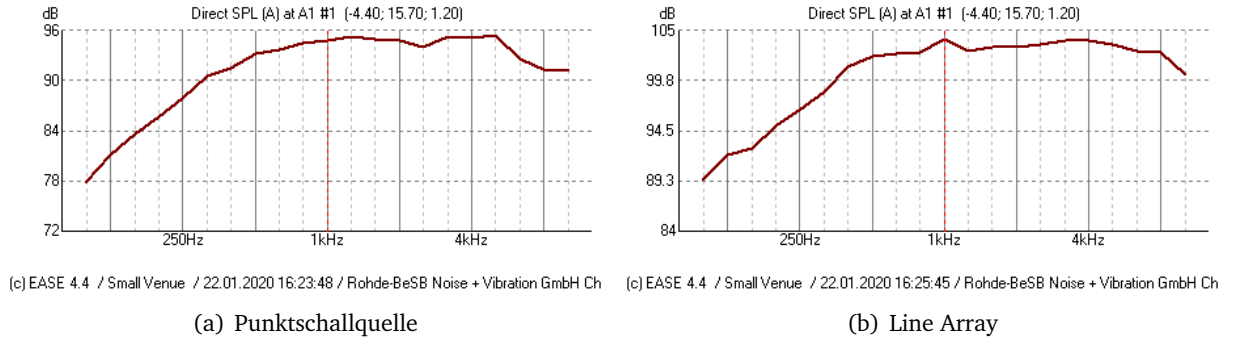


Abbildung 4.8: Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.

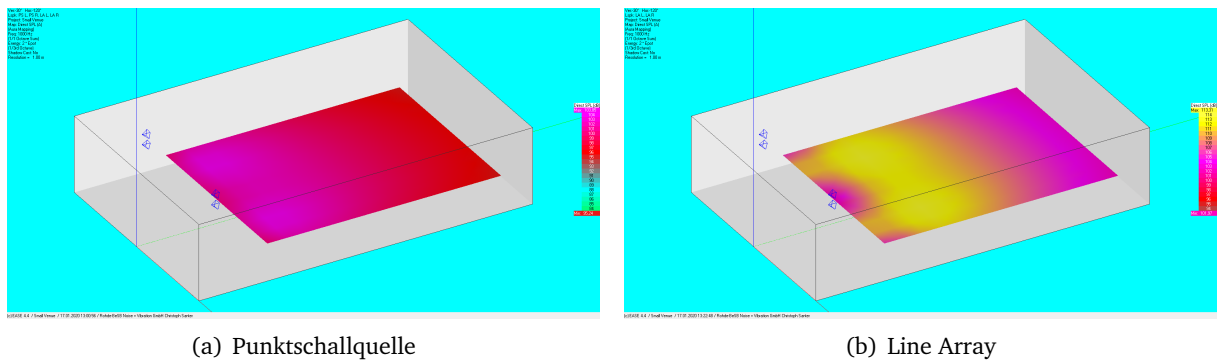


Abbildung 4.9: Direkter SPL bei 1000 Hz.

Beide Systeme liefern einen ähnlich guten STI-Wert von 0,68 (Punktschallquelle) bzw. 0,72 (Line Array). Die Durchsichtigkeit ist bei beiden Systemen sehr hoch, was ein Vorteil für Verständlichkeit der Sprache ist.

Grundsätzlich ist für einen Raum dieser Größe ein Line Array nicht notwendig.

4.4.2 Veranstaltungsraum mittlerer Größe

Die Vorlage für diesen Raum bildet ein Veranstaltungsraum, wie er in vielen kleineren Städten zu finden ist. So wurden die Maße für diesen Raum den Plänen der Neuen Burg in Völkermarkt entnommen, deren großer Saal ca. 400 Personen Platz bietet. Der Raum setzt sich aus dem Besucherraum und der Bühne zusammen.

Maße	
Länge	22,10 m
Breite	14,40 m
Höhe	6,20 m
Tiefe Bühne	9,00 m
Breite Bühne	8,00 m
Höhe Bühne	5,00 m
Oberfläche S	1323,08 m ²
Volumen V	2333,09 m ³

Die Berechnung der optimalen Nachhallzeit nach DIN 18041 ist für diesen Raum nur mehr begrenzt möglich, da die Rechnung für Musik ($T_{soll,A1}$) eigentlich nur bis 1000 m³ gültig ist. Die Berechnung wurde aber dennoch durchgeführt, um einen Richtwert zu erhalten, da für diesen Raum eine Nutzung zwischen Musik und Sprache angedacht ist.

$$\text{Musik: } T_{soll,A1} = 0.45 \cdot \log(V) + 0.07 = 1.59s \quad (4.6)$$

$$\text{Sprache: } T_{soll,A2} = 0.37 \cdot \log(V) - 0.14 = 1.11s \quad (4.7)$$

$$\text{Unterricht: } T_{soll,A3} = 0.32 \cdot \log(V) - 0.17 = 0.91s \quad (4.8)$$

Da die Nachhallzeit zwischen der für Sprache und Musik liegen soll, wurde eine Nachhallzeit für den Raum von 1,35 s angenommen. Aus Formel 4.5 in Kapitel 4.4.1 ergibt sich der Absorptionsgrad mit 0.21.

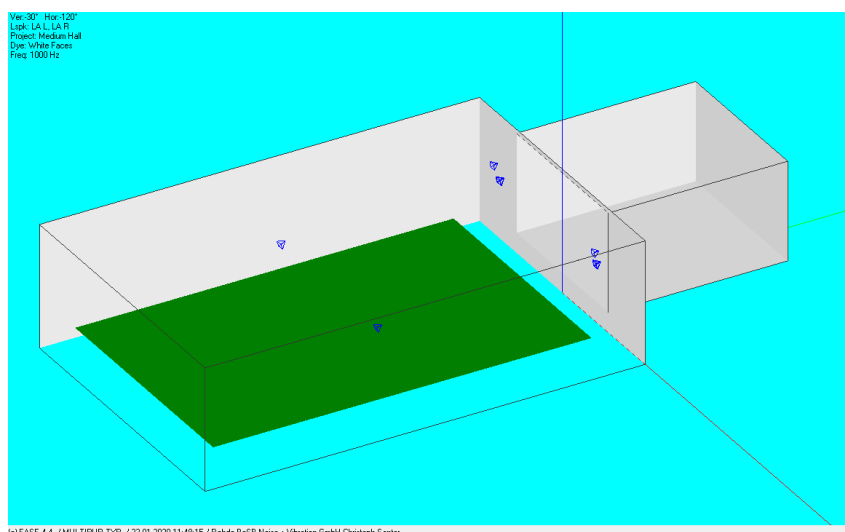


Abbildung 4.10: 3D-Plot des mittelgroßen Raumes, exportiert aus EASE.

Planung der Beschallung

Dieser Raum besitzt eine, im Vergleich zum Gesamtraum gesehen, kleinere Bühne, die, wie in Abbildung 4.10 zu erkennen ist, an den Raum anschließt. Deshalb wird die Beschallung vor bzw. seitlich der Bühnenöffnung geplant. Die zu beschallende Fläche beginnt 2 m von der Bühnenkante bzw. der vorderen Wand weg und reicht bis zum Ende des Saales. Umlaufend ist wieder ca. ein Meter zur Wand freigelassen. In diesem Raum finden vorrangig Veranstaltungen mit sitzendem Publikum statt, weshalb eine Publikumshöhe von 1,2 m geplant wurde. Ein Spezifikum dieses Raumes ist, dass seine Ausrichtung entgegengesetzt den übrigen Räumen geplant wurde. Der Koordinatenursprung befindet sich an der Bühnenvorderkante, mittig im Raum.

System		X (m)	Y (m)	Z (m)	Hor (°)	Ver (°)
Punktschallquelle Setup 1	L	- 4,20	-0,5	3,80	3	- 10
	R	4,20	-0,5	3,80	- 3	- 10
Punktschallquelle Setup 2 Front	L	- 4,20	- 0,5	3,80	3	- 20
	R	4,20	-0,5	3,80	- 3	- 20
Punktschallquelle Setup 2 Delay	L	- 4,20	- 11,50	3,80	5	- 20
	R	4,20	- 11,50	3,80	- 5	- 20
Line Array	L	- 4,40	- 0,70	4,50	4	- 7
	R	4,40	- 0,70	4,50	- 4	- 7

Tabelle 4.6: Position der Systeme im mittelgroßen Raum.

Geplant und simuliert werden für diesen Raum 3 Setups. Das erste besteht aus 2 Punktschallquellen links und rechts der Bühne, die so ausgerichtet sind, dass sie den ganzen Raum beschallen. Das 2. Setup besteht ebenfalls aus Punktschallquellen, wobei die 2 an der Front durch eine Delayline mittig im Raum ergänzt werden. Die Winkel wurden dabei so angepasst, dass die 4 Lautsprecher den Raum ideal abdecken. Der Weg zwischen Front- und Delay-Lautsprechern beträgt 11 m, weshalb die Wiedergabe der Delay-Lautsprecher um 32 ms verzögert wird. Zuletzt wird zum Vergleich noch ein Line Array simuliert, dessen Konfiguration in Tabelle 4.7 dargestellt ist.

Nr.	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	HFC	CPL
1	V8	Arc	- 10	0	-	- 6
2	V8	Arc	- 10	3	-	
3	V8	Arc	- 10	4	-	
4	V8	Arc	- 10	4	-	
5	V12	Arc	- 10	1	-	
6	V12	Arc	- 10	5	-	

Tabelle 4.7: Konfiguration des Line Arrays im mittelgroßen Raum.

Ergebnis

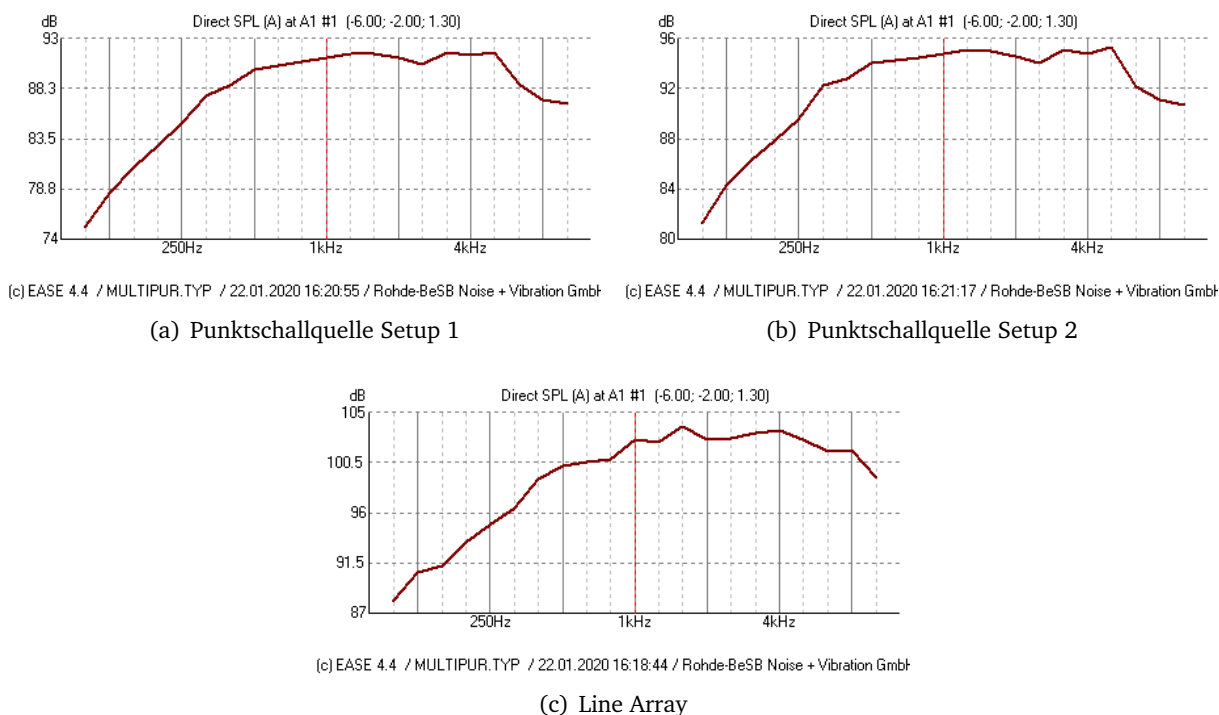


Abbildung 4.11: Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.

Das Punktschallquellen Setup 1 mit nur 2 Lautsprechern weist prinzipiell den linearsten SPL-Verlauf auf, wie aus Abbildung 4.11(a) ersichtlich ist. Doch wird der SPL nach hinten hin weniger, wie man in Abbildung 4.12(a) erkennen kann. Dies wird mit dem Setup 2 kompensiert, welches dank der Delayline bis in die hintersten Reihen einen hohen und ziemlich gleichmäßigen SPL liefert (Abbildung 4.12(b)). Jedoch wird dadurch der Frequenzverlauf des SPL vor allem im hochfrequenten Bereich negativ beeinflusst, da trotz Delay kleinere Auslöschungen durch negative Interferenzen nicht vermieden werden können (Abbildung 4.11(b)). Für beide Setups wäre ein dritter Lautsprecher an der Bühnenvorderkante, mittig positioniert zu überlegen, um das leichte „Loch“ im vorderen Bereich auszufüllen. Das Line Array liefert in diesem Saal trotz Reduktion um 10 dB einen sehr hohen SPL, der in dieser Form noch zu hoch wäre. Die Verteilung ist, wie in Abbildung 4.12(c) zu erkennen, gut, wobei sich zu den höheren Frequenzen hin gewisse Interferenzmuster ausbilden.

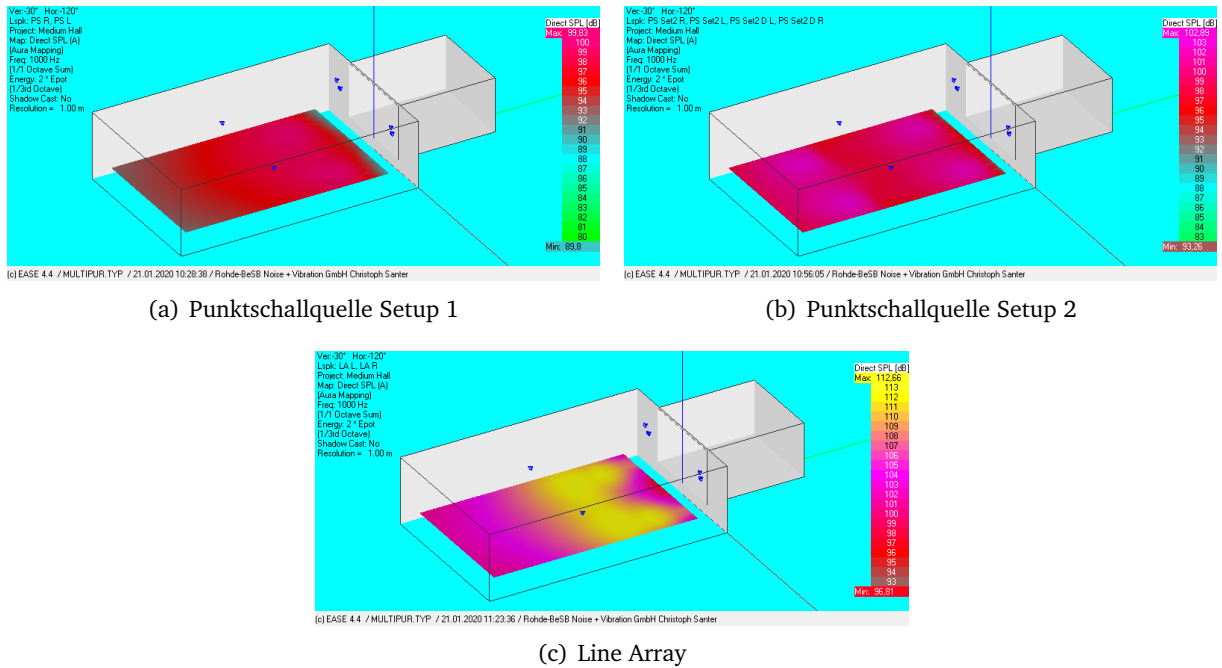


Abbildung 4.12: Direkter SPL bei 1000 Hz.

Für die beiden Setups mit Punktschallquellen beträgt der STI ca. 0,61. Die Schwankung zwischen dem maximalen bzw. minimalen Wert für den STI ist allerdings beim Setup 1 ohne Delayline geringer. Der STI bei der Beschallung mit einem Line Array ist etwas höher und erreicht einen mittleren Wert von 0,67. Mit dem Line Array bleibt der Wert im gesamten Raum über 0,60. Die Durchsichtigkeit ist beim Line Array höher als bei den Punktschallquellen.

4.4.3 Großer Veranstaltungshalle

Diese Veranstaltungshalle ist deutlich größer, als die beiden Räume zuvor. Als Vorlage dient hierbei die Helmut List Halle in Graz.

Maße	
Länge	44.8 m
Breite	23.1 m
Höhe	12 m
Oberfläche S	3699,36 m ²
Volumen V	12418,56 m ³

Die Berechnung der Nachhallzeit nach *DIN 18041* ist nunmehr für keine der Nutzungsarten mehr möglich, da das maximale Volumen von 10000 m³ bei dieser Halle überschritten wird. Zur Orientierung wurde die Berechnung aber dennoch durchgeführt:

$$\text{Musik: } T_{soll,A1} = 0.45 \cdot \log(V) + 0.07 = 1.91s \quad (4.9)$$

$$\text{Sprache: } T_{soll,A2} = 0.37 \cdot \log(V) - 0.14 = 1.37s \quad (4.10)$$

$$\text{Unterricht: } T_{soll,A3} = 0.32 \cdot \log(V) - 0.17 = 1.14s \quad (4.11)$$

Wählt man die Nachhallzeit an Hand dieser Berechnung aus, so würde für die Nutzung zwischen Musik und Sprache, eine optimale Nachhallzeit von 1.65 s herauskommen. Darum wird α gleich 0,33 gewählt.

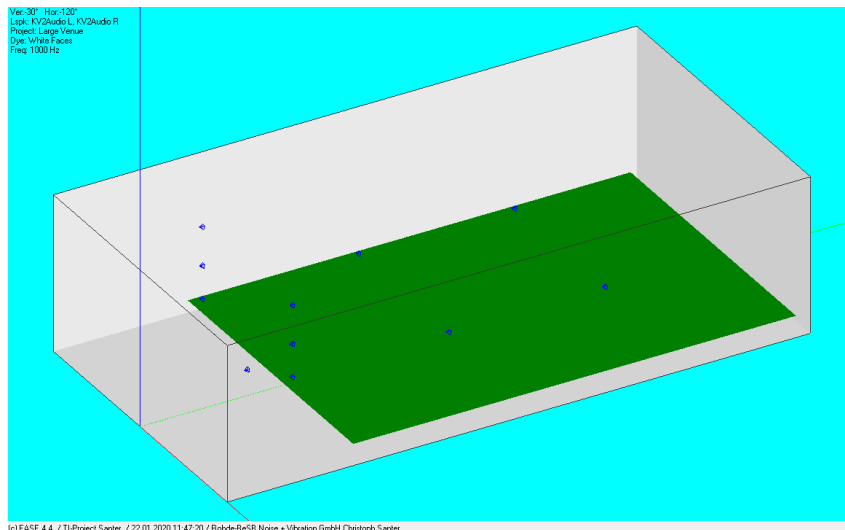


Abbildung 4.13: 3D-Plot des großen Raumes, exportiert aus EASE.

Planung der Beschallung

Dieser Raum ist ein einfacher Quader (eine Schuchschachtel), weshalb die Position der PA 8 m von der Stirnseite entfernt gewählt wurde. Die Lautsprecher befinden sich jeweils 6 m links bzw. rechts der Mittelachse. Es wurde also eine imaginäre Bühne von 12 m Breite und 8 m Tiefe berücksichtigt. 2 m vor der Bühne, also insgesamt 10 m von der vorderen Wand entfernt, beginnt der Publikumbereich, welcher sich bis auf wenige Zentimeter am Rand auf die gesamte restliche Fläche des Raumes erstreckt. Die Beschallung bezieht sich auf stehende Besucher, daher wurde

die Publikumshöhe mit 1,7 m angenommen, welche der Ohrenhöhe eines durchschnittlichen Menschen entspricht. Der Koordinatenursprung befindet sich mittig an der vorderen Wand.

System		X (m)	Y (m)	Z (m)	Hor (°)	Ver (°)	Lautsprecher	Gain (dB)	Delay (ms)	
Punktschallquelle	Front	L	6	8	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 5	1
		R	- 6	8	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 5	1
	Delay 1	L	6	20	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 8	35
		R	- 6	20	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 8	35
	Delay 2	L	6	32	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 11	70
		R	- 6	32	4,50	0	- 20	V7P-75X40	- 11	70
Line Array	Hang	L	6	8	7	1	- 7	V8 Arc	- 12	1
		R	- 6	8	7	- 1	- 7	V8 Arc	- 12	1
	Frontfill	C	0	8	2	0	0	V7P-75X40	- 15	11
KV2Audio	L	6	8	10	0	- 15	VHD5 + downfill	- 18	1	
	R	- 6	8	10	0	- 15	VHD5 + downfill	- 18	1	

Tabelle 4.8: Position der Systeme in der großen Veranstaltungshalle.

In diesem Raum werden erstmals 3 Systeme miteinander verglichen. Zuerst wurde ein System mit Punktschallquellen konzipiert, welches aus insgesamt 3 Linien besteht, Front, Delay 1 und Delay 2. Diese sind immer 12 m voneinander entfernt, weshalb eine Delayzeit von 35 ms zwischen den Linien berücksichtigt wurde. Als nächstes wurde ein Line Array mit einem Midfill geplant. Die genaue Spezifikation des Line Arrays findet sich in Tabelle 4.9. Zuletzt wurde noch ein System von KV2audio geplant. Das VHD5 inklusive einem weiteren Downfill soll, laut Rigging Anleitung des Herstellers, in mindestens 10 m Höhe geflogen werden.

Nr.	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	HFC	CPL
1	V8	Arc	- 12	0	1	- 6
2	V8	Arc	- 12	0	1	
3	V8	Arc	- 12	1	1	
4	V8	Arc	- 12	1	-	
5	V8	Arc	- 12	1	-	
6	V8	Arc	- 12	1	-	
7	V8	Arc	- 12	1	-	
8	V8	Arc	- 12	1	-	
9	V8	Arc	- 12	2	-	
10	V8	Arc	- 12	6	-	
11	V8	Arc	- 12	9	-	

Tabelle 4.9: Konfiguration des Line Arrays in der großen Veranstaltungshalle.

Eregebnis

Bei den über die Fläche gemittelten Frequenzgängen der 3 Systeme (Punktschallquellen, Line Array und VDH5 von KV2audio) in Abbildung 4.14 erkennt man, dass das System aus Punktschallquellen (4.14(a)) den glattesten Frequenzverlauf aufweist. Das Line Array (4.14(b)) liefert auch ein sehr annehmbares Ergebnis. Das VDH5 (4.14(c)), ein Cluster aus Punktschallquellen, weist einen sehr unausgewogenen Frequenzgang mit stark ausgeprägten Überhöhungen und Senken aus.

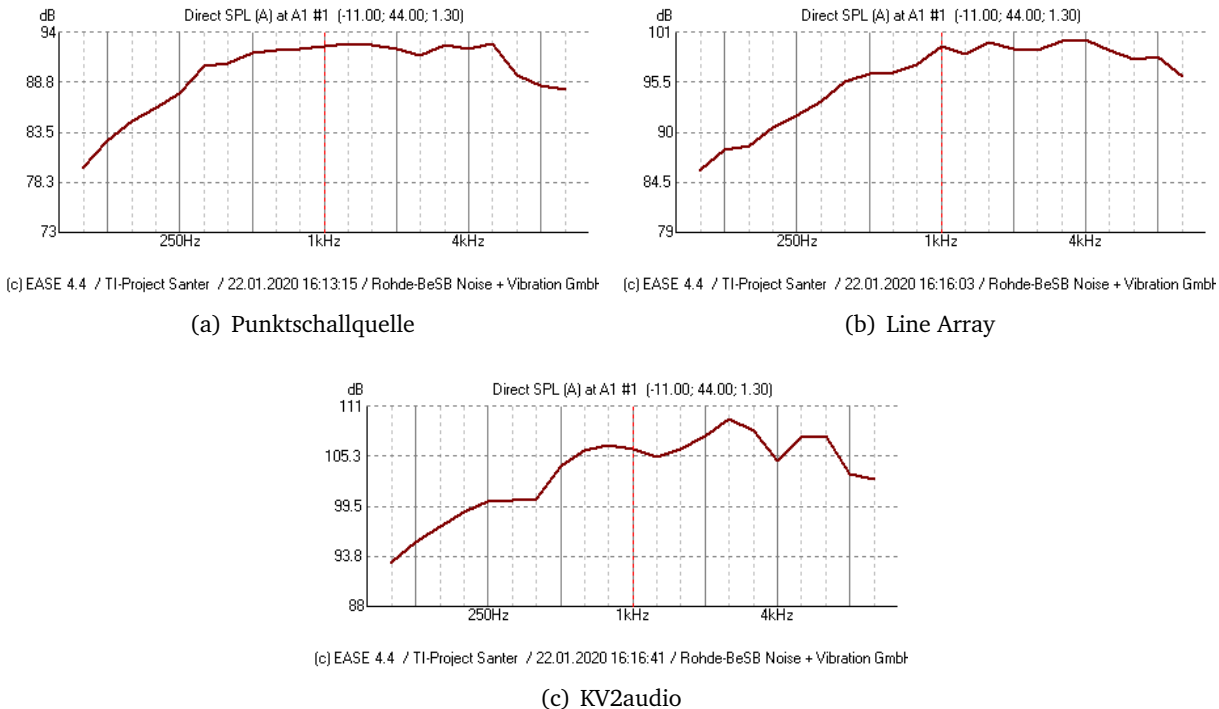
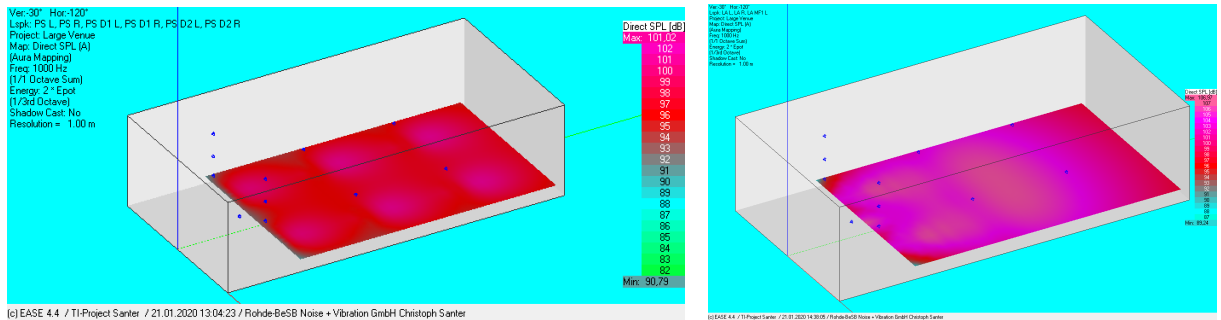


Abbildung 4.14: Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.

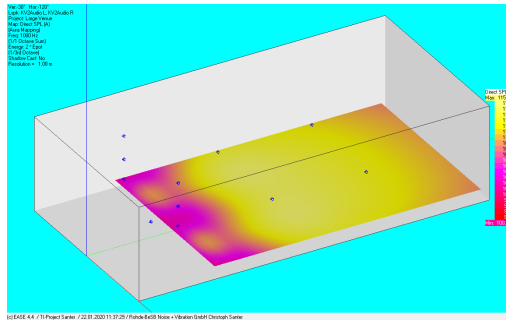
Betrachtet man die Verteilung des SPL (4.15) bei 1 kHz fällt sofort auf, dass sowohl die Lösung mit Punktschallquelle, als auch das Line Array ein sehr gutes Ergebnis liefern (4.15(a) und 4.15(b)). Das VDH5 (4.15(c)) hat trotz der Reduktion um 18 dB einen zu hohen SPL, der aber erst einige Meter von der Bühne entfernt extrem wird. Es ist auffallend, dass trotz mehrmaliger Reduktion des Gains in der Simulation der maximale SPL nur schwach oder gar nicht abgenommen hat, was nahelegt, dass das Konfigurationsmodul von KV2audio in EASE nicht einwandfrei funktioniert. Außerdem lässt der geringere Pegel in den ersten Metern darauf schließen, dass das System für die Beschallung in weiten Entfernungen konzipiert wurde.

Bei den Ergebnissen in diesem Raum ist auffallend, dass sich der STI-Wert des VDH5-Systems und der der Punktschallquelle mit ca. 0,65 und einer ähnlichen Streuung von Minimal- und Maximalwert sehr ähneln. Dies lässt erkennen, dass die beiden Systeme nach dem selben Funktionsprinzip arbeiten. Das Line Array liefert mit 0,74 wiederum ein deutlich besseres Ergebnis, wie schon für den Raum mittlerer Größe. Auch bei der Durchsichtigkeit verhält es sich ähnlich. Die beiden Systeme mit Punktschallquellen weisen eine ähnliche Durchsichtigkeit auf, während das Line Array einen höheren Wert als Ergebnis liefert.



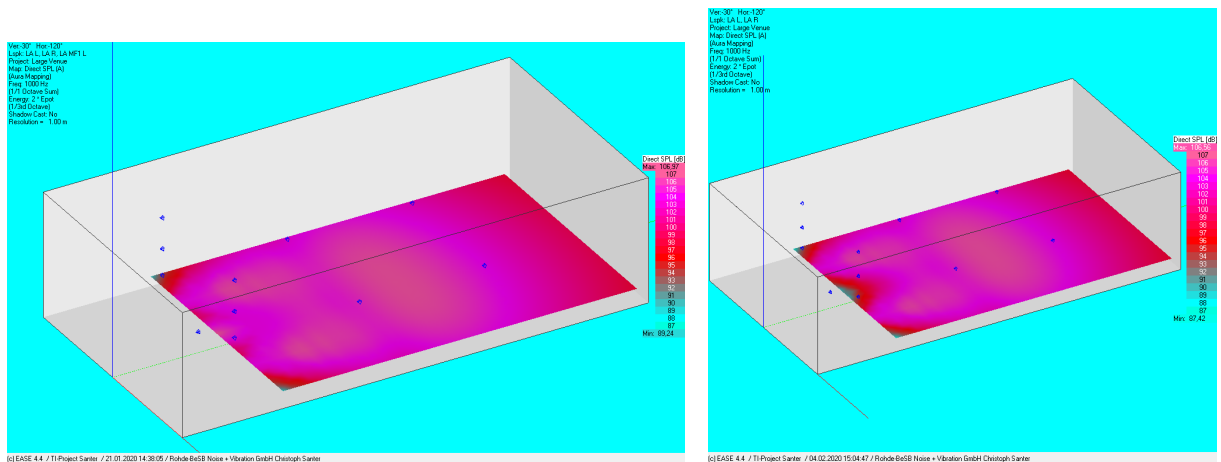
(a) Punktschallquelle

(b) Line Array



(c) KV2audio

Abbildung 4.15: Direkter SPL bei 1000 Hz.



(a) Line Array mit Midfill

(b) Line Array ohne Midfill

Abbildung 4.16: Direkter SPL bei 1000 Hz.

Die Notwendigkeit eines Midfills wird in Abbildung 4.16 dargestellt. Man sieht in Abbildung 4.16(b) deutlich, das in der Mitte der Bühne ein Loch entsteht, welches durch Midfills ausgeglichen werden kann, wie in Abbildung 4.16(a) ersichtlich ist.

4.4.4 Kirche

Die Größe der Kirche wurde aus der Vorlage eines gotischen Doms aus EASE entnommen. Lediglich das Hauptschiff wurde etwas verlängert.

Maße	
Hauptschiff Länge	30 m
Hauptschiff Breite	11 m
Hauptschiff Höhe	12 m
Seitenschiff Länge	10 m
Seitenschiff Breite	8 m
Seitenschiff Höhe	12 m
Turm Länge	10 m
Turm Breite	12 m
Turm Höhe	35 m
Oberfläche S	3259,73 m ²
Volumen V	7889,32 m ³

Nach der Analyse von Nachhallzeiten in verschiedenen Kirchen, wurde die Referenznachhallzeit mit 3 s gewählt. Daraus resultiert ein Absorptionsgrad α von 0.13.

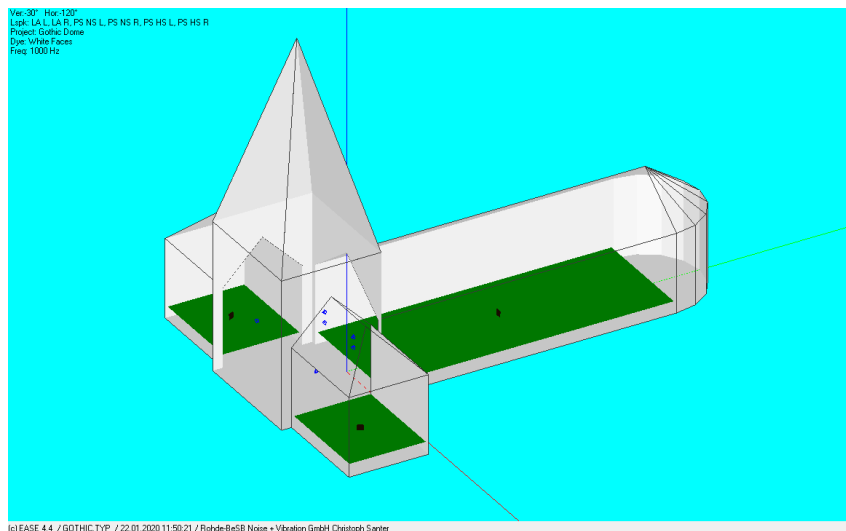


Abbildung 4.17: 3D-Plot der Kirche, exportiert aus EASE.

Planung der Beschallung

Die Kirche teilt sich, wie in Abbildung 4.17 zu sehen, in 3 Teile: das Hauptschiff und die beiden Seitenschiffe. Im weißen Bereich würde sich der Altar mit dem Sprecher befinden. Da die Seitenschiffe eher klein sind, wurde für diese nur eine Beschallung mittels Punktschallquellen definiert, die sowohl bei der Simulation mit Punktschallquellen im Hauptschiff, als auch mit einem Line Array mit berechnet werden. Die Publikumsflächen erstrecken sich über die beiden Seiten- und den gesamten Hauptschiffbereich. An den Rändern wurde umlaufend wiederum ein wenig Platz zur Wand gelassen. Der Ursprung befindet sich mittig des Hauptschiffs, direkt an dessen Beginn, weshalb die Boxen einen negativer Wert in y-Richtung aufweisen. Die Beschallung für das Hauptschiff hängt knapp „hinter“ dem Ursprung, während die Punkte der seitlichen

Beschallung deutlich dahinter liegen (siehe Tabelle 4.10). Die Höhe der Publikumsfläche beträgt 1,20 m, da mit sitzendem Auditorium gerechnet wird.

System		X (m)	Y (m)	Z (m)	Hor (°)	Ver (°)	Lautsprecher	Gain (dB)
Punktschallquelle Hauptschiff	L	2,50	- 1	4	0	- 20	V7P-75X40	-7
	R	- 2,50	- 1	4	0	- 20	V7P-75X40	-7
Line Array Hauptschiff	L	2,50	-1	5	0	- 7	V8 & V12 ARC	- 15
	R	- 2,50	-1	5	0	- 7	V8 & V12 ARC	- 15
Punktschallquelle Seitenschiff	L	6	- 5	4,50	90	- 50	V7P-40X75	- 9
	R	- 6	- 5	4,50	- 90	- 50	V7P-40X75	- 9

Tabelle 4.10: Position der Systeme in einer Kirche.

Nr.	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	HFC	CPL
1	V8	Arc	- 15	0	-	- 5
2	V8	Arc	- 15	0	-	
3	V8	Arc	- 15	5	-	
4	V8	Arc	- 15	0	-	
5	V8	Arc	- 15	2	-	
6	V8	Arc	- 15	8	-	
7	V12	Arc	- 24	14	-	

Tabelle 4.11: Konfiguration des Line Arrays in einer Kirche.

Ergebnis

Beide geplanten und simulierten Systeme liefern einen SPL über den Frequenzgang (4.18), der ein akzeptables Ergebnis darstellt.

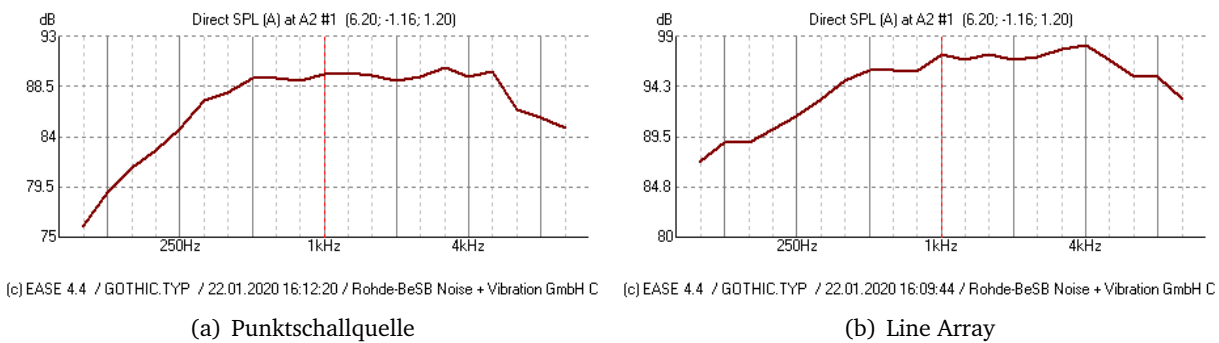


Abbildung 4.18: Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.

Dennoch, wenn man die Verteilung des SPL betrachtet, erkennt man, dass die Punktschallquelle in den hinteren Bereichen deutlich an Energie verliert, was nur durch die Anbringung einer Delayline kompensiert werden könnten. Ohne aber, wie hier geplant, ist die Abdeckung nicht zufriedenstellend. Das Line Array bietet für diese Situation ein besseres Ergebnis. Für die Seitenschiffe wird mit dem geplanten Setup aus Punktschallquellen nicht das erhoffte Ergebnis erreicht. Die Abdeckung könnte deutlich besser sein und Potential zur Verbesserung wäre vorhanden.

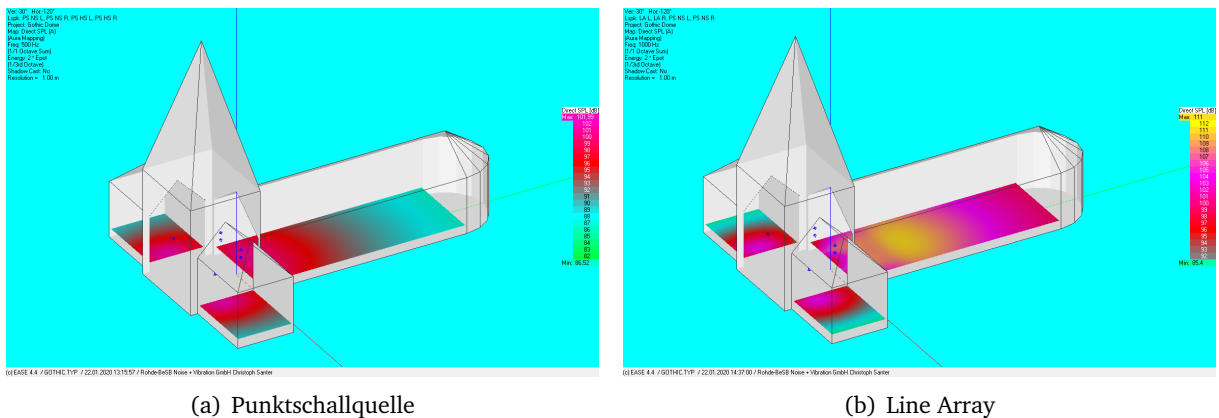


Abbildung 4.19: Direkter SPL bei 1000 Hz.

Das Line Array liefert auch in einer Kirche eine höhere Durchsichtigkeit (ca. 1,5 dB), die wiederum die Sprachverständlichkeit positiv beeinflusst. Dennoch ist der STI-Wert mit 0,55 für beide Simulationen in etwa gleich.

Hier stellt sich natürlich die Frage, in wie weit sich die Beschallung der Seitenschiffe negativ auswirkt. Deshalb wurde eine weitere Simulation durchgeführt, bei welcher die Seitenschiffe nicht berücksichtigt wurden. Wie erwartet, stiegen Durchsichtigkeit und STI bei Beschallung mit dem Line Array deutlich an. Die Durchsichtigkeit erreicht einen Wert von über 3 dB und der STI verbessert sich von 0,55 auf 0,65. Die Verbesserung bei Punktschallquellenbeschallung fiel nur sehr gering aus. Die Schalldruckverteilung im Raum blieb weitestgehend unverändert, da die Beschallung der Seitenschiffe, die des Hauptschiffes nicht beeinflusst. Dennoch konnte gezeigt werden, dass das Line Array einen weitaus höheren STI-Wert und damit eine besser

Sprachverständlichkeit liefert.

4.4.5 Open Air

Um eine Open Air Situation simulieren zu können wird ein sehr großer Quader definiert, dessen Wände einen Absorptionsgrad von 1 aufweisen. So wird sämtlicher Schall absorbiert und es kann die ungestörte Ausbreitung der Schallenergie simuliert werden, wie sie auch im Freien auftritt. Lediglich der Boden ist nicht zur Gänze absorbierend. Der Quader ist 215 m lang, 220 m breit und 30 m hoch.

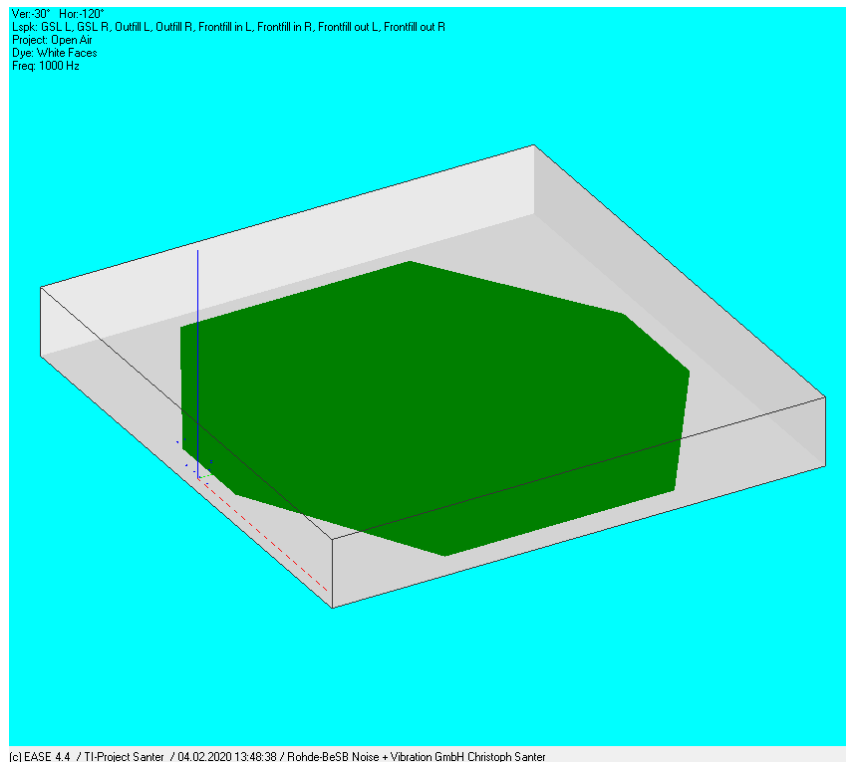


Abbildung 4.20: 3D-Plot des Open Air Geländes, exportiert aus EASE.

Bei dieser Simulation ist die Auswertung des C80 nicht möglich, da keine Reflexionen auftreten, welche in ein Verhältnis gebracht werden könnten. Die Auswertung des STI ist zwar möglich, aber liefert aber auch kein aussagekräftiges Ergebnis, da der STI auf Eigenschaften des geschlossenen Raumes basiert. Deshalb wird in dieser Simulation ausschließlich der SPL-Verlauf zur Auswertung der Ergebnisse herangezogen. Durch die Größe der Berechnung ist die Auswertung mit dem AURA-Modul in EASE ebenfalls nicht möglich. Es wird das interne Tool zur Darstellung des SPL-Verlaufes verwendet.

Planung

Der Bereich des Auditoriums wurde sehr groß gestaltet, um die Abstrahcharakteristik der Systeme für große Distanzen analysieren zu können. Der Publikumsbereich beginnt 5 m von der Bühne entfernt und ist zu Beginn 40 Meter breit, ehe er sich kontinuierlich auf 220 m Breite weitet. Zwischen 50 und 150 m Abstand von Bühne bleibt die Breite mit 220 m konstant, ehe auf den letzten 50 m die Breite auf 50 m abnimmt. Die Publikumshöhe ist 1,7 m, da von stehenden Zuhörern ausgegangen wird. Die Konfiguration des Beschallungssystems wird in Tabelle 4.12 dargestellt. Weiters folgen die genauen Konfigurationen der Arrays in Tabelle 4.13 und 4.14.

System		X (m)	Y (m)	Z (m)	Hor (°)	Ver (°)	Lautsprecher	Gain (dB)	Delay (ms)	
Line Array	Hang	L	10	0	12,90	0	- 2,5	GSL 8 & 12	- 10	1
		R	-10	0	12,90	0	- 2,5	Line & Arc	- 10	1
	Outfit	L	12	- 2	10,50	- 44	- 4	V8 & V12	- 3	1
		R	- 12	- 2	10,50	44	- 4	Arc	- 3	1
	Midfill	LL	7,80	- 0,50	2	0	0	V10P-110X40	- 18	8
		L	2,20	- 0,50	2	0	0		- 15	15
		R	- 2,20	- 0,50	2	0	0		- 15	15
		RR	- 7,80	- 0,50	2	0	0		- 18	8
KV2Audio	L	10,00	0	12	0	0	VHD 5	0	0	
	R	- 10,00	0	12	0	0	+ downfill	0	0	

Tabelle 4.12: Position der Systeme Open Air.

Nr.	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	CPL Low	CPL mid
1	GSL8	Line	- 10	0	-5	-6
2	GSL8	Line	- 10	1		
3	GSL8	Line	- 10	1		
4	GSL8	Line	- 10	1		
5	GSL8	Line	- 10	1		
6	GSL8	Line	- 10	0		
7	GSL8	Line	- 10	0		
8	GSL8	Line	- 10	1		
9	GSL8	Line	- 10	1		
10	GSL8	Line	- 10	0		
11	GSL8	Line	- 10	1		
12	GSL8	Arc	- 10	1		
13	GSL8	Arc	- 10	2		
14	GSL8	Arc	- 10	2		
15	GSL8	Arc	- 10	3		
16	GSL8	Arc	- 10	3		
17	GSL12	Arc	- 10	4		
18	GSL12	Arc	- 10	5		
19	GSL12	Arc	- 10	7		
20	GSL12	Arc	- 10	7		

Tabelle 4.13: Konfiguration des Main Line Arrays Open Air.

Nr.	Modell	Konfiguration	Gain (dB)	Winkel (°)	HFC	CPL
1	V8	Arc	- 3	0	-	- 5
2	V8	Arc	- 3	2	-	
3	V8	Arc	- 3	4	-	
4	V8	Arc	- 3	2	-	
5	V8	Arc	- 3	2	-	
6	V8	Arc	0	8	-	
7	V12	Arc	-10	8	-	

Tabelle 4.14: Konfiguration des Sidefill Line Arrays Open Air.

Ergebnis

Betrachtet man nur den gemittelten Verlauf des SPL, so erkennt man in Abbildung 4.21, dass das Line Array den glatteren Verlauf liefert (4.21(a)). Das VDH5 weist hier wiederum einen nicht so linearen Verlauf auf.

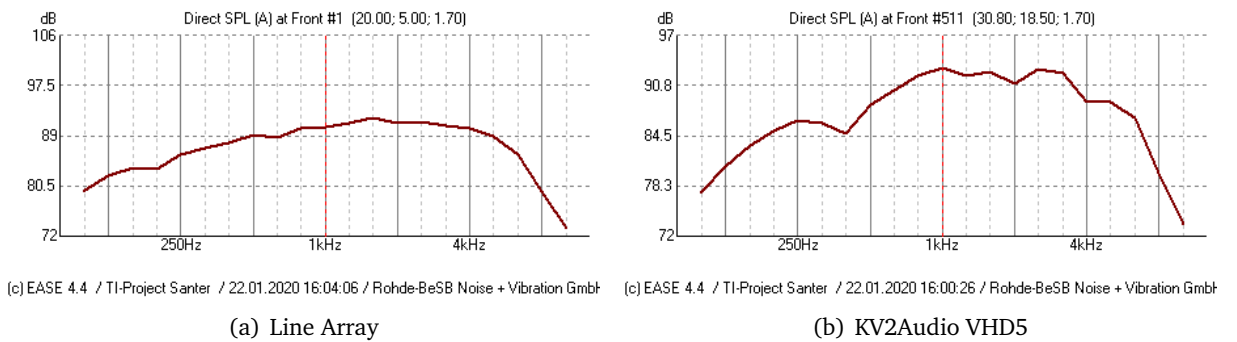


Abbildung 4.21: Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.

In Abbildung 4.22, die die Verteilung des Schalldruck bei 1000 Hz zeigt, ist aber zu erkennen, dass das Line Array ein kammfilterartiges Muster aufweist, während das VDH5 hier einen wesentlich schöneren Verlauf liefert.

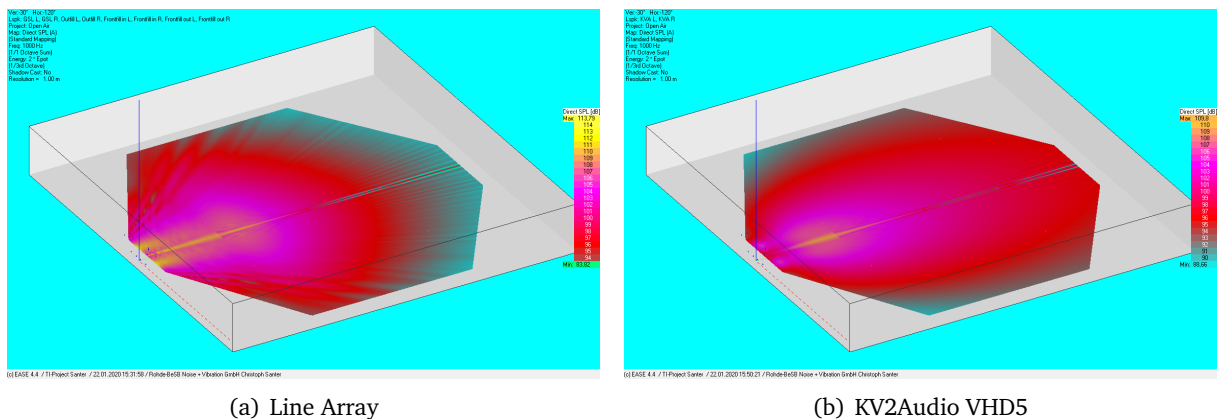


Abbildung 4.22: Direkter SPL bei 1000 Hz.

5

Diskussion, Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass in einem kleinen Raum ein einfaches Setup bestehend aus Punktschallquellen sicher in den meisten Fällen die beste Wahl ist. Die Abdeckung ist zu meist ausreichend und der Aufbau bzw. die Konfiguration des Systems gestaltet sich ziemlich unkompliziert. Natürlich muss aber die Art der Lautsprecher (Abstrahlcharakteristik) und ihre Position im Raum klug gewählt sein. Punktschallquellen setups liefern oftmals ein besseres Ergebnis als Line Arrays, wie in Kapitel 4.4.2 zu sehen. Im Saal mittlerer Größe ist die Variante aus Punktschallquellen mit Delayline die beste Wahl, um effizient und relativ einfach in der Konfiguration den Saal zu beschallen. Natürlich steigt mit zunehmender Größe des Setups (immer mehr Delaylines) die Komplexität an, da Delayzeiten und Aufstellung für mehrere Positionen berechnet werden müssen. Die Verteilung und Bearbeitung der Eingangssignale wird immer aufwändiger und bedarf mehr Zeit und Know-How.

Der große Veranstaltungsraum stellt daher eine Grenze dar, ab welcher ein Line Array wirklich Sinn macht und bessere Ergebnisse liefert. Zwar wäre auch eine Lösung mit Punktschallquellen und mehreren Delaylines gut verwendbar, doch ein Line Array, geflogen an nur einem Punkt, ist deutlich einfacher einzurichten und zu betreiben. Das Line Array stellt sicher auch in großen Kirchen die beste Lösung dar, da es die Sprachverständlichkeit deutlich verbessert.

Das *KV2audio VHD5* ist ein System, das für den Open-Air-Einsatz perfekt geeignet ist. Die Abstrahlcharakteristik zeichnet sich durch einen sehr linearen, gleichmäßigen Abfall mit zunehmender Distanz aus und es bilden sich auch keine störenden Kammfiltereffekte aus, wie es beim Line Array passieren kann. Dieses System ist auch sehr einfach Hand zu haben, da es mit Verstärker und Kabel in einer Komplettlösung angeboten wird, welche sehr benutzerfreundlich aufbereitet ist. Auch das Rigging^f des Systems wird durch das passende Zubehör für den Nutzer sehr einfach gestaltet. Das *KV2audio VHD5* ist daher ein guter Ersatz für ein Line Array, das auch ohne große technische Vorkenntnisse betrieben werden kann.

Die Wahl des richtigen Systems hängt von vielen Faktoren ab: Zu aller erst natürlich von der Größe des zu beschallenden Raumes und seinen raumakustischen Begebenheiten. Vor allem aber stellt sich auch die Frage, wer das System bedienen wird. Für ein Line Array ist großes Fachwissen von Vorteil, um das System bestmöglich bedienen und konfigurieren zu können. Punktschallquellen sind hier leichter zu händeln, sofern für das Setup nicht zu viele Delaylines notwendig sind. Aber auch der Kostenfaktor spielt bei der Anschaffung eine große Rolle, der in vielen Fällen zwischen Line Array und Punktschallquellen entscheidet.

Die Frage nach dem richtigen System wird für die meisten Räume immer eine subjektive bleiben, da technisch keine eindeutige Entscheidung getroffen werden kann. Dennoch gibt es Faktoren, die die Auswahl des passenden Systems einschränken.

^f Rigging: Notwendiges Material zum Aufhängen von Lasten

Literaturverzeichnis

- [1] Gerhard Graber and Werner Weselak, Elektroakustik VO, TU Graz, 2013.
- [2] Gerhard Graber and Werner Weselak, Raumakustik VO, TU Graz, 2013.
- [3] Dipl.-Ing. Volker Holtmeyer, Mysterium Line Array - Mode oder Trend?, CAVIS, 5. März 2003.
- [4] Anselm Goertz, Theoretische Grundlagen und die praktische Anwendung von Line-Arrays in der Beschallungstechnik und ihre Berücksichtigung in Simulationsprogrammen, CAVIS, 2002.
- [5] L-Acoustics, Line Array vs Line Source Array, www.l-acoustics.com, 2001.
- [6] L-Acoustics, Line Array Q& A, www.l-acoustics.com, 2003-2008.
- [7] Heil, Christian and Urban, Marcel, Sound Fields Radiated by Multiple Sound Sources Arrays, Audio Engineering Society Convention 92, <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6864>, Mar 1992.
- [8] Wollet, Benjamin, OpenAir Beschallung mit LineArrays, Tonseminar, Hochschule der Medien, 2008.
- [9] Online: <https://www.dbaudio.com/global/en/solutions/enabling-technologies/arrayprocessing/#>
- [10] Markus Zaunschirm, Beschallungstechnik und Klangregie LU, IEM - KU Graz, 2018.
- [11] Online: <https://www.production-partner.de/basics/subwoofer-anordnung-der-bass-das-rudeltier/>
- [12] Tobias Jacobs, Planspiele mit dem PA-System, Tastenwelt, 05/2008.
- [13] Jürg Jecklin, Theorie der Tontechnik, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, Mai 2003.
- [14] Online: <http://ease.afmg.eu>
- [15] Online: <https://www.dbaudio.com/global/de/>
- [16] Online: <https://www.kv2audio.com>
- [17] DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung
- [18] Online: [https://de.wikipedia.org/wiki/Brechung_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Brechung_(Physik))
- [19] Online: <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/v-serie>
- [20] Online: <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/serien/sl-serie/>
- [21] Online: <https://www.dbaudio.com/global/de/produkte/software/arraycalc/>
- [22] d & b Audiotechnik, Broschüre der GSL-Serie.
- [23] d & b Audiotechnik, Manual V8/V12, Version 1.7.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Ausbreitung einer Kugelwelle von einer Punktquelle weg. Quellen: [5], [3]	9
2.2	Ausbreitung einer Zylinderwelle von einer Linienquelle weg. Quellen: [5], [3]	10
2.3	3-Weg Frequenzweiche. Quelle: http://sonardirect.co.uk/applications/sonar-flowmeter	11
2.4	Überlagerung von 2 Punktquellen bei verschiedenen Frequenzen. Quelle: [8]	12
2.5	Vertikales Lautsprechercluster. Quelle: [3]	12
2.6	Vergleich von vertikaler Richtcharakteristik von 2 m langer Linienquelle ohne Waveguide. Quelle: [4]	14
2.7	Vergleich von sphärischer (links) zu kohärenter Abstrahlung (rechts). Quelle: [4]	14
2.8	Vergleich von vertikaler Richtcharakteristik von 2 m langer Linienquelle mit Waveguide. Quelle: [4]	15
2.9	Hydra der Firma ElektroVoice. Quelle: http://pdf.textfiles.com/manuals/STARINMANUALS/Bosch%20-%20EV/XLC%20118,%20XLC%20127.pdf	15
2.10	DOSC-Waveguide der Firma L-Acoustics. Quelle: [6]	16
2.11	Prinzip des parabolischen Reflektors. Quelle: [3]	16
2.12	Funktionsweise eines Bändchenlautsprechers. Quelle: [3]	17
2.13	Curving eines Line-Arrays. Quelle: http://ksaudio.com/ks-audio/line-arrays/autocurve/autocurve.html	18
3.1	Links-Rechts-Aufstellung von Subwoofern. Quelle: [10]	20
3.2	Links-Center-Rechts-Aufstellung von Subwoofern. Quelle: [10]	20
3.3	Center-Aufstellung von Subwoofern. Quelle: [10]	20
3.4	Linien-Aufstellung von Subwoofern. Quelle: [10]	21
3.5	Cardioid-Aufstellung von Subwoofern. Quelle: [10]	21
3.6	Die verschiedenen Möglichkeiten der Verwendung von Fills. Quelle: [10]	22
3.7	Links die Main-PA und rechts das Outfill. Quelle: http://www.prosound.de/pa-beschallung/yamaha-rivage-pm10-mischsystem-im-einsatz/attachment/main-pa	23
3.8	Skizze einer Delayline.	24
3.9	Vergleich von PA-Aufstellungen. Quelle: [12]	24
3.10	Einfluss der Temperatur. Quelle: [13]	25
3.11	Einfluss der Luftfeuchtigkeit. Quelle: [13]	25
3.12	Einfluss des Windes. Quelle: [13]	25
4.1	Software <i>EASE</i> . Quelle: [14]	27
4.2	Oberfläche des <i>d&b ArrayCalc</i> . Quelle: [21]	28
4.3	Ein <i>d&b V7P</i> -Lautsprecher. Quelle: [19]	29
4.4	Ein Line Array bestehend aus 4 <i>d&b V8</i> -Lautsprechern. Quelle: [19]	30
4.5	Ein <i>d&b GSL8</i> -Lautsprecher. Quelle: [19]	31
4.6	Der Aufbau des VHD 5.0 der Firma KV2 Audio. Quelle: [16]	32
4.7	3D-Plot des kleinen Raumes, exportiert aus <i>EASE</i> .	35
4.8	Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.	37
4.9	Direkter SPL bei 1000 Hz.	37
4.10	3D-Plot des mittelgroßen Raumes, exportiert aus <i>EASE</i> .	38
4.11	Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.	40
4.12	Direkter SPL bei 1000 Hz.	41
4.13	3D-Plot des großen Raumes, exportiert aus <i>EASE</i> .	42
4.14	Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.	44
4.15	Direkter SPL bei 1000 Hz.	45
4.16	Direkter SPL bei 1000 Hz.	45
4.17	3D-Plot der Kirche, exportiert aus <i>EASE</i> .	46

4.18 Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.	48
4.19 Direkter SPL bei 1000 Hz.	48
4.20 3D-Plot des Open Air Geländes, exportiert aus EASE.	49
4.21 Direkter SPL über den gesamten Frequenzverlauf.	51
4.22 Direkter SPL bei 1000 Hz.	51

Tabellenverzeichnis

4.1	Kennwerte der Punktschallquellen der <i>d&b V-Serie</i>	29
4.2	Kennwerte der Lautsprecher des Line-Arrays der <i>d&b V-Serie</i>	30
4.3	Kennwerte der Lautsprecher des Line-Arrays der <i>d&b SL-Serie</i>	31
4.4	Position der Systeme im kleinen Raum.	36
4.5	Konfiguration des Line Arrays im kleinen Raum.	36
4.6	Position der Systeme im mittelgroßen Raum.	39
4.7	Konfiguration des Line Arrays im mittelgroßen Raum.	39
4.8	Position der Systeme in der großen Veranstaltungshalle.	43
4.9	Konfiguration des Line Arrays in der großen Veranstaltungshalle.	43
4.10	Position der Systeme in einer Kirche.	47
4.11	Konfiguration des Line Arrays in einer Kirche.	47
4.12	Position der Systeme Open Air.	50
4.13	Konfiguration des Main Line Arrays Open Air.	50
4.14	Konfiguration des Sidefill Line Arrays Open Air.	51

A

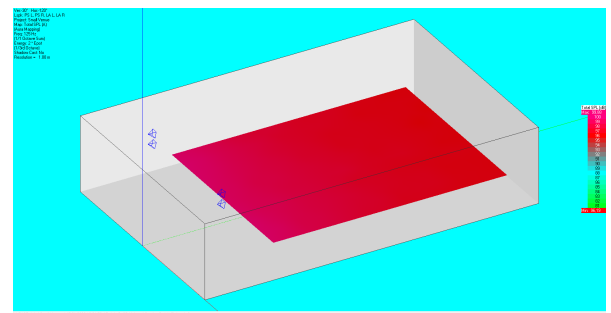
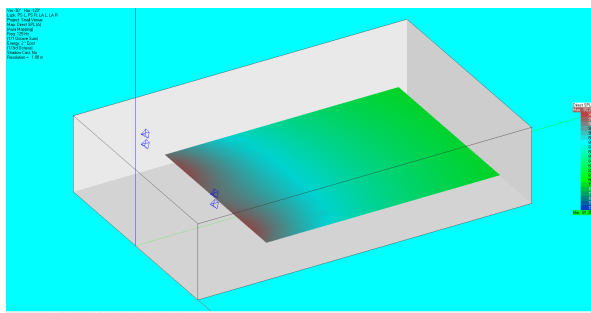
Anhang

Kleiner Raum

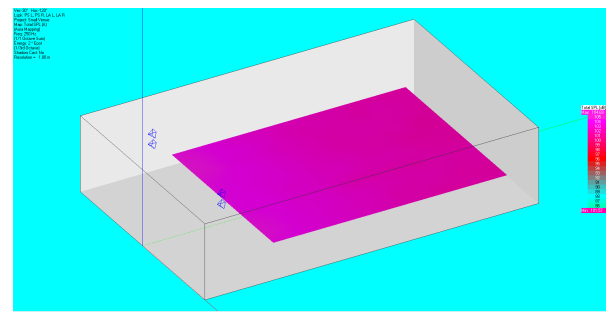
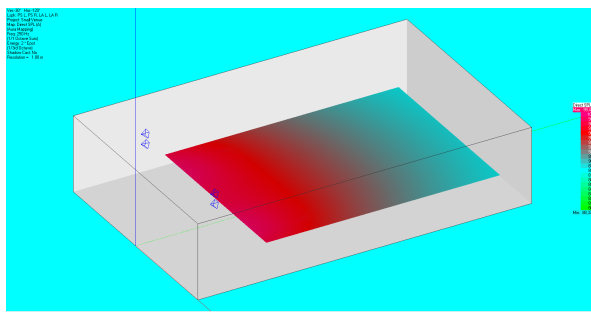
Punktschallquelle

SPL

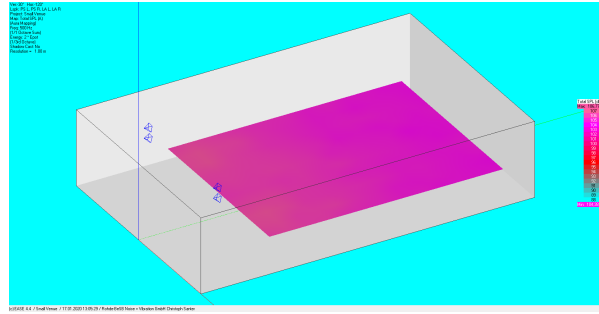
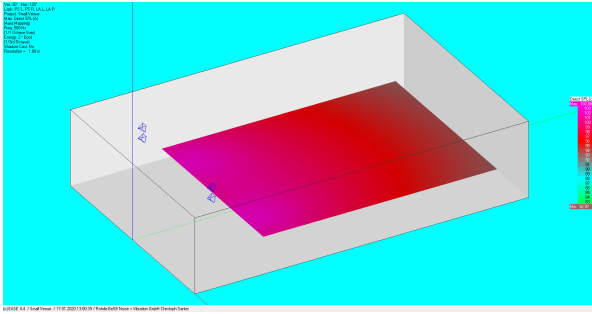
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



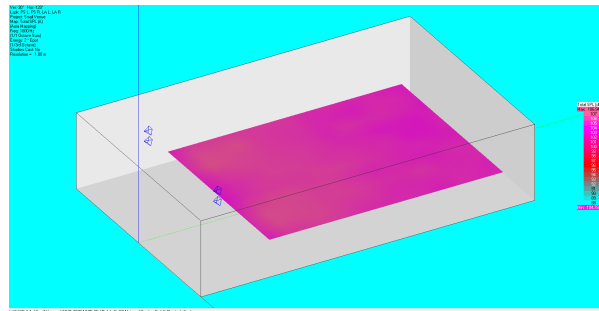
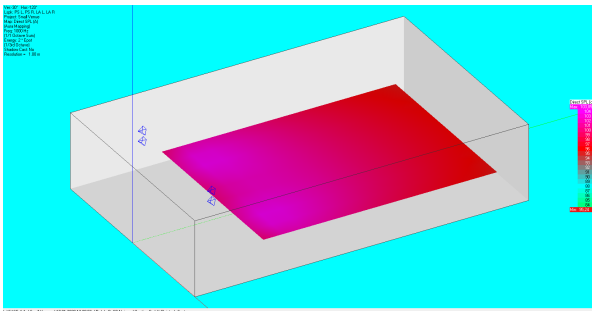
125 Hz



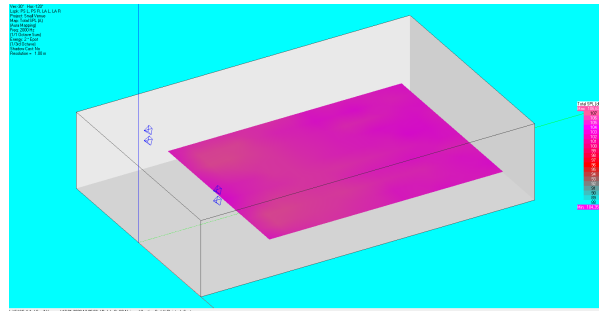
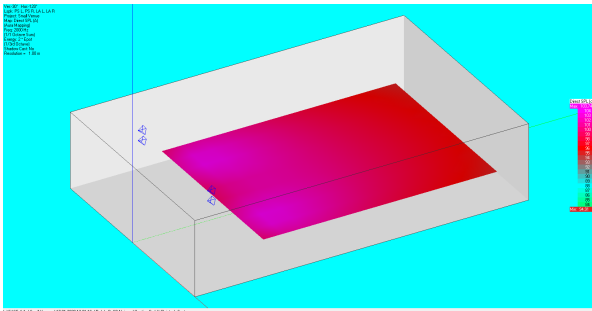
250 Hz



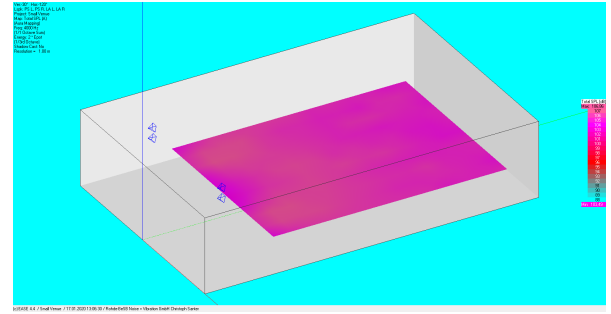
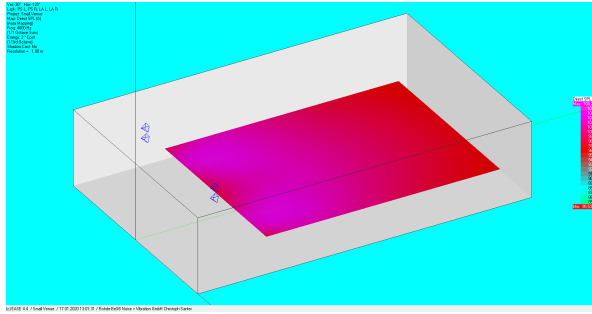
500 Hz



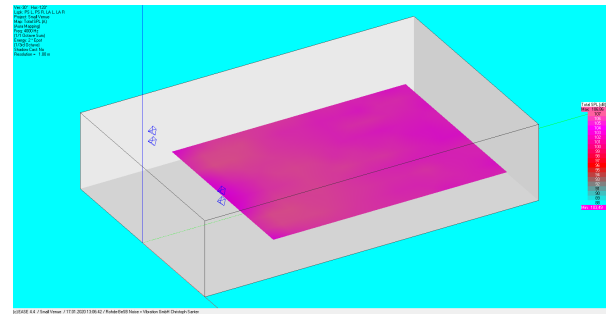
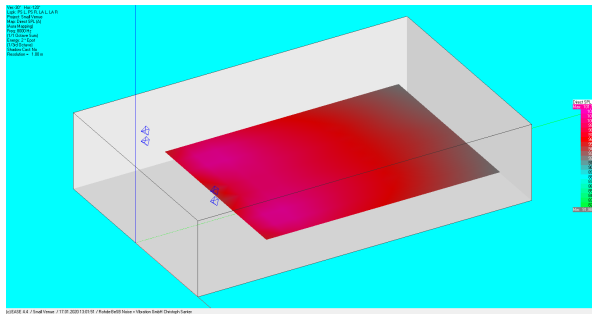
1000 Hz



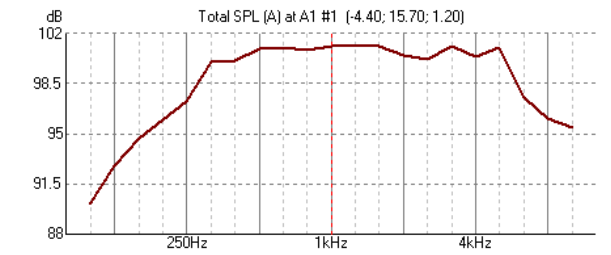
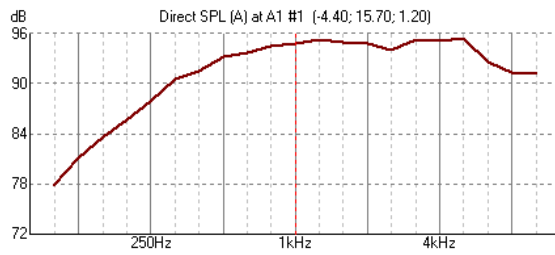
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz

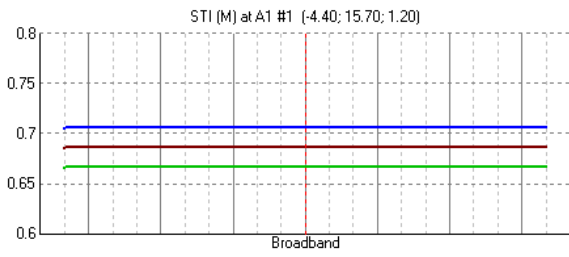


(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:23:48 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

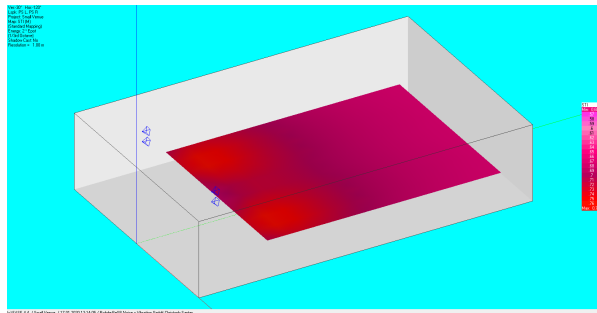
(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:24:01 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

SPL overall

STI

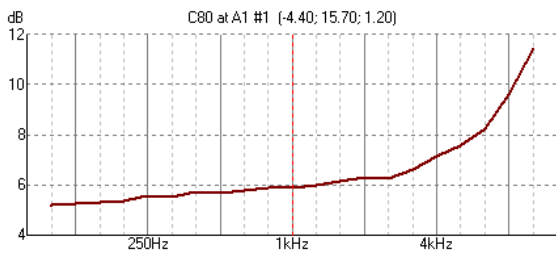


(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:24:31 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

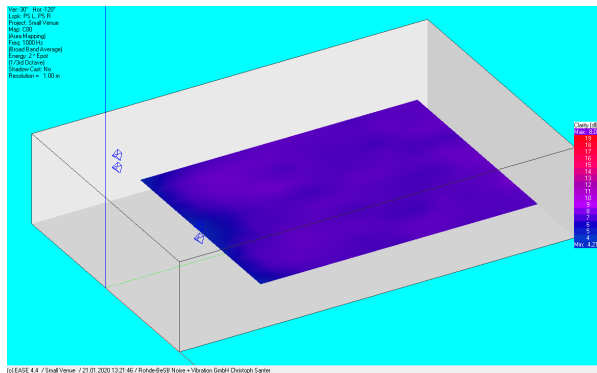


STI

C80



(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:24:14 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

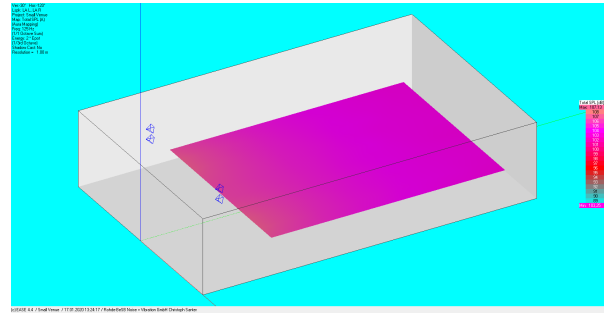
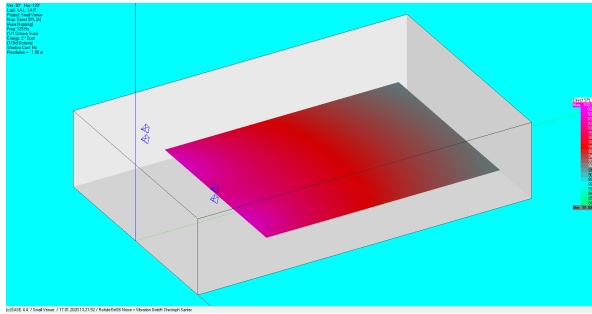


C80

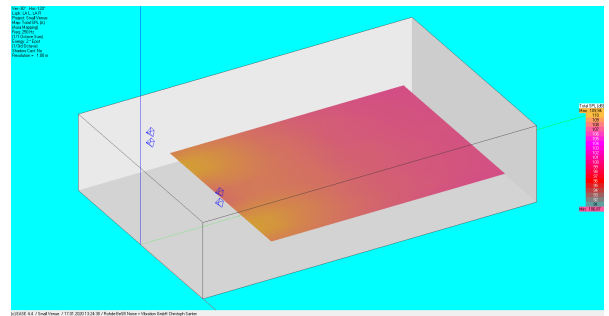
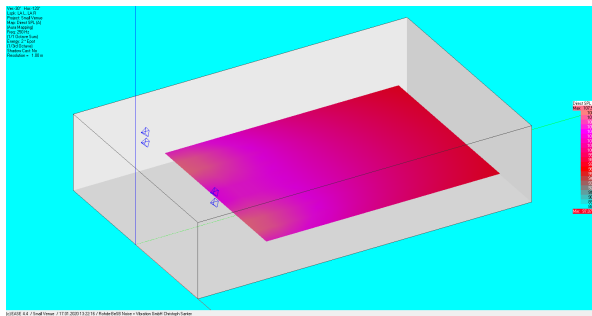
Line Array

SPL

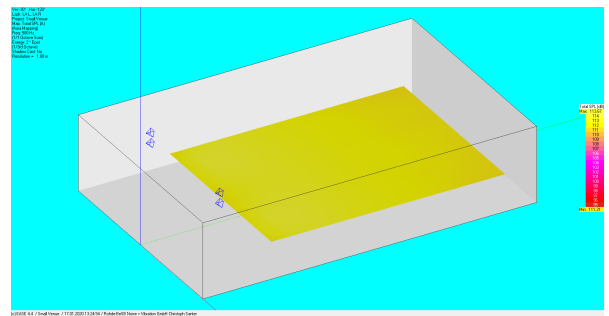
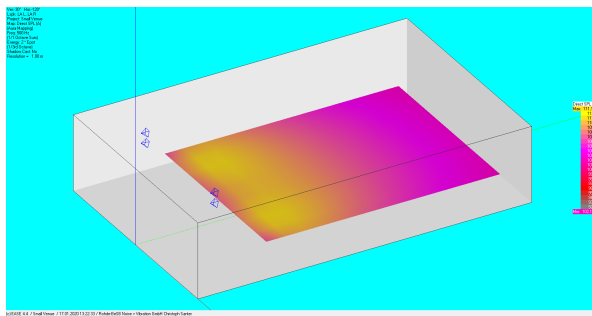
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



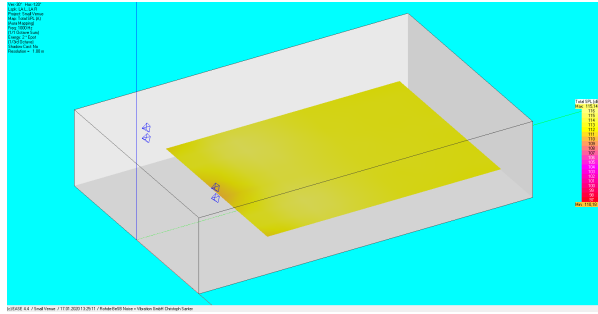
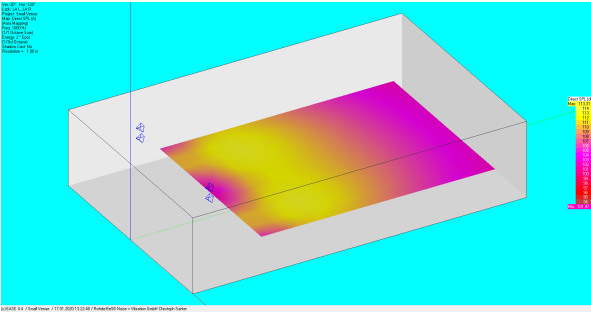
125 Hz



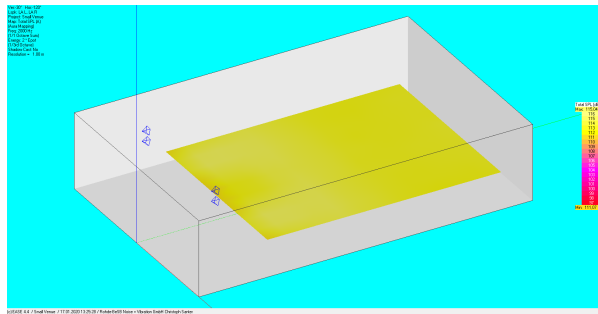
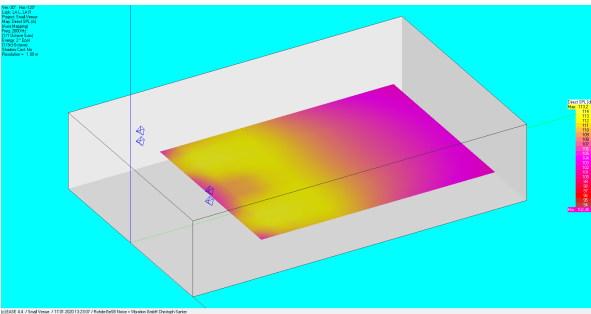
250 Hz



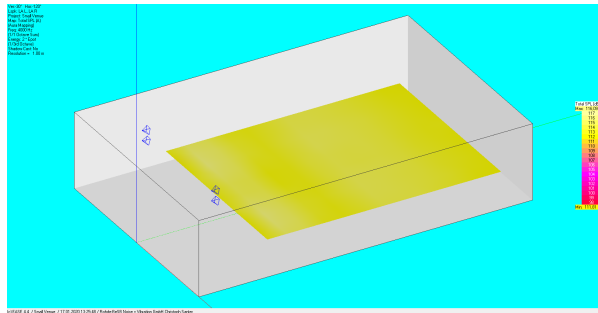
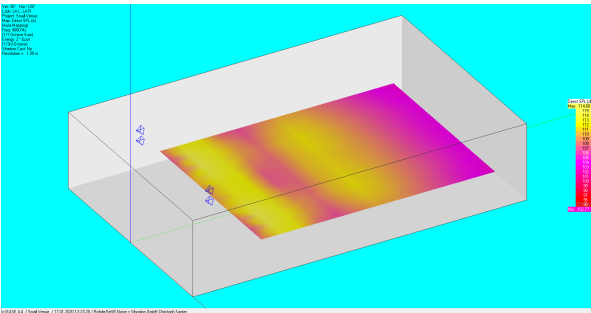
500 Hz



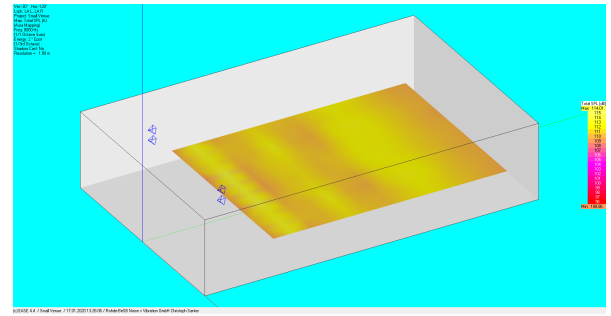
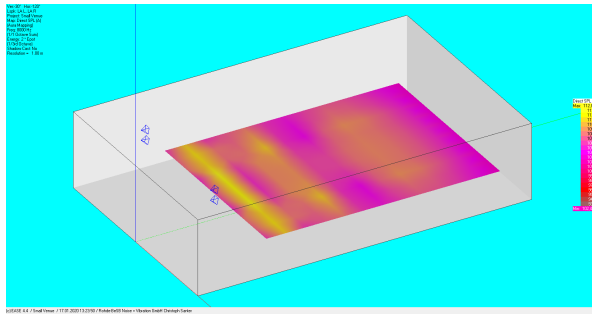
1000 Hz



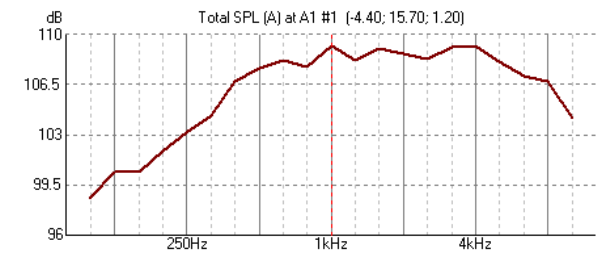
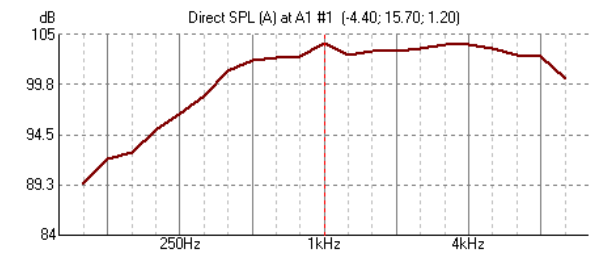
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz

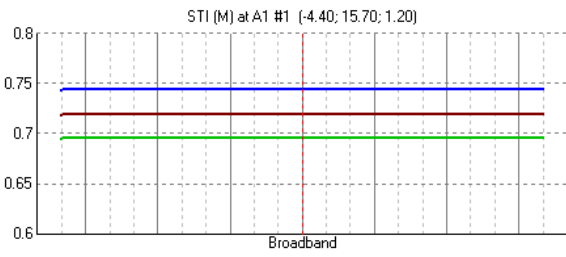


(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:25:45 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

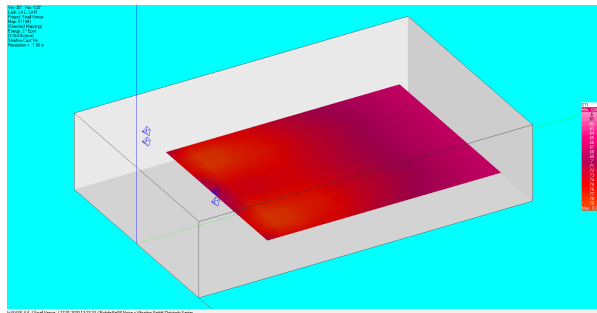
(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:25:32 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

SPL overall

STI

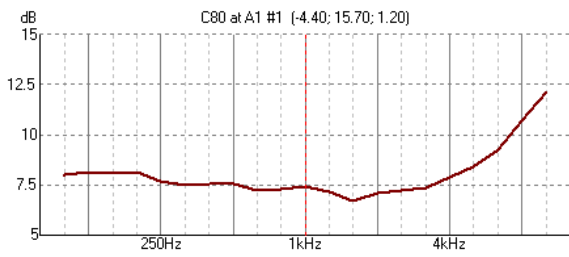


(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:24:54 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch

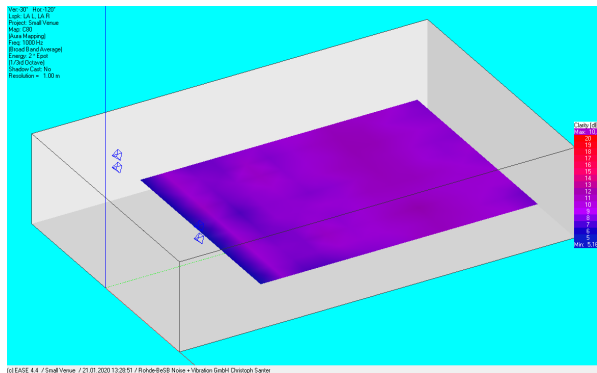


STI

C80



(c) EASE 4.4 / Small Venue / 22.01.2020 16:25:14 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Ch



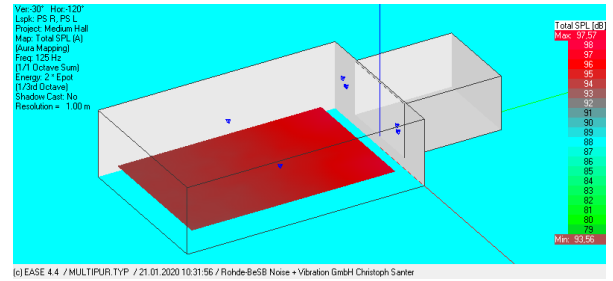
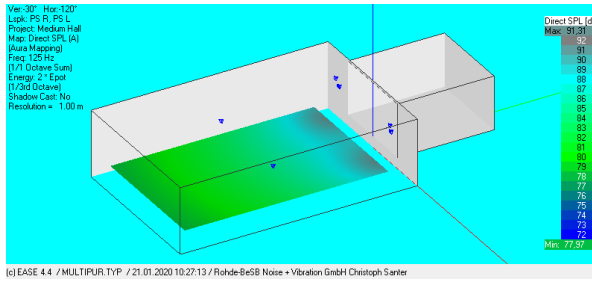
C80

Mittlerer Raum

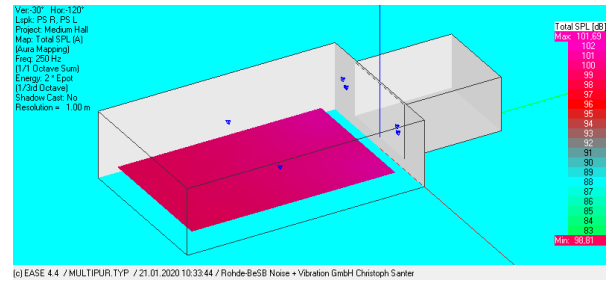
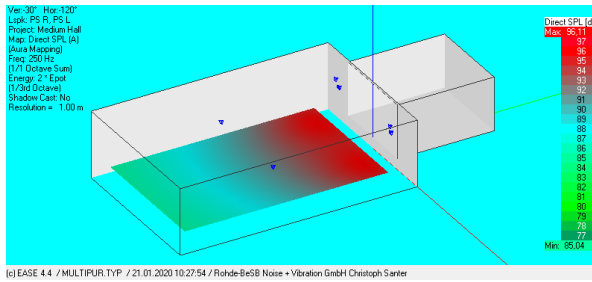
Punktschallquelle Setup 1

SPL

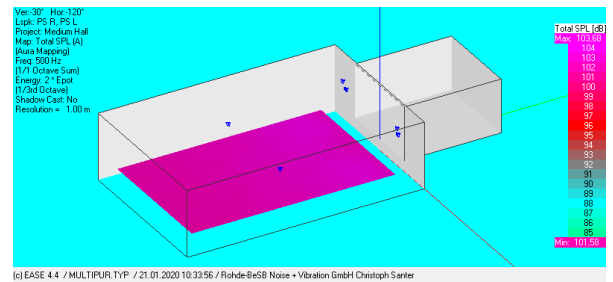
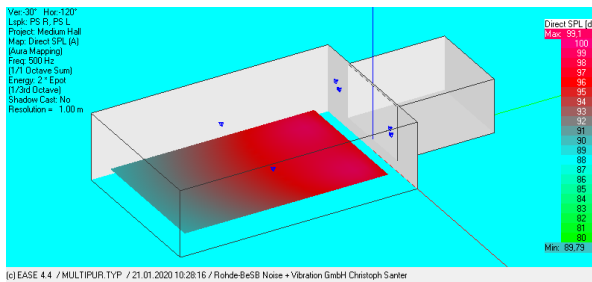
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



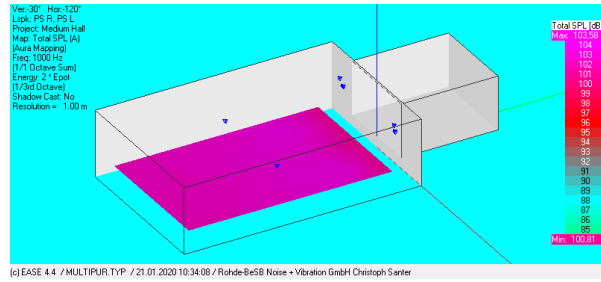
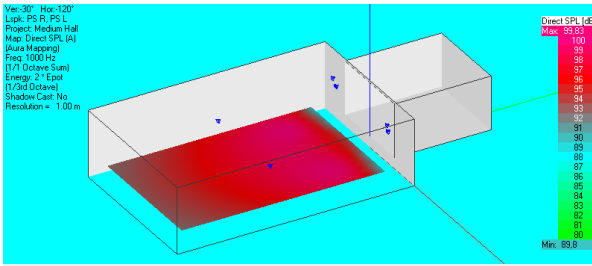
125 Hz



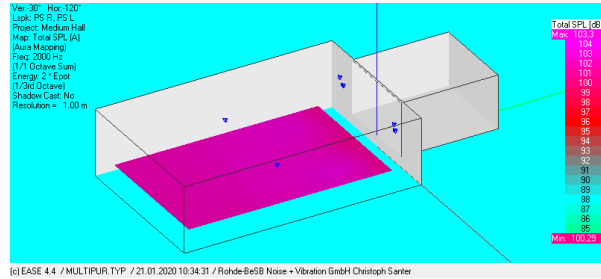
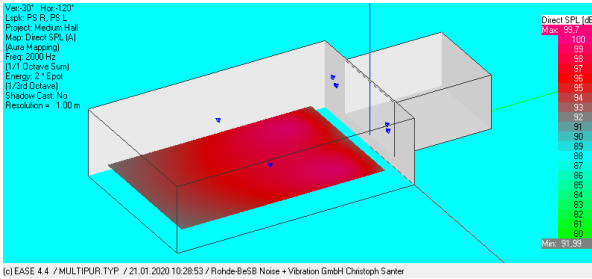
250 Hz



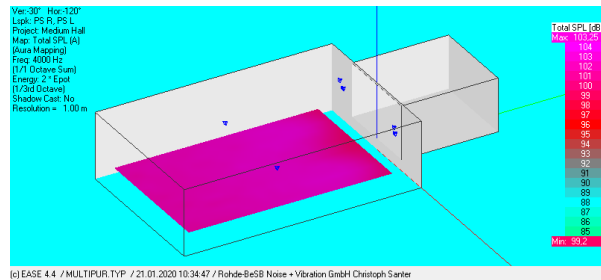
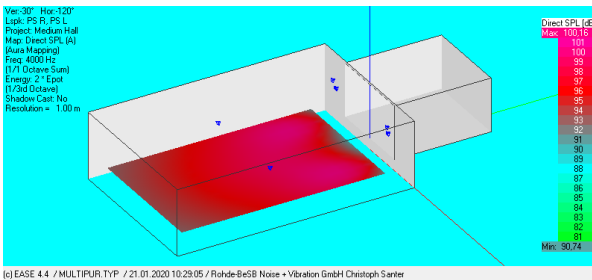
500 Hz



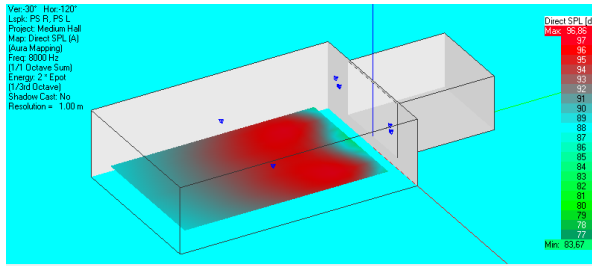
1000 Hz



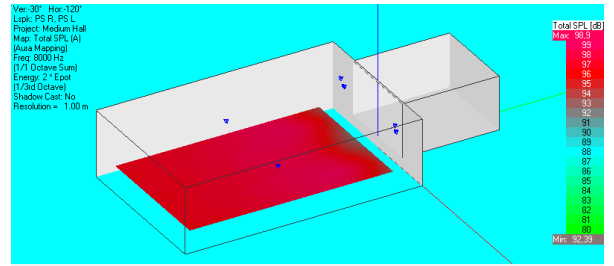
2000 Hz



4000 Hz

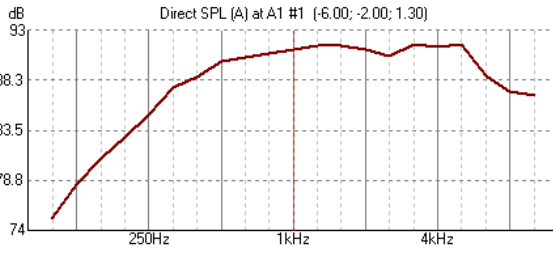


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:29:26 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

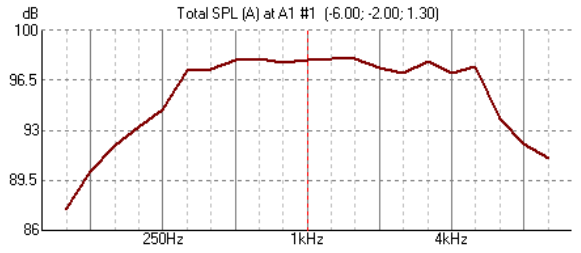


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:35:03 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

8000 Hz



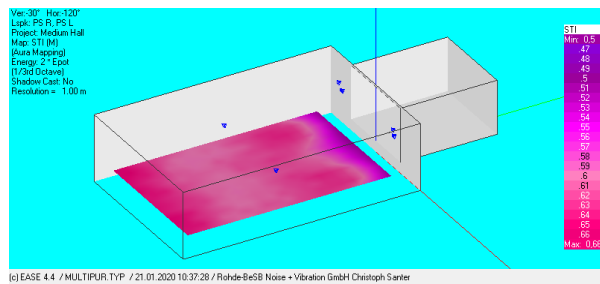
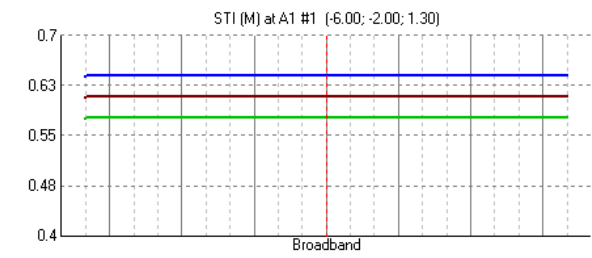
(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:20:55 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:20:39 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI

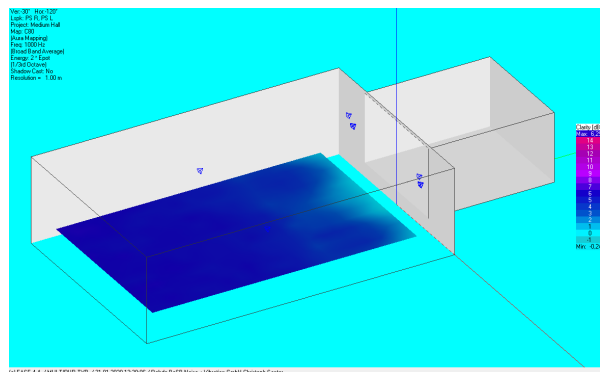
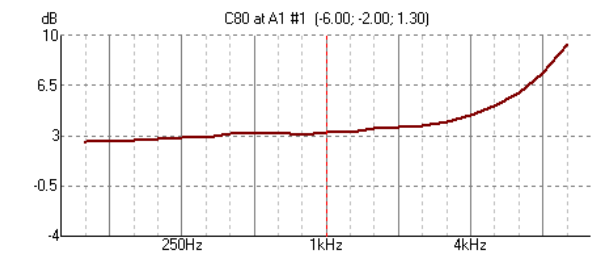


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:20:05 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:37:28 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

STI

C80



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:20:23 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

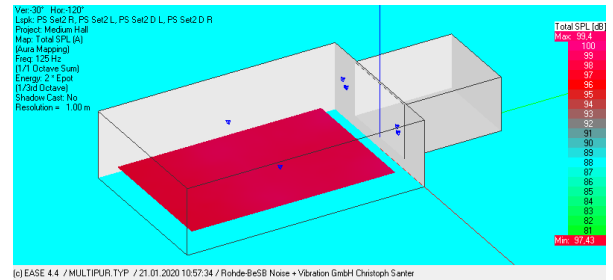
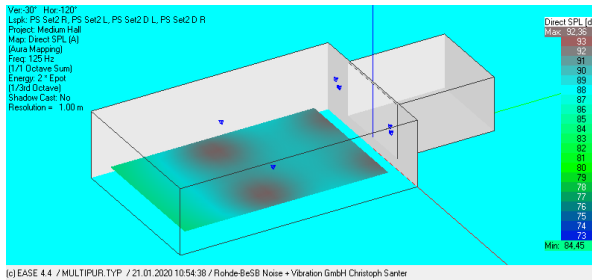
(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:37:28 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

C80

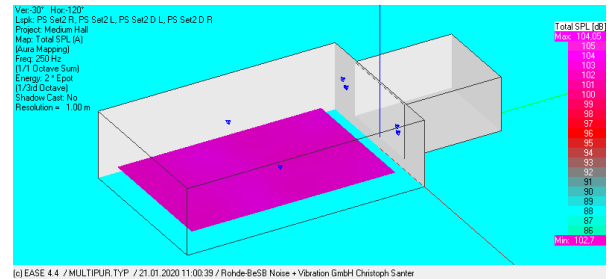
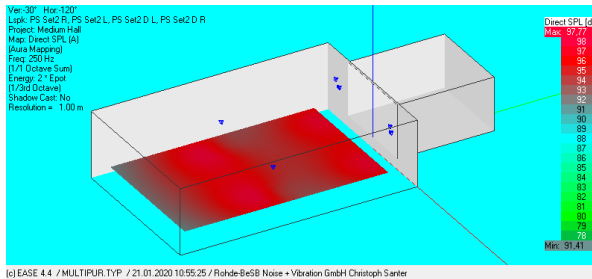
Punktschallquelle Setup 2

SPL

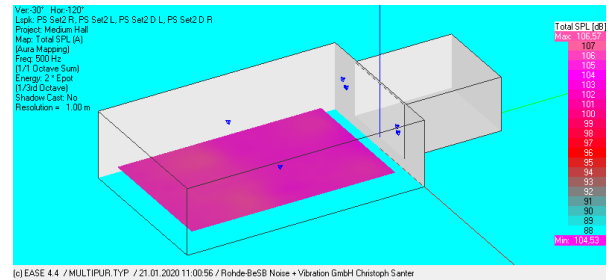
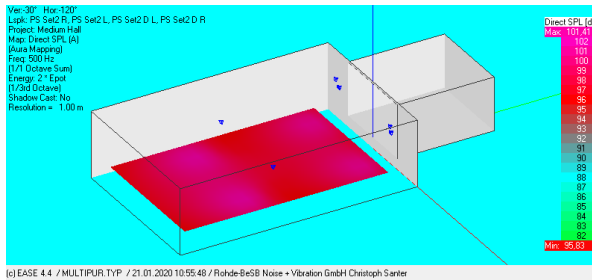
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



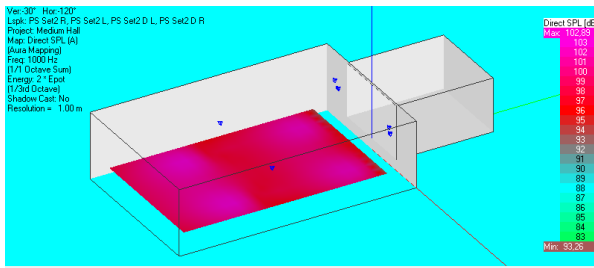
125 Hz



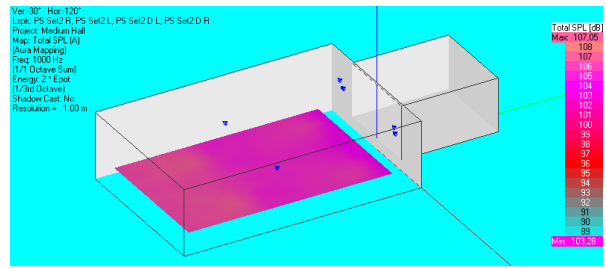
250 Hz



500 Hz

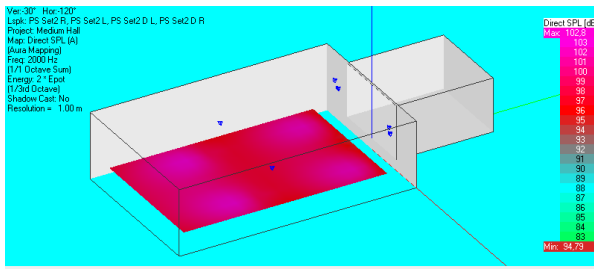


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:56:05 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

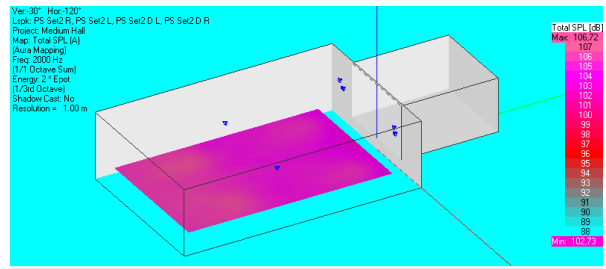


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:01:13 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

1000 Hz

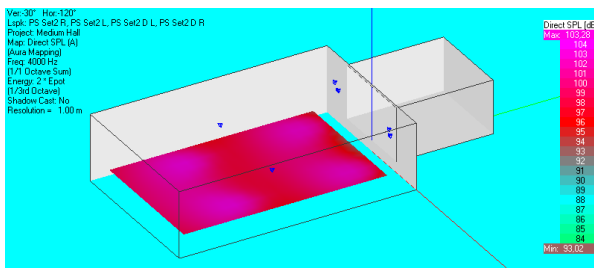


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:56:16 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

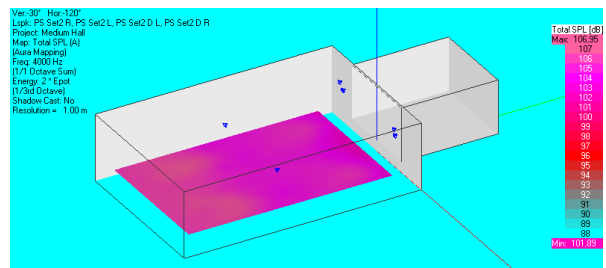


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:01:26 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

2000 Hz

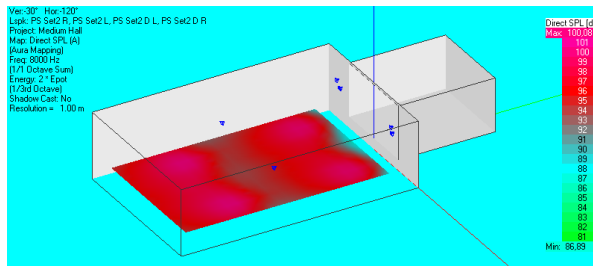


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:56:34 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

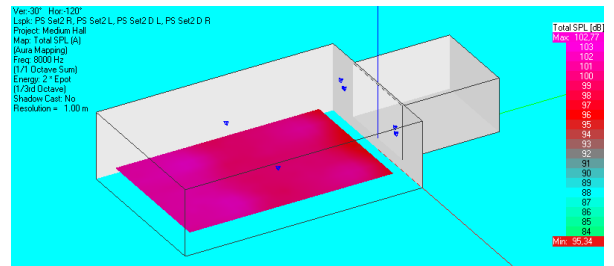


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:01:36 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

4000 Hz

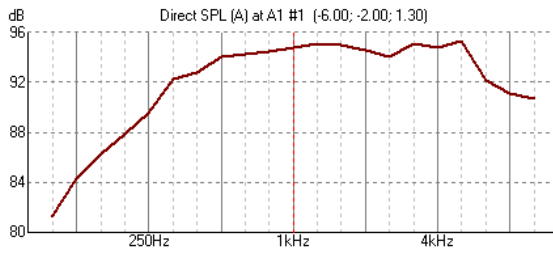


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 10:56:46 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

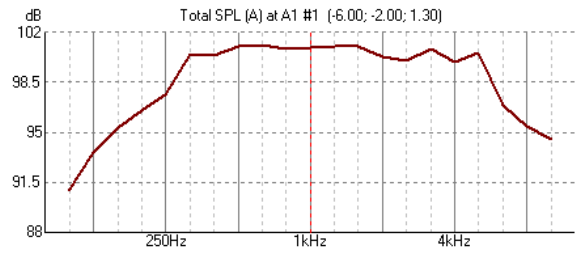


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:01:55 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

8000 Hz



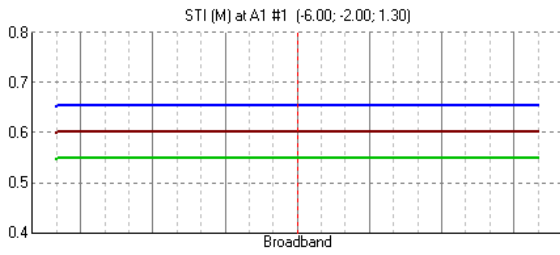
(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:21:17 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



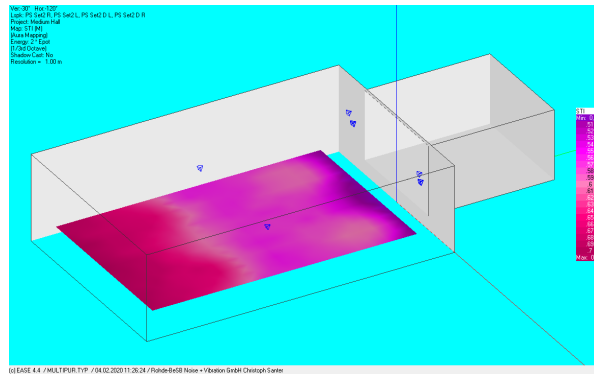
(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:21:28 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI

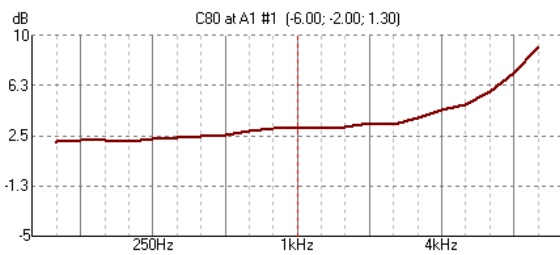


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 04.02.2020 11:25:56 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

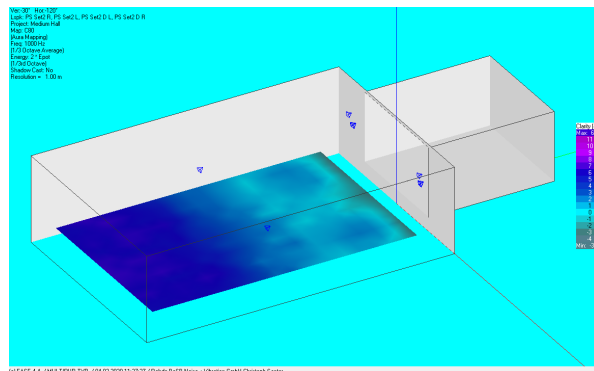


STI

C80



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 04.02.2020 11:26:52 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

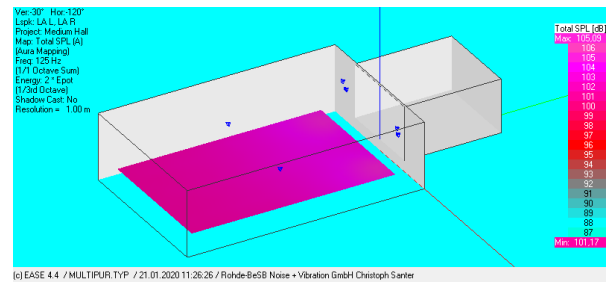
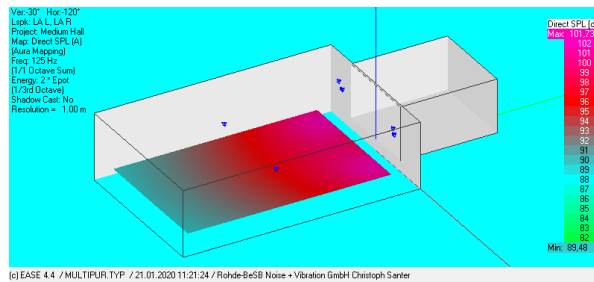


C80

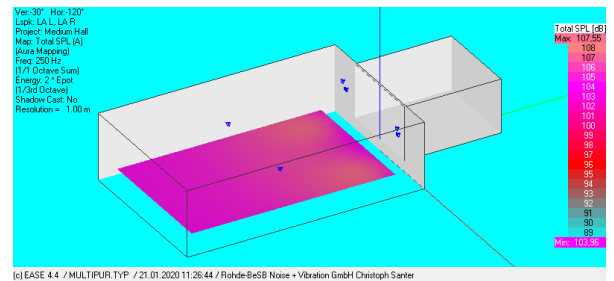
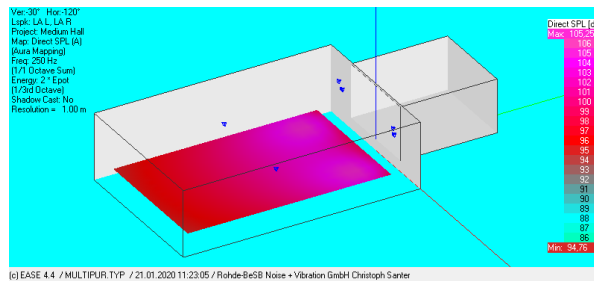
Line Array

SPL

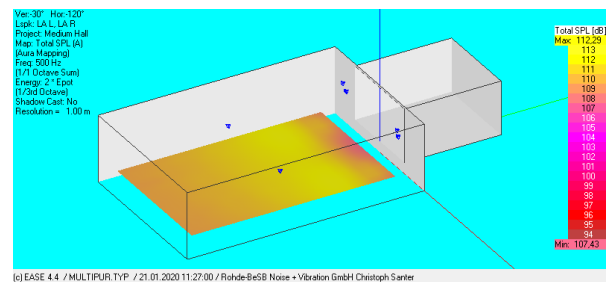
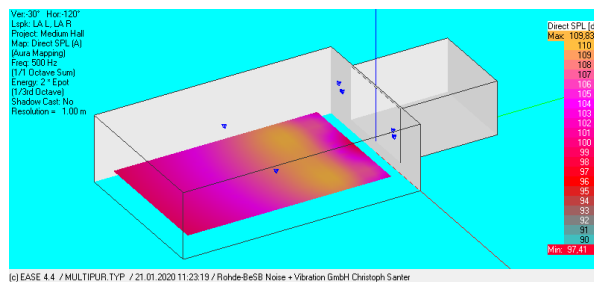
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



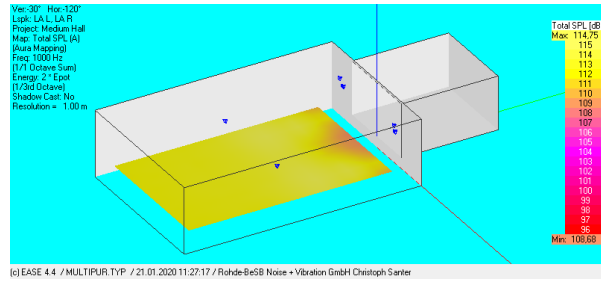
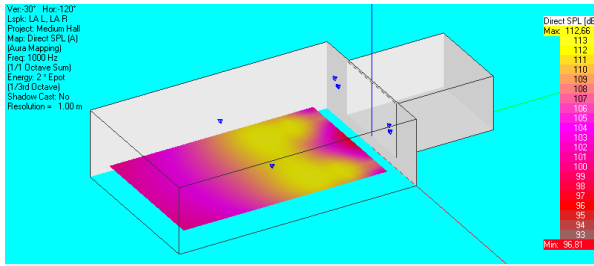
125 Hz



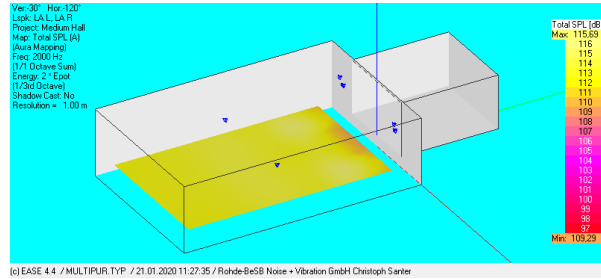
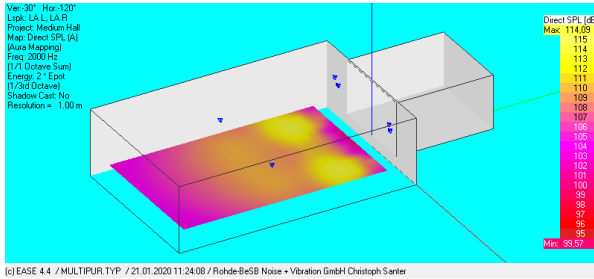
250 Hz



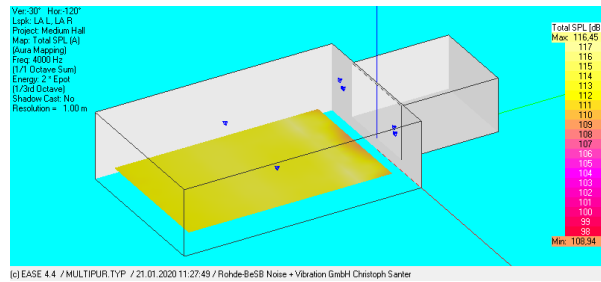
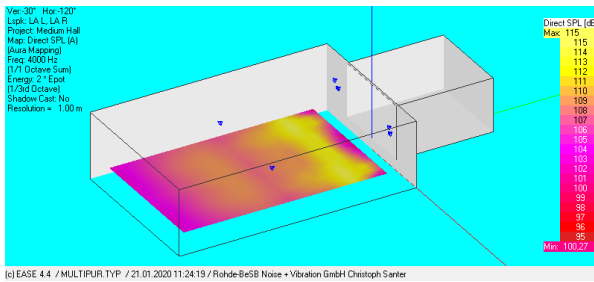
500 Hz



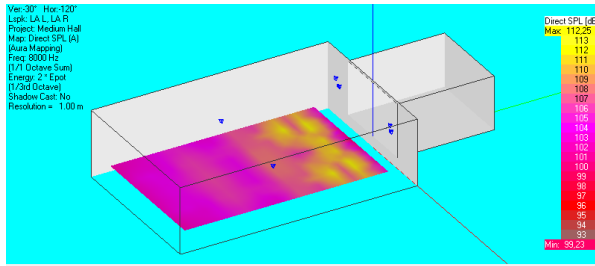
1000 Hz



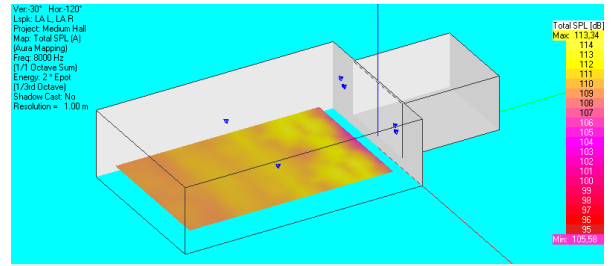
2000 Hz



4000 Hz

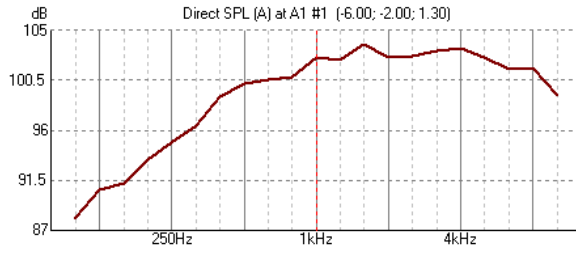


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:24:34 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

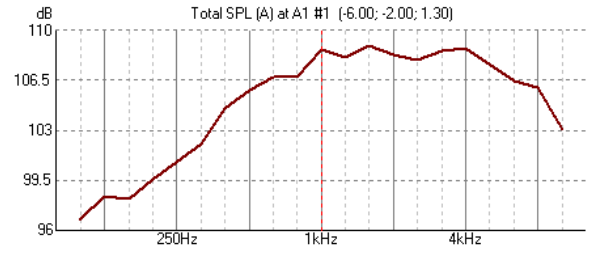


(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 21.01.2020 11:28:02 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

8000 Hz



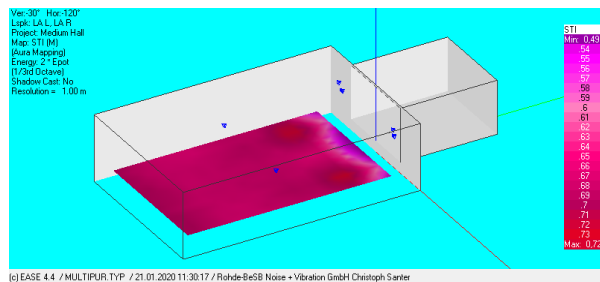
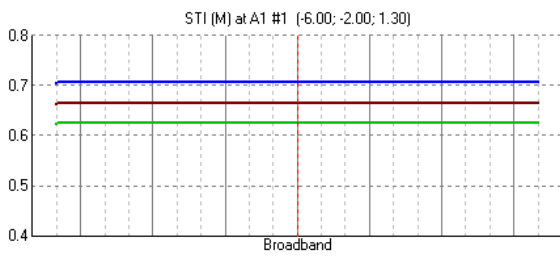
(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:18:44 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:19:04 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

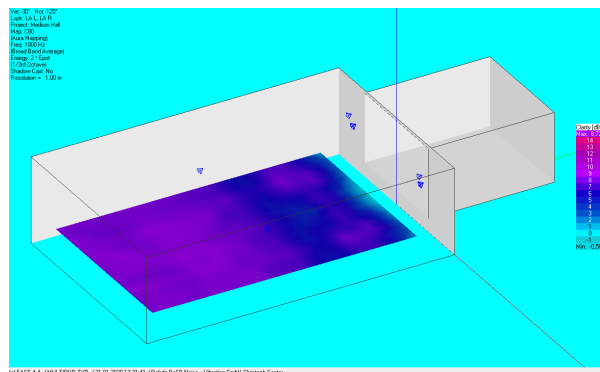
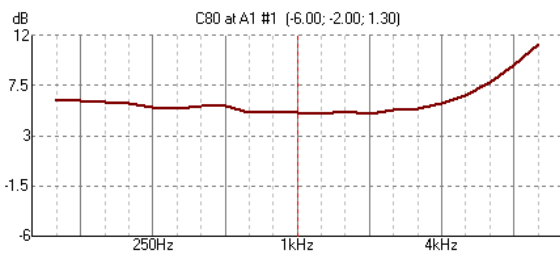
STI



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:19:47 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

STI

C80



(c) EASE 4.4 / MULTIPUR.TYP / 22.01.2020 16:19:30 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

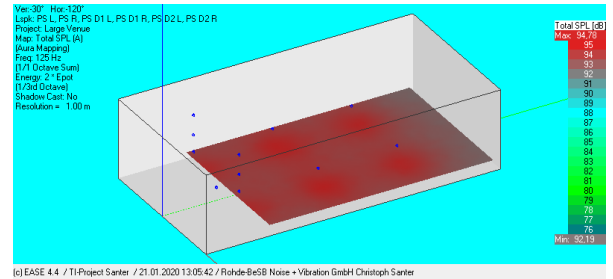
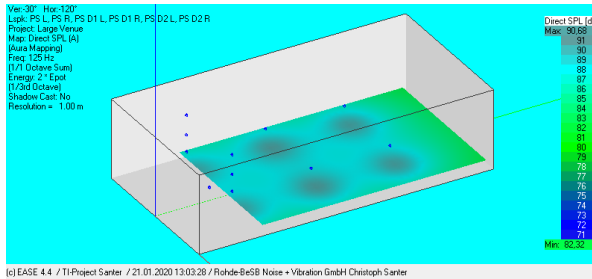
C80

Großer Raum

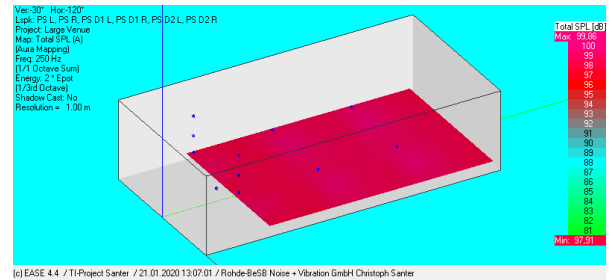
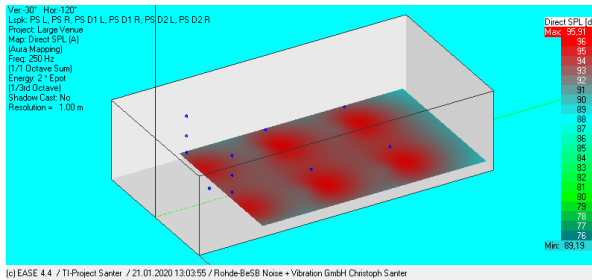
Punktschallquelle

SPL

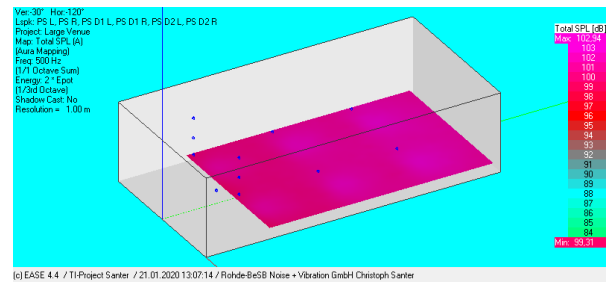
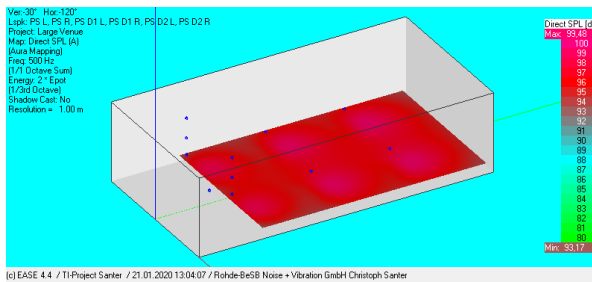
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



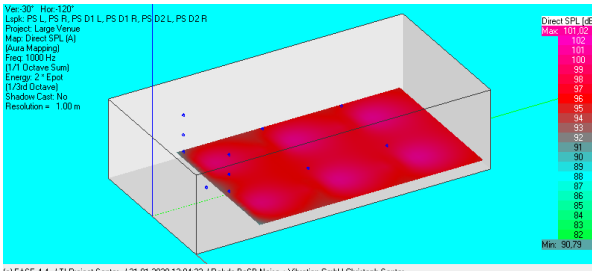
125 Hz



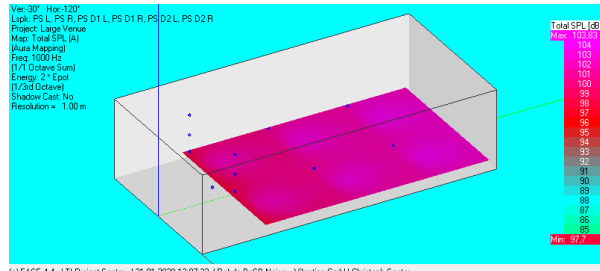
250 Hz



500 Hz

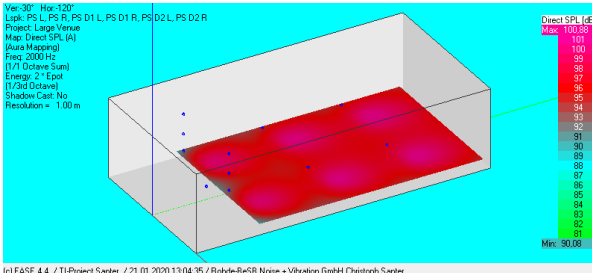


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:04:23 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

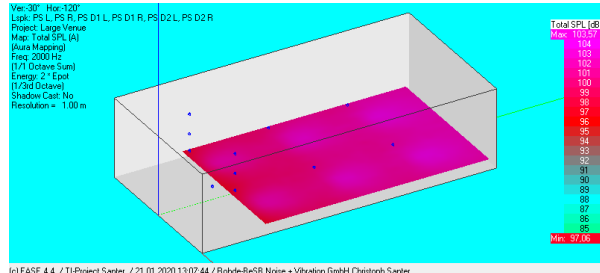


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:07:32 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

1000 Hz

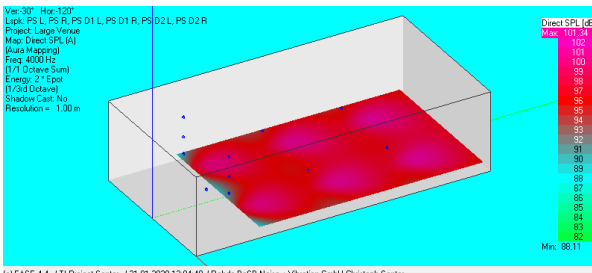


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:04:35 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

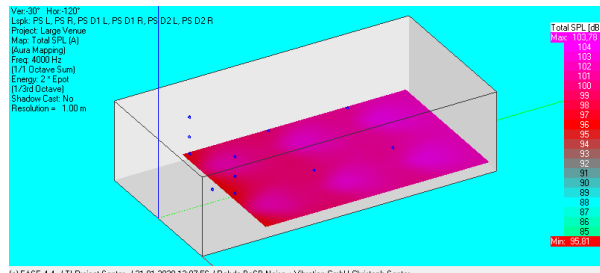


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:07:44 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

2000 Hz

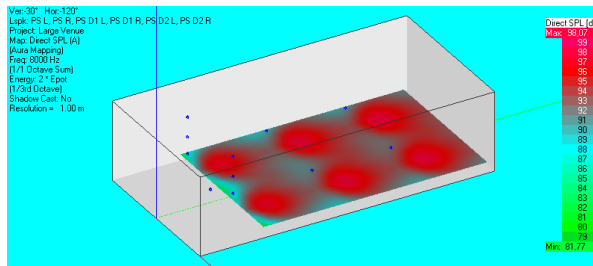


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:04:48 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

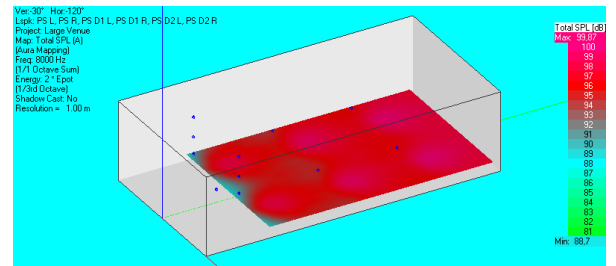


(c) EASE 4.4 / TI/Project Sarter / 21.01.2020 13:07:56 / Rohde-Be5B Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

4000 Hz

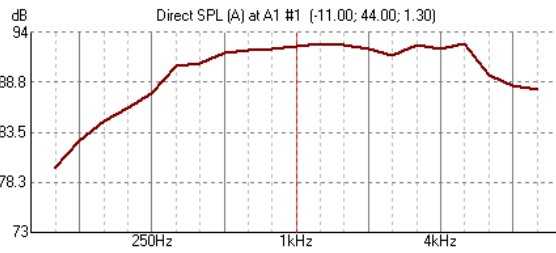


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 21.01.2020 13:05:05 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

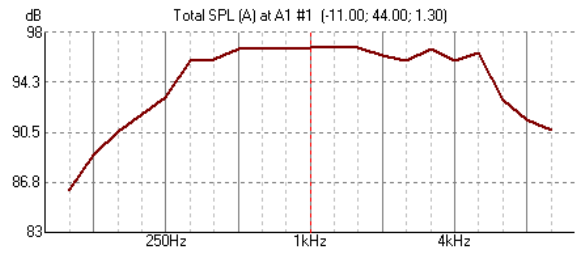


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 21.01.2020 13:08:06 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

8000 Hz



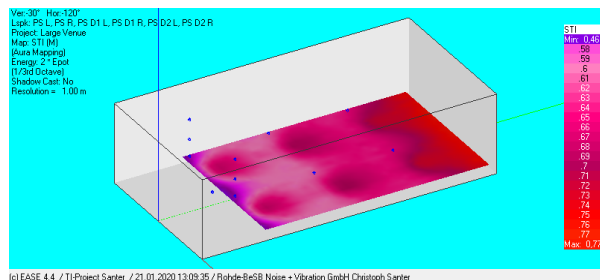
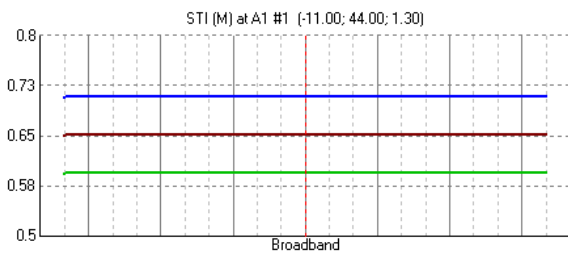
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:13:15 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:13:31 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI

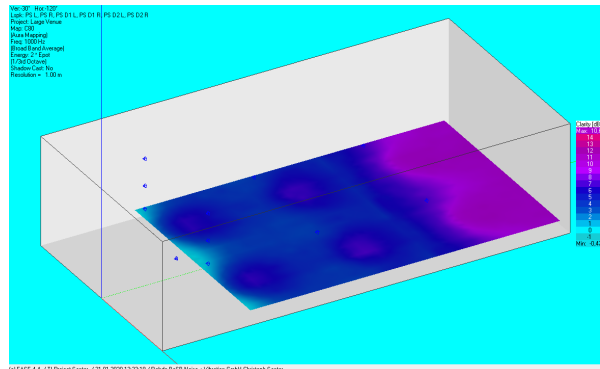
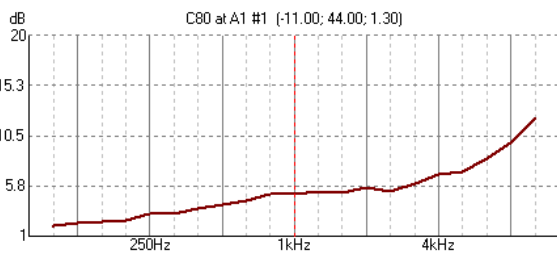


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:14:07 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

(b) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 21.01.2020 13:09:35 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

STI

C80



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:13:49 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

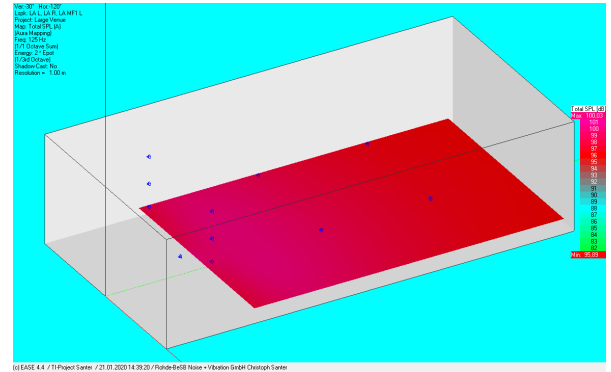
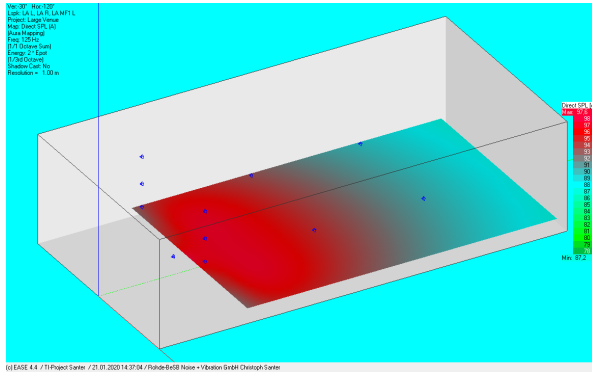
(b) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 13:19 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

C80

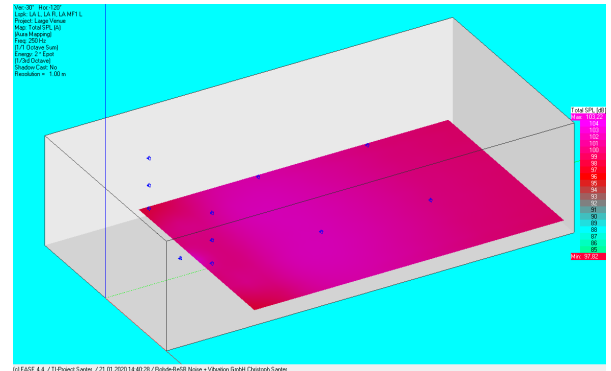
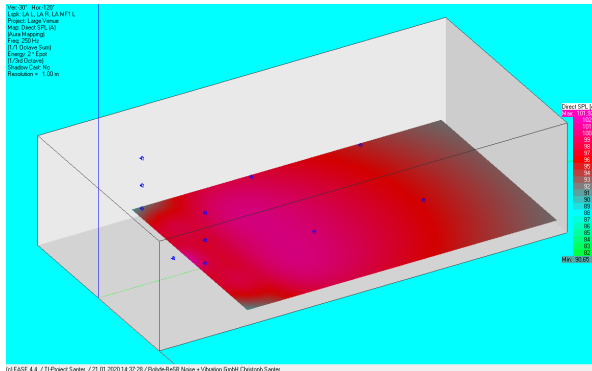
Line Array

SPL

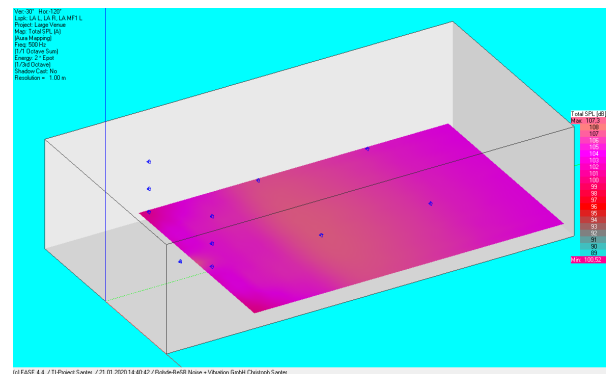
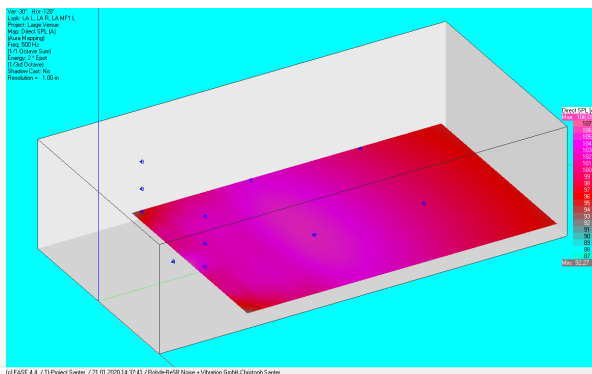
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



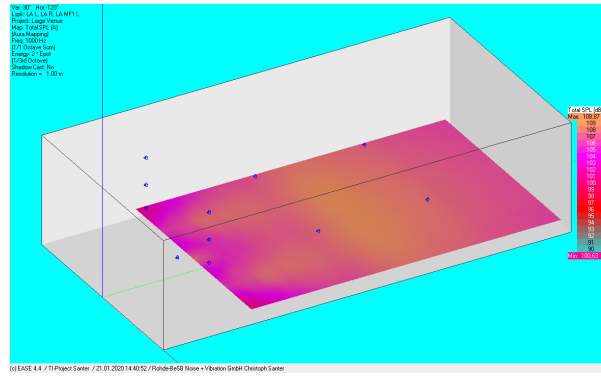
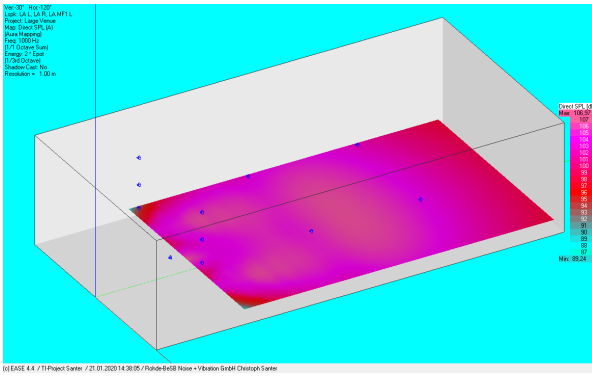
125 Hz



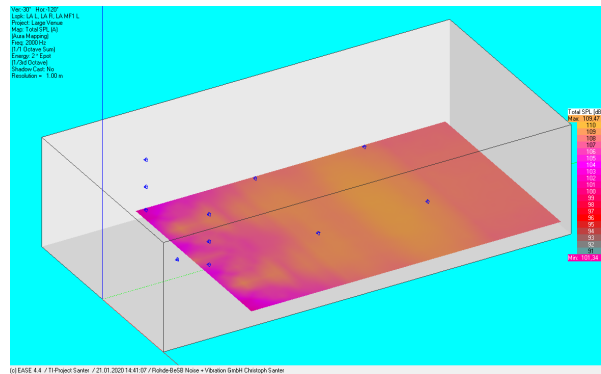
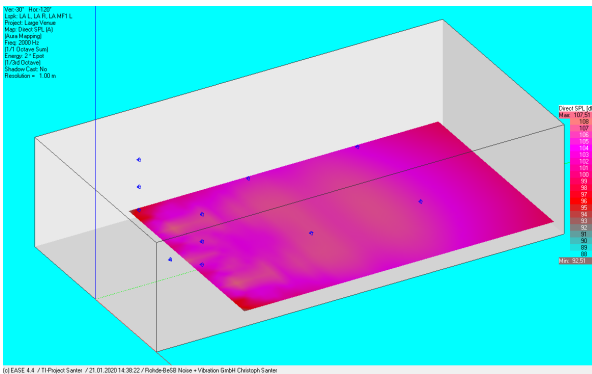
250 Hz



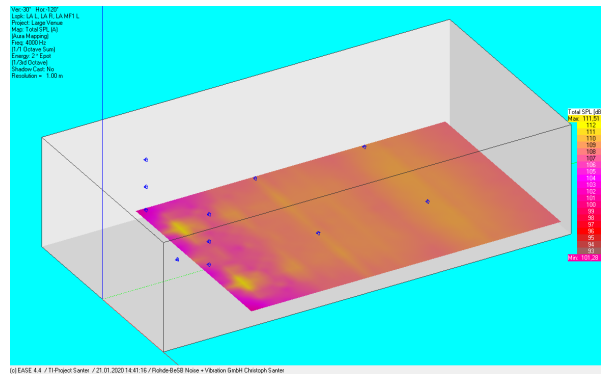
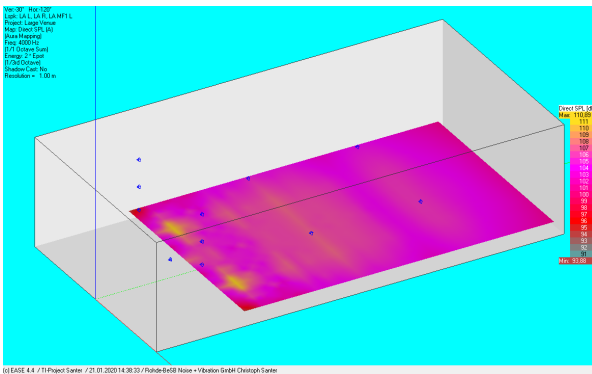
500 Hz



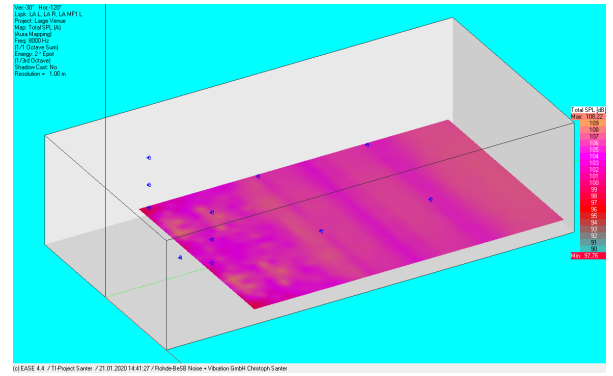
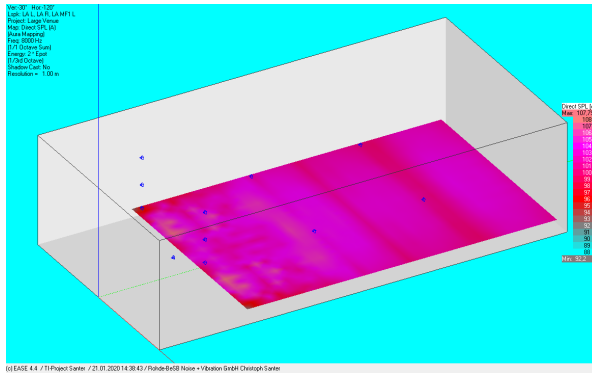
1000 Hz



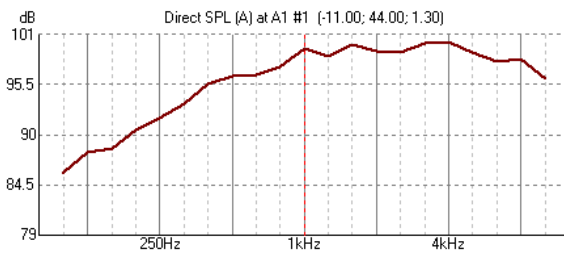
2000 Hz



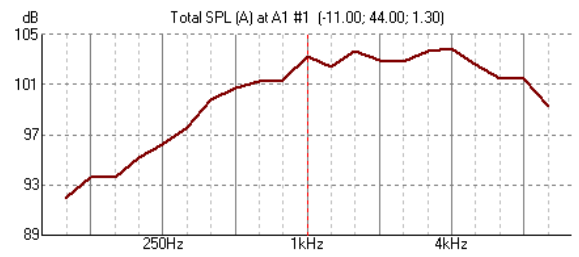
4000 Hz



8000 Hz



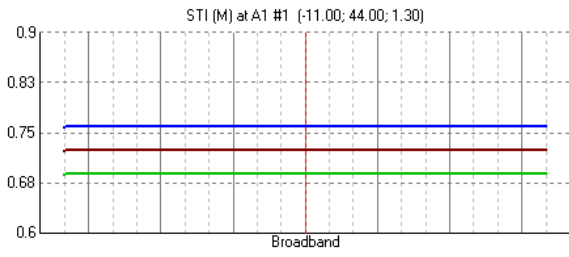
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:16:03 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



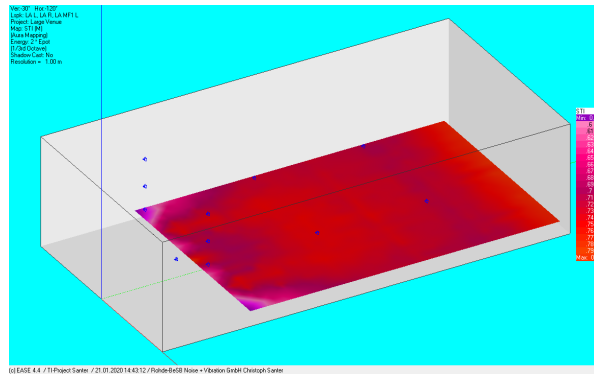
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:15:46 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI

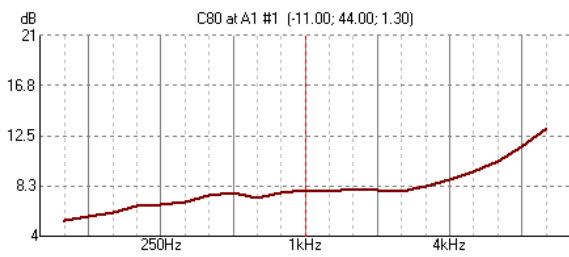


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:15:00 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

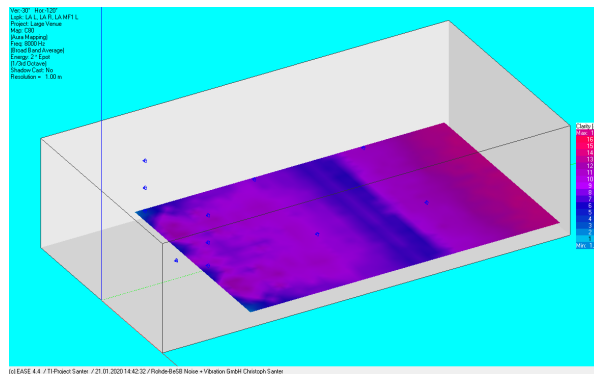


STI

C80



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:15:22 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

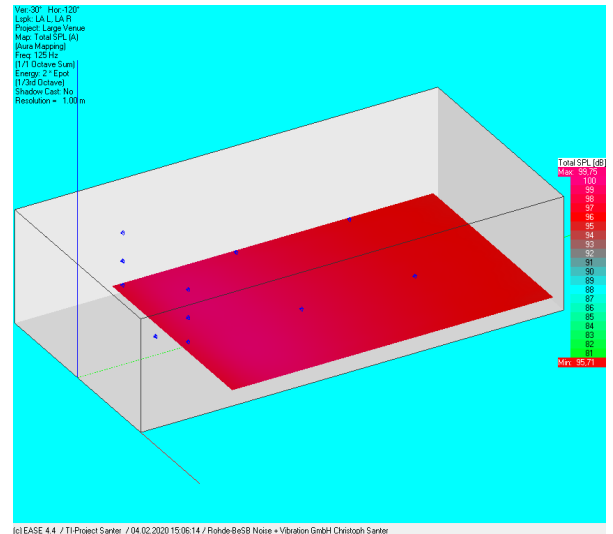
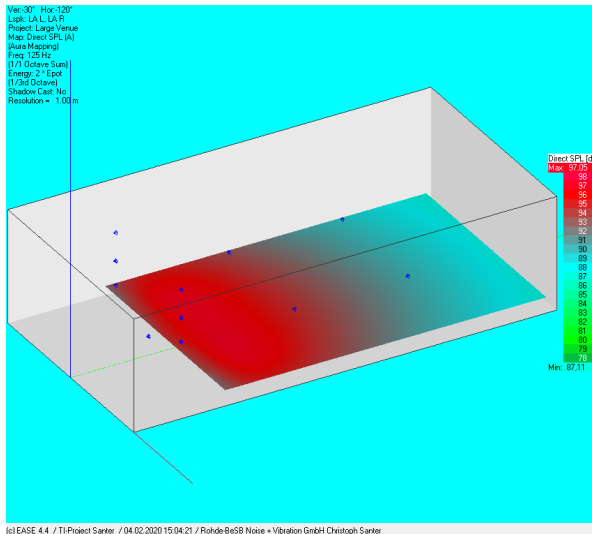


C80

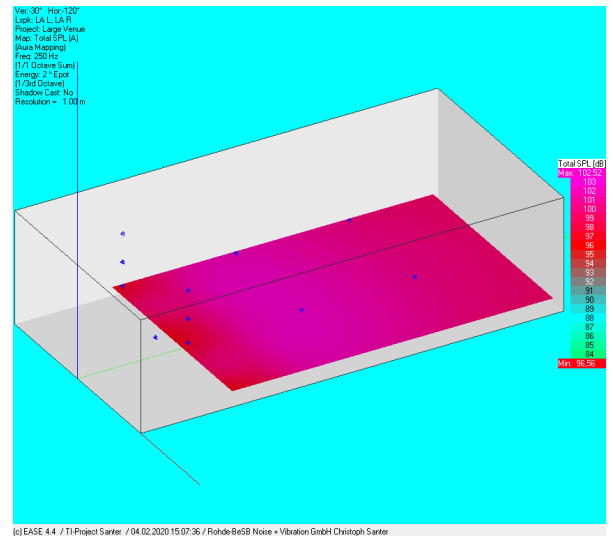
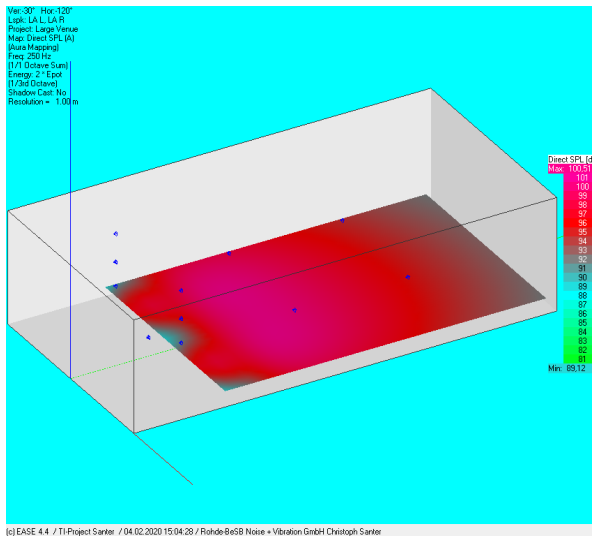
Line Array

SPL

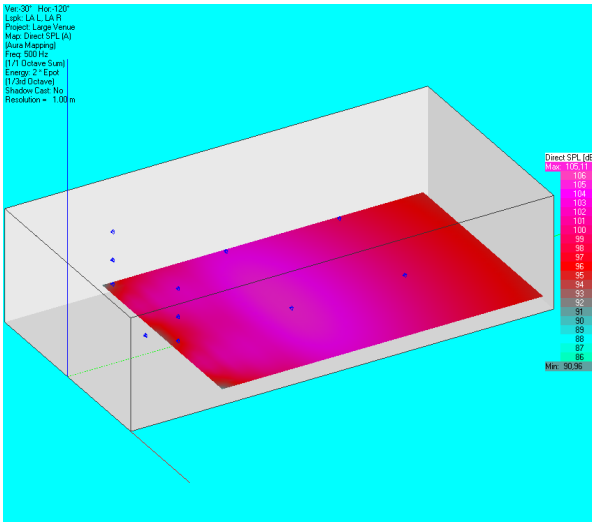
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



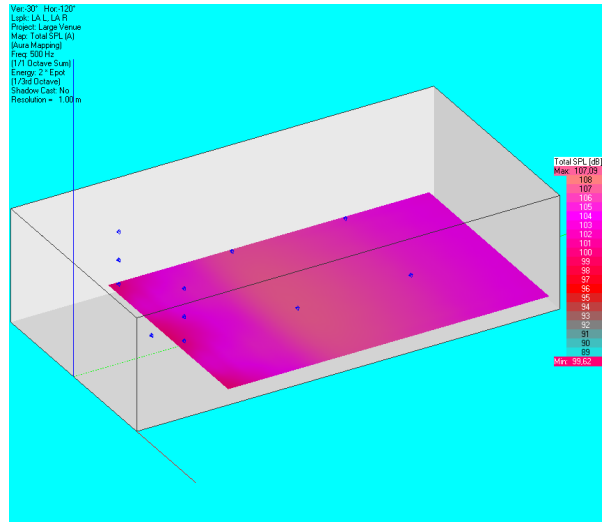
125 Hz



250 Hz

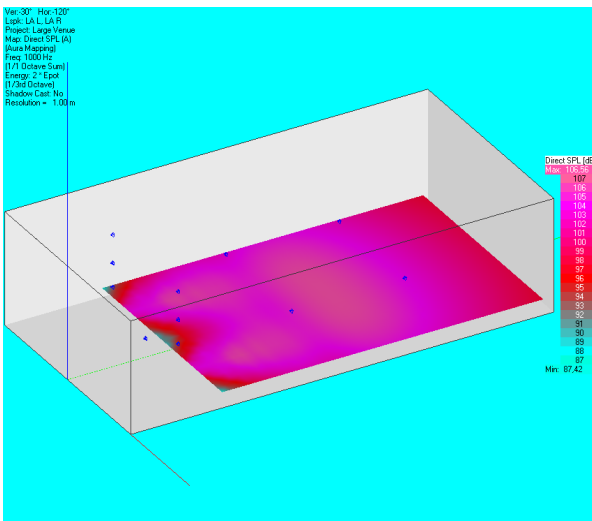


(c) EASE 4.4 / TI-Project Sanker / 04.02.2020 15:04:37 / Rihde-BesB Noise + Vibration GmbH Christoph Sanker

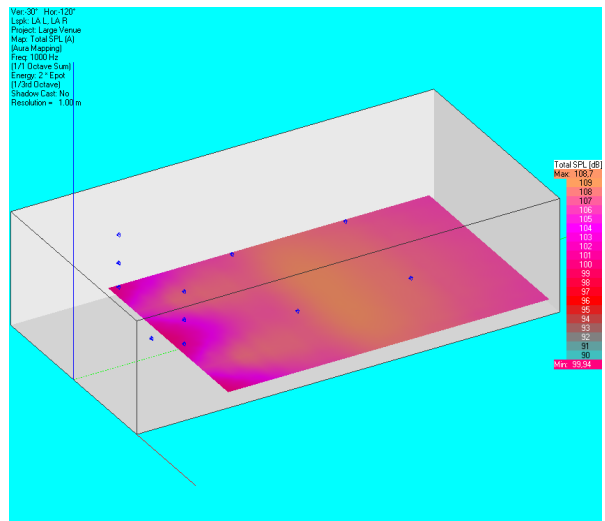


(c) EASE 4.4 / TI-Project Sanker / 04.02.2020 15:07:45 / Rihde-BesB Noise + Vibration GmbH Christoph Sanker

500 Hz

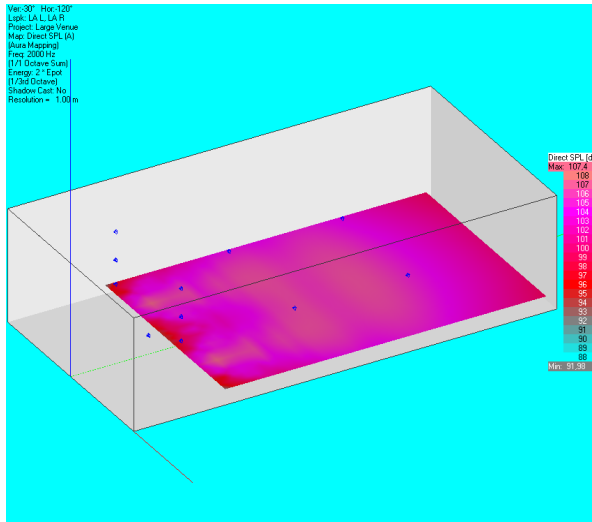


(c) EASE 4.4 / TI-Project Sanker / 04.02.2020 15:04:47 / Rihde-BesB Noise + Vibration GmbH Christoph Sanker

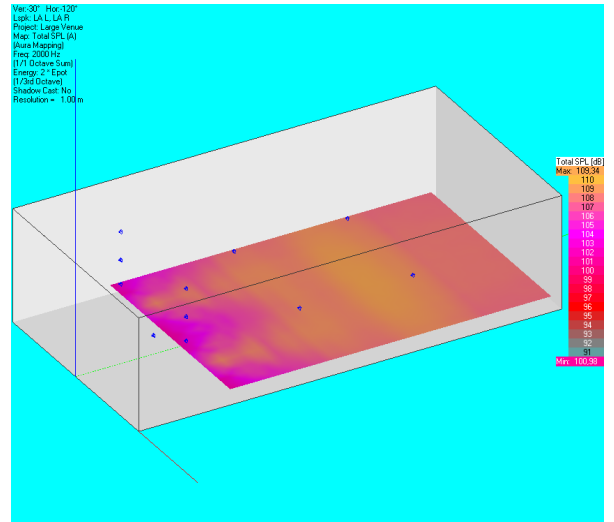


(c) EASE 4.4 / TI-Project Sanker / 04.02.2020 15:07:55 / Rihde-BesB Noise + Vibration GmbH Christoph Sanker

1000 Hz

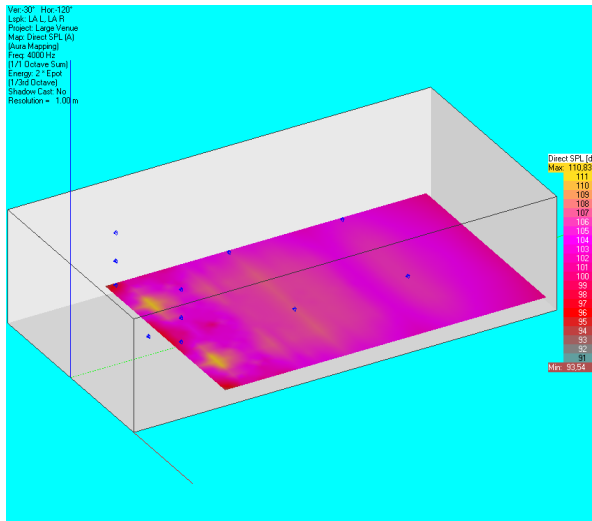


(c) EASE 4.4 / T1-Project Sarter / 04.02.2020 15:04:56 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

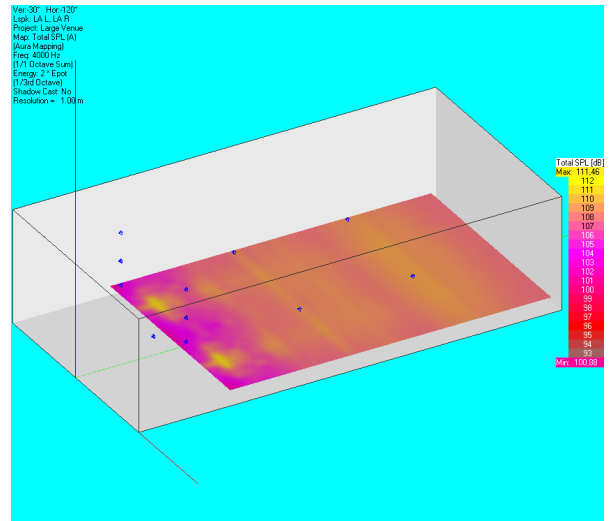


(c) EASE 4.4 / T1-Project Sarter / 04.02.2020 15:08:05 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

2000 Hz

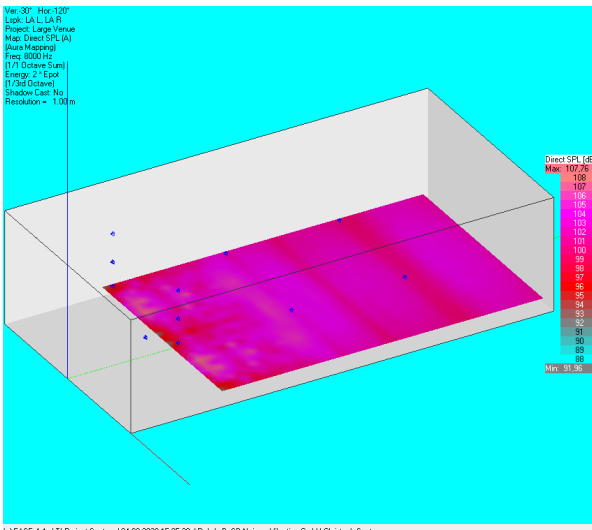


(c) EASE 4.4 / T1-Project Sarter / 04.02.2020 15:05:05 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

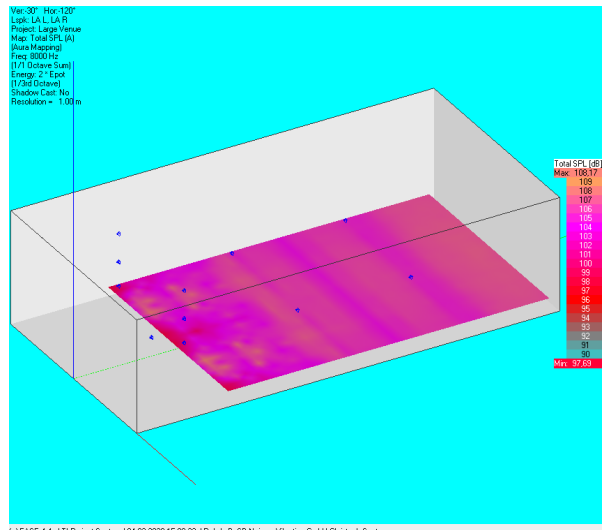


(c) EASE 4.4 / T1-Project Sarter / 04.02.2020 15:08:14 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

4000 Hz

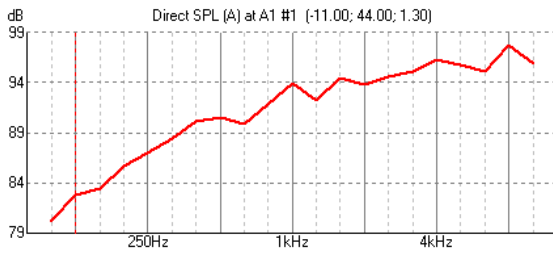


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:05:38 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

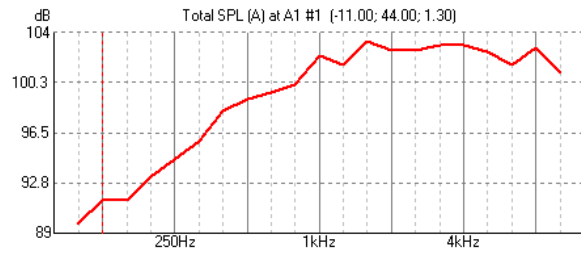


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:08:23 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

8000 Hz



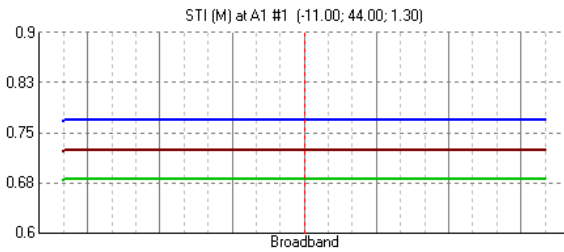
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:03:15 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



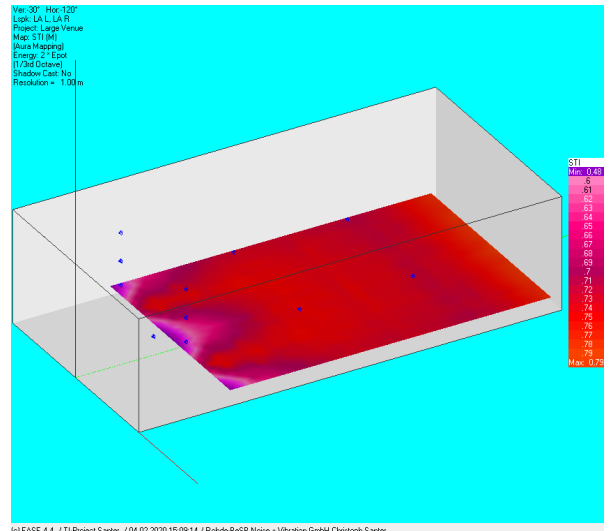
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:05:54 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:08:44 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



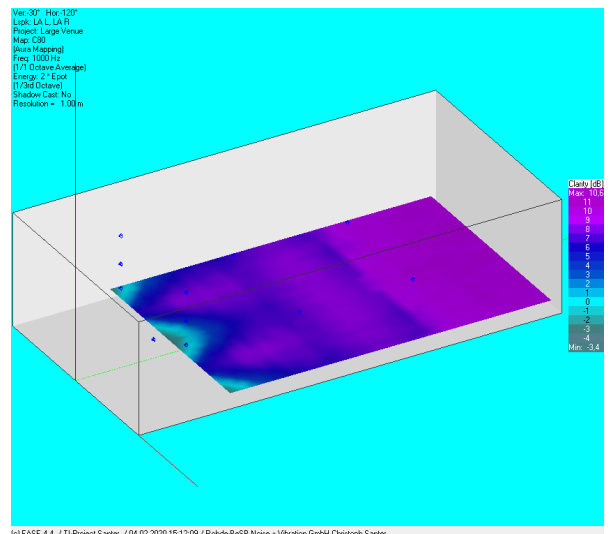
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:09:14 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

STI

C80



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:10:14 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



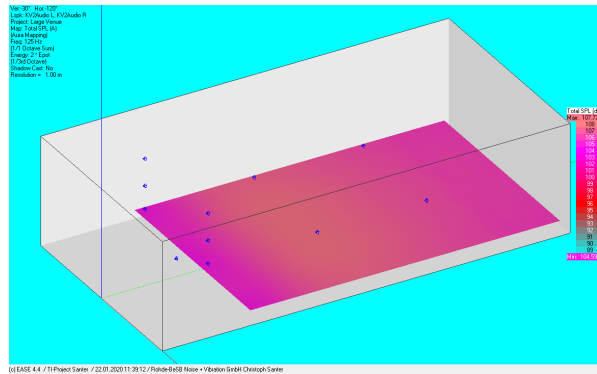
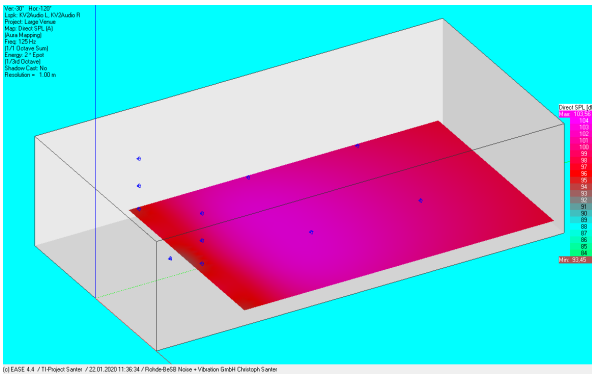
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 04.02.2020 15:12:09 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

C80

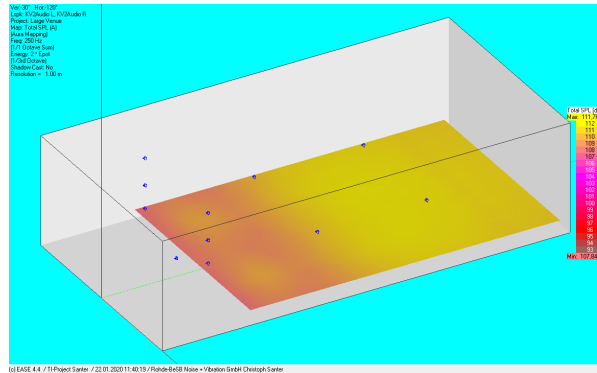
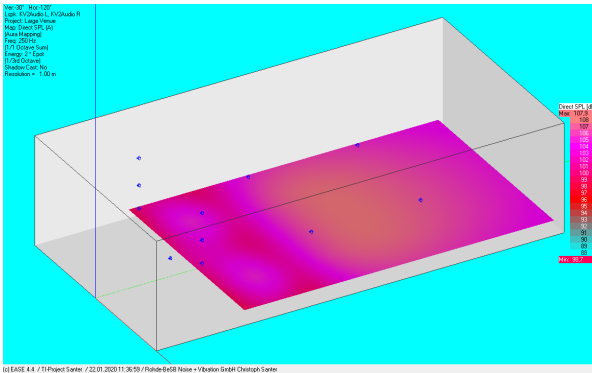
KV2audio

SPL

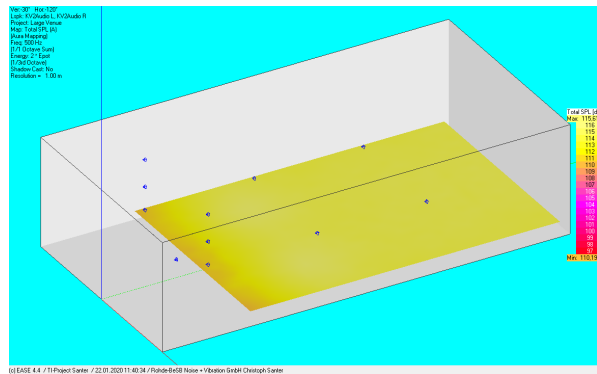
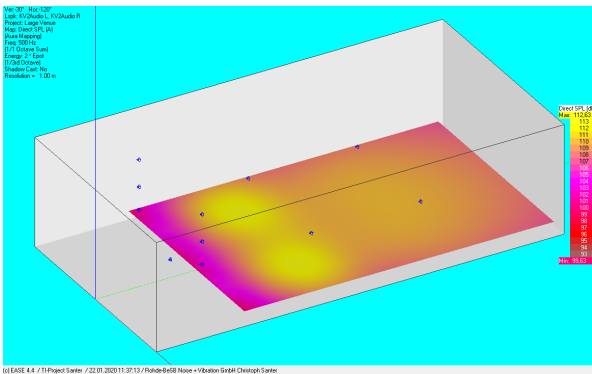
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



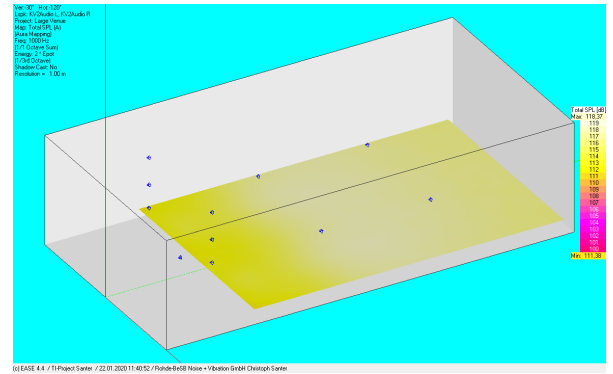
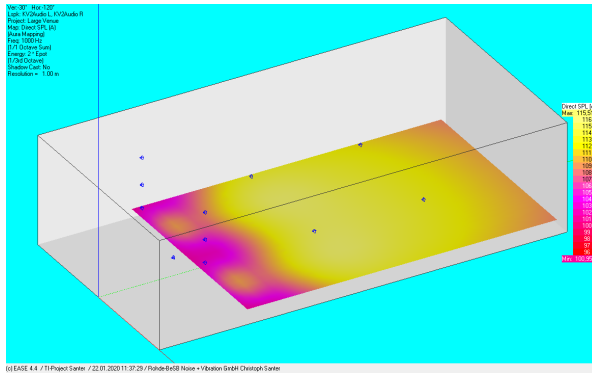
125 Hz



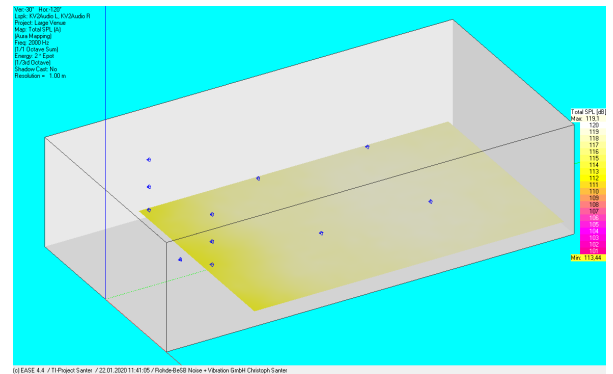
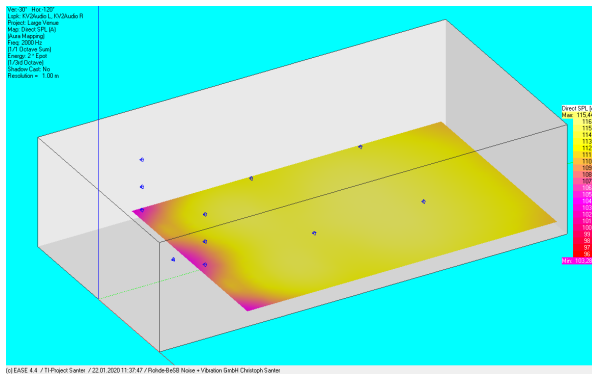
250 Hz



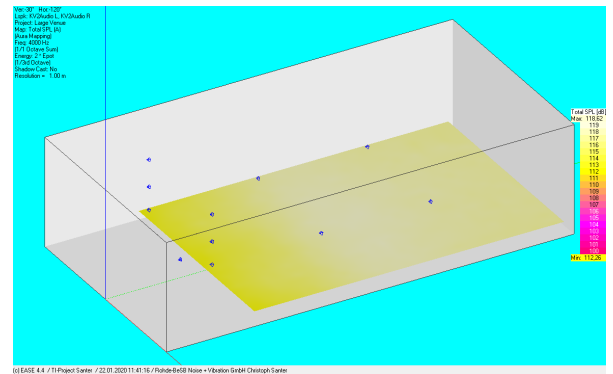
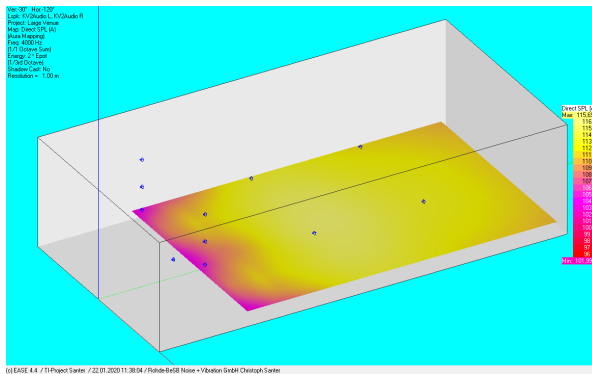
500 Hz



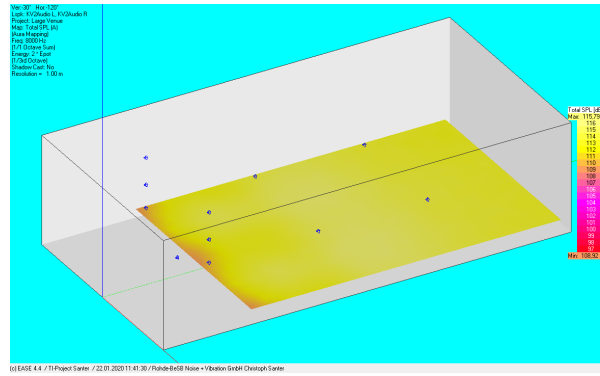
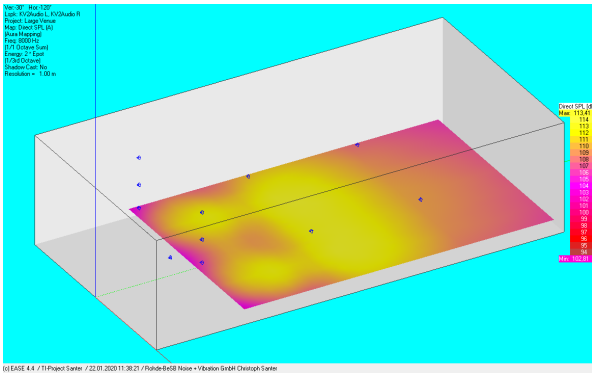
1000 Hz



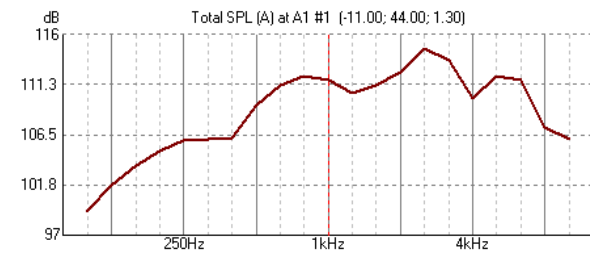
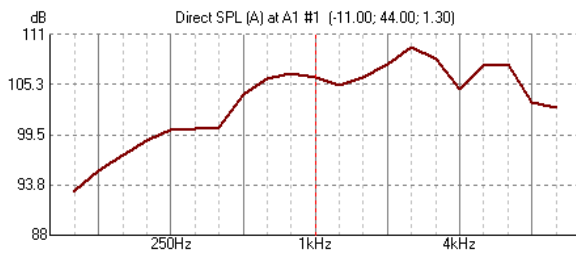
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz

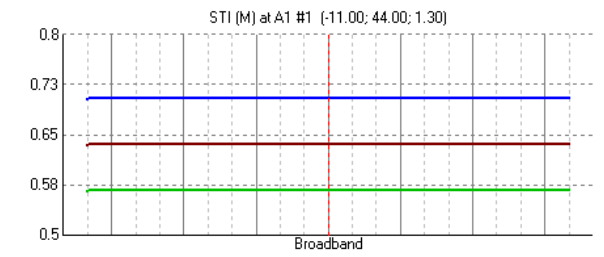


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:16:41 / Rohde-BeSB Noise + Vibration Gmbh

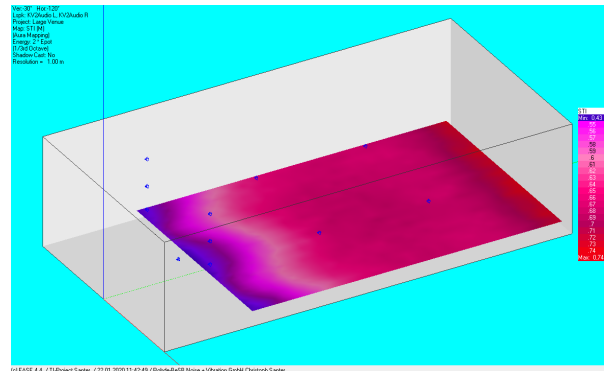
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:17:03 / Rohde-BeSB Noise + Vibration Gmbh

SPL overall

STI

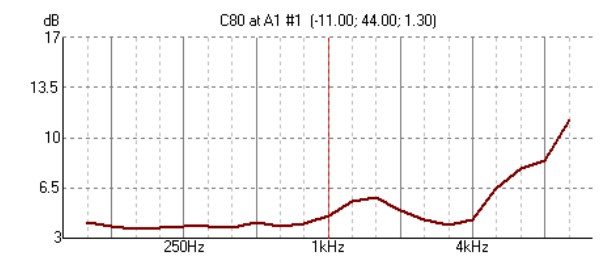


(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:17:38 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

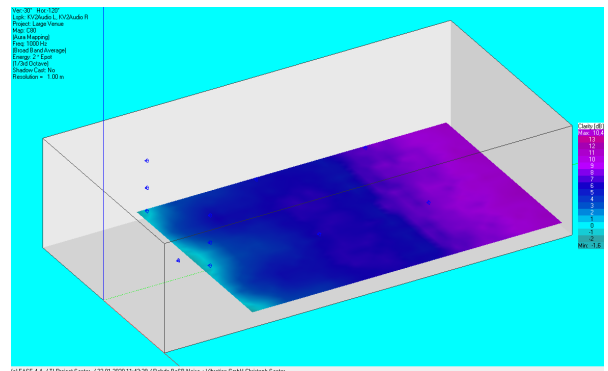


STI

C80



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:17:18 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



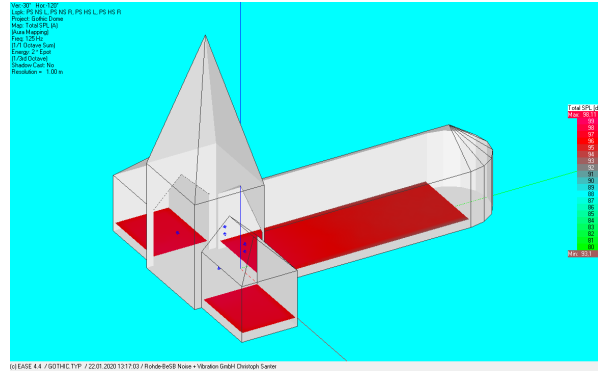
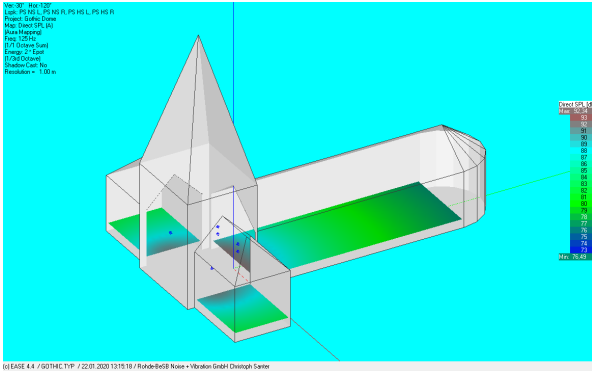
C80

Kirche

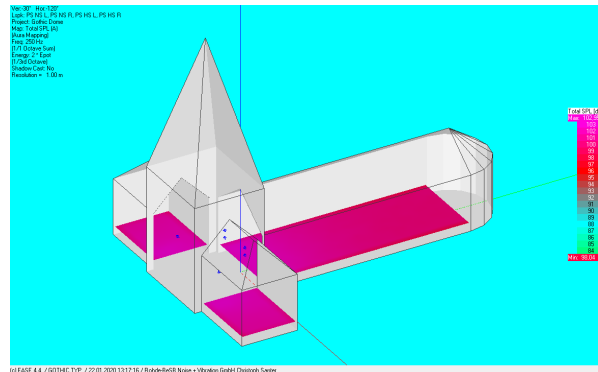
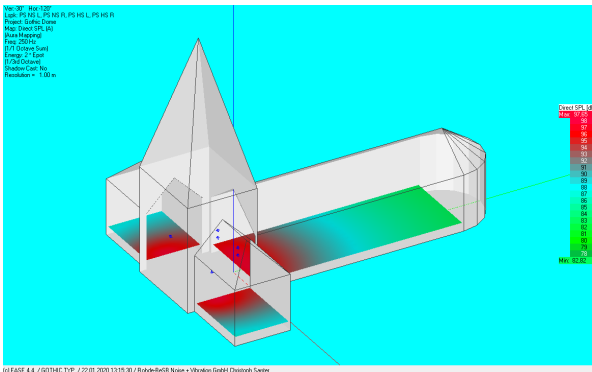
Punktschallquelle

SPL

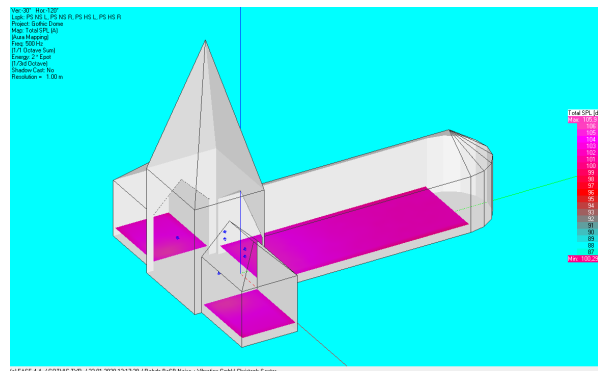
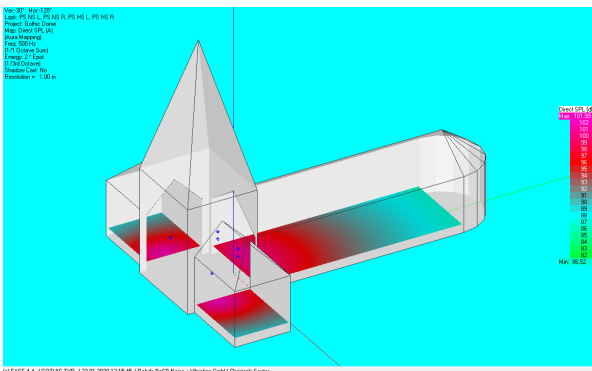
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



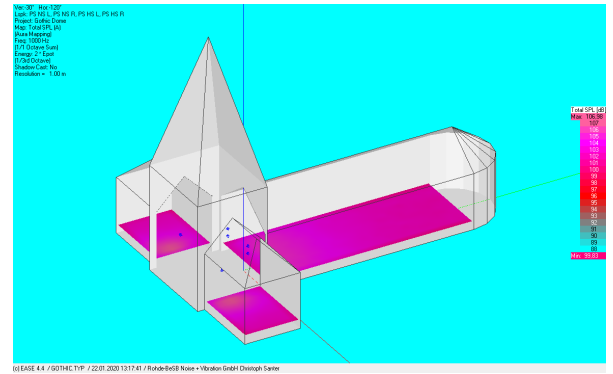
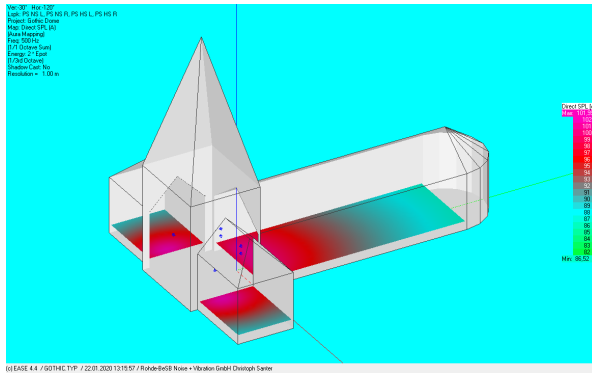
125 Hz



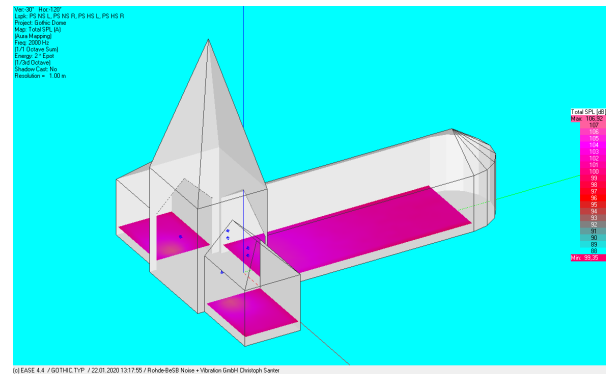
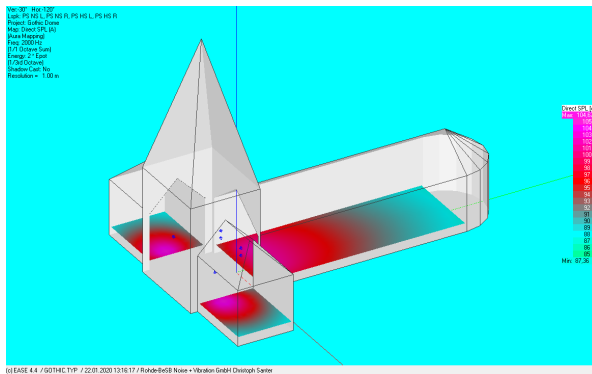
250 Hz



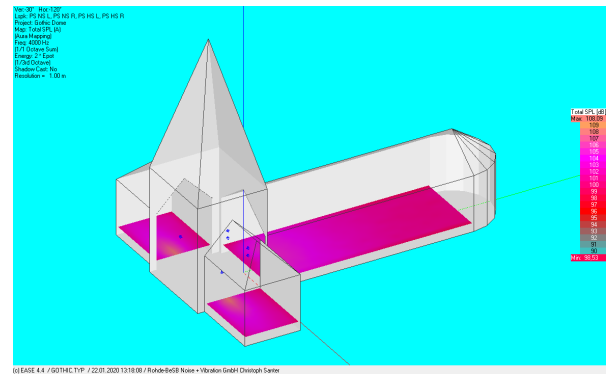
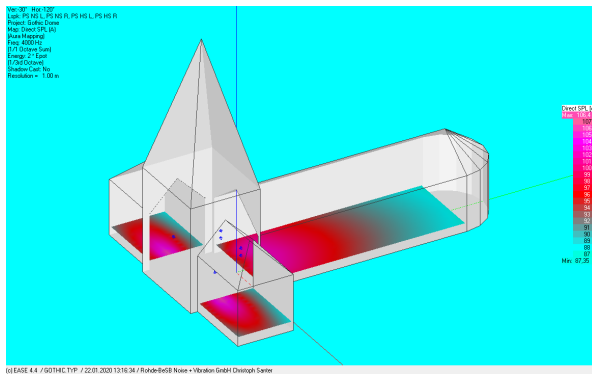
500 Hz



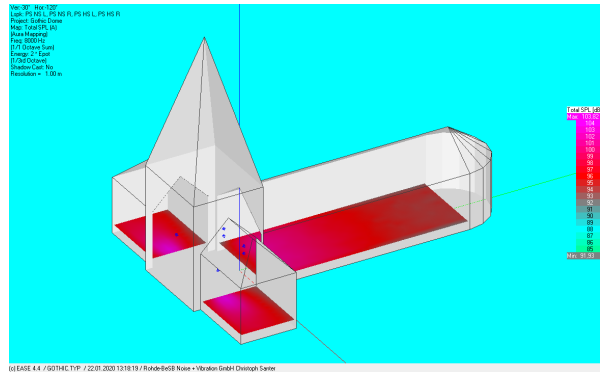
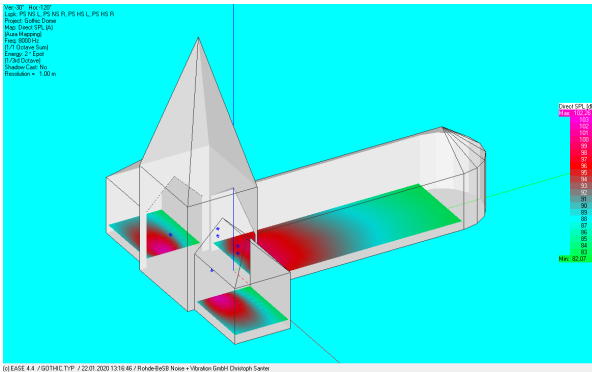
1000 Hz



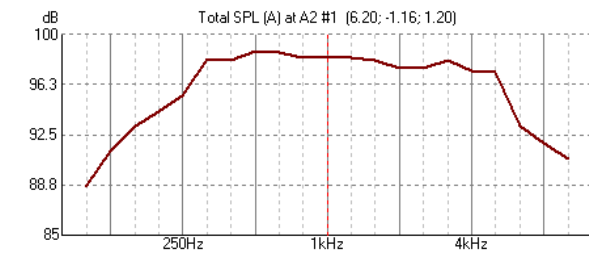
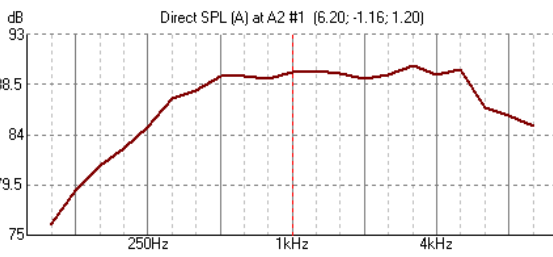
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz

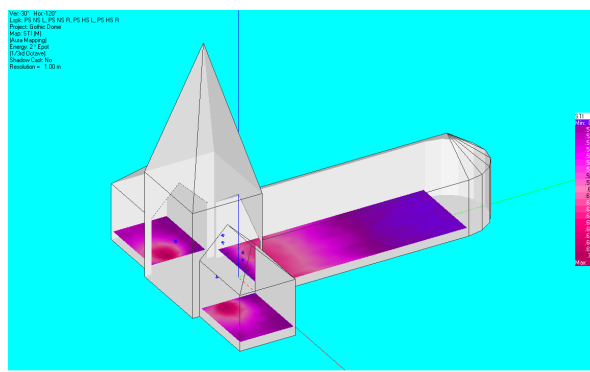
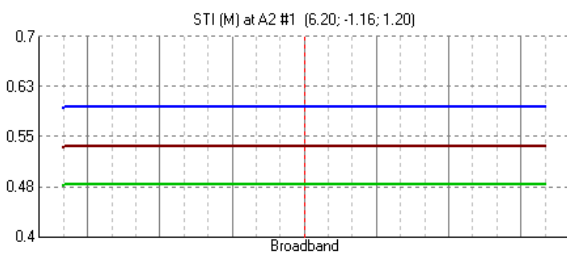


(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:12:20 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:12:00 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

SPL overall

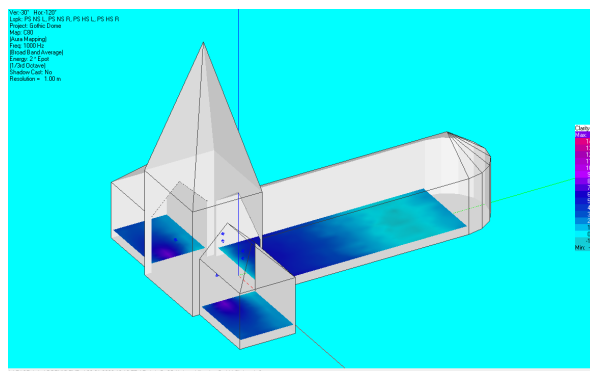
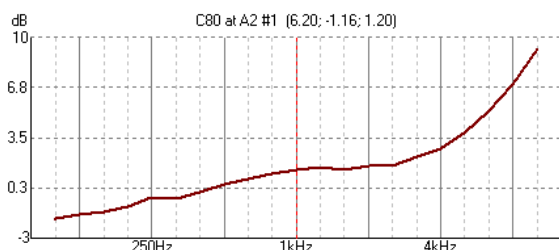
STI



(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:11:20 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

STI

C80



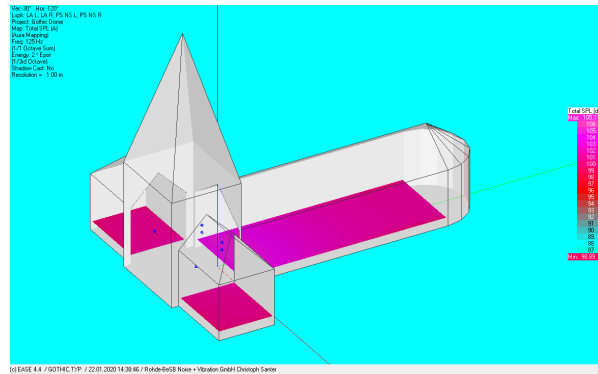
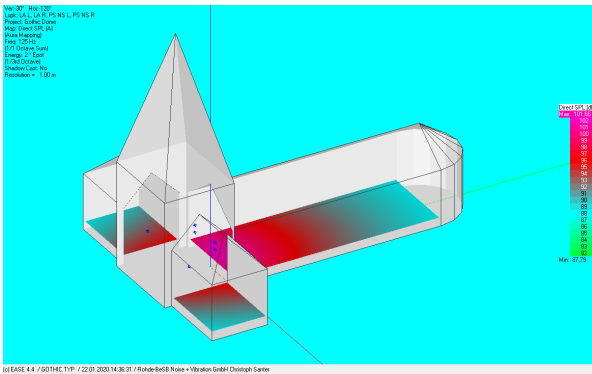
(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:11:46 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

C80

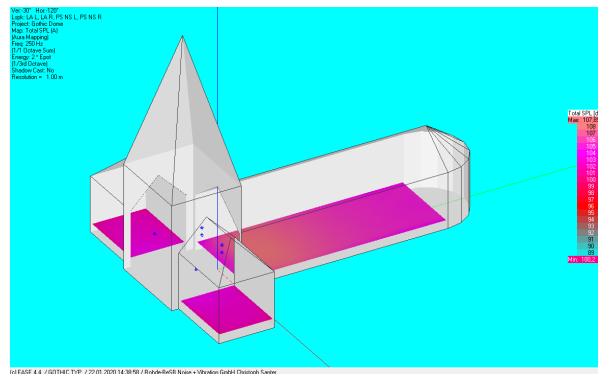
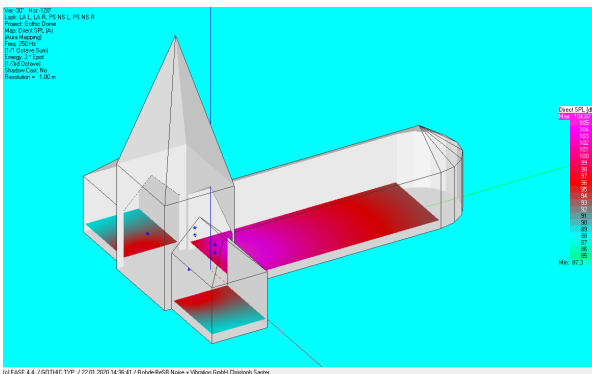
Line Array

SPL

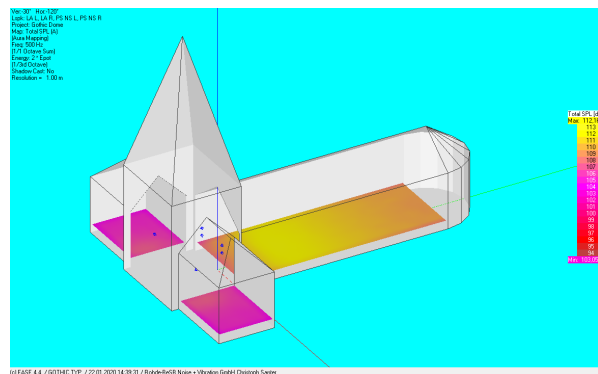
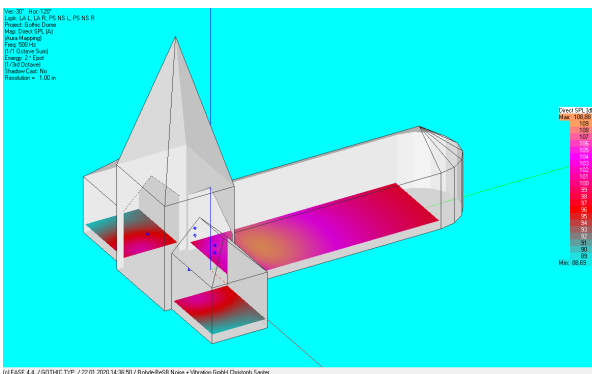
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



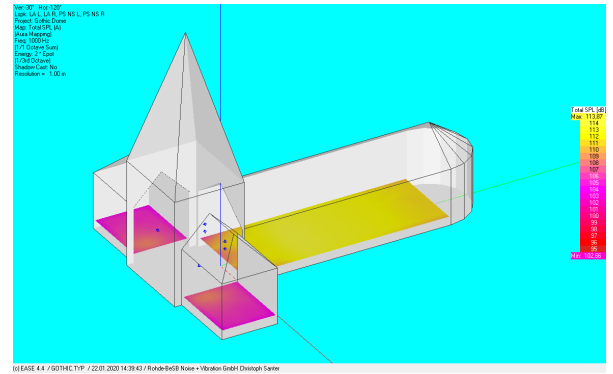
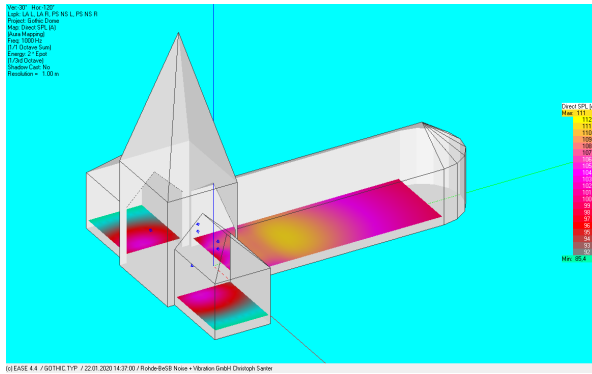
125 Hz



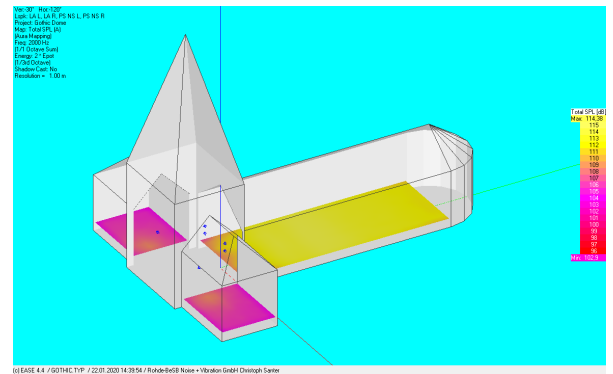
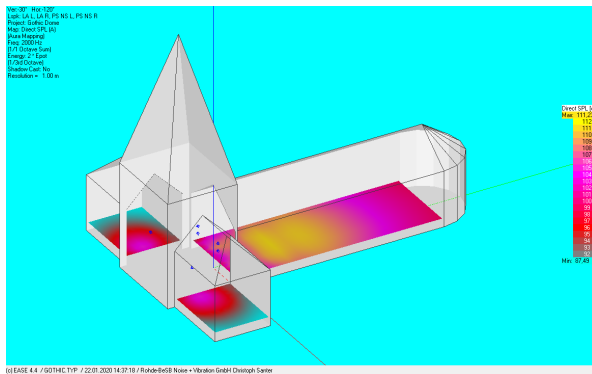
250 Hz



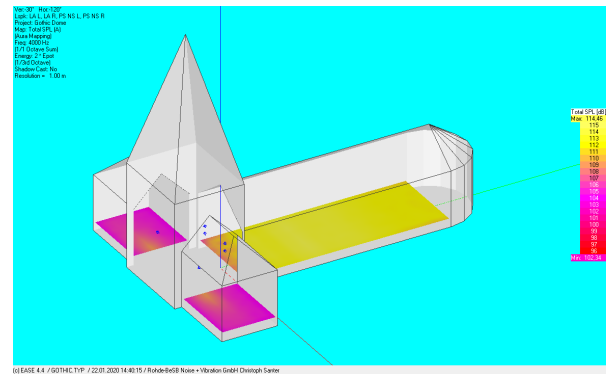
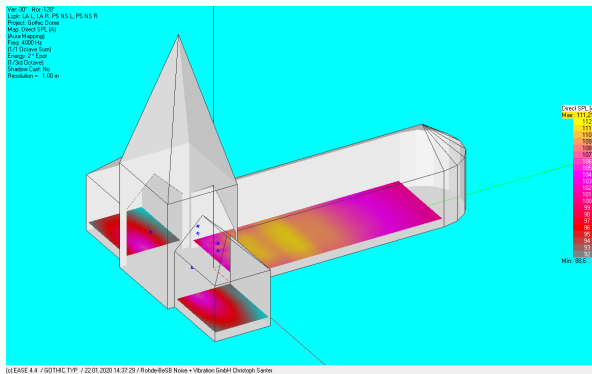
500 Hz



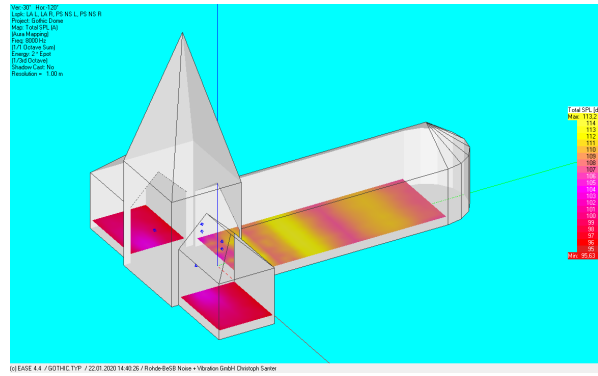
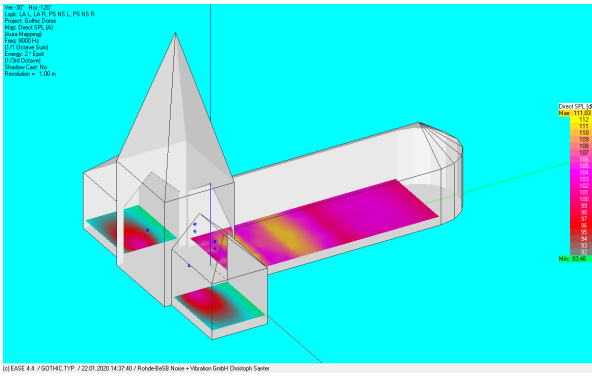
1000 Hz



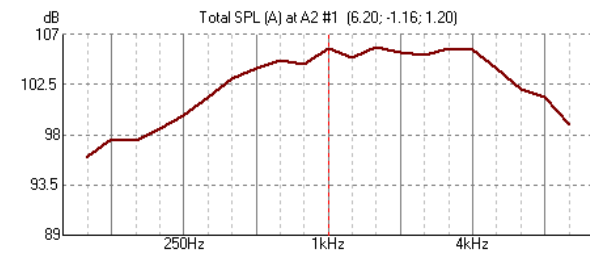
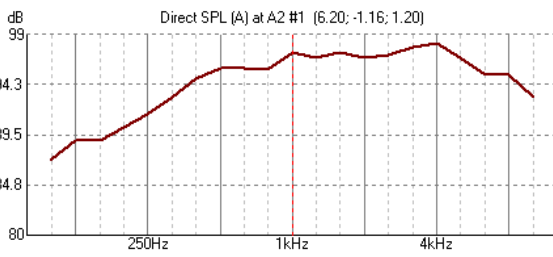
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz

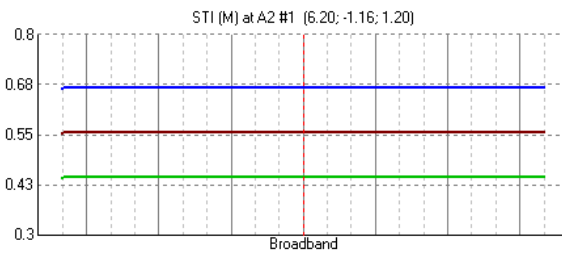


(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:09:44 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

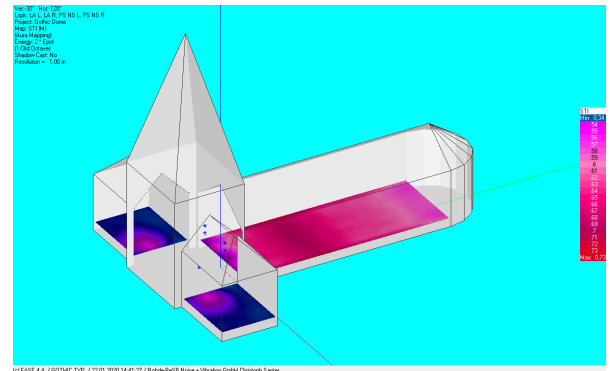
(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:09:57 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

SPL overall

STI

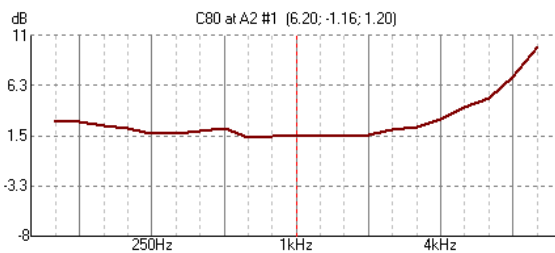


(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:10:49 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

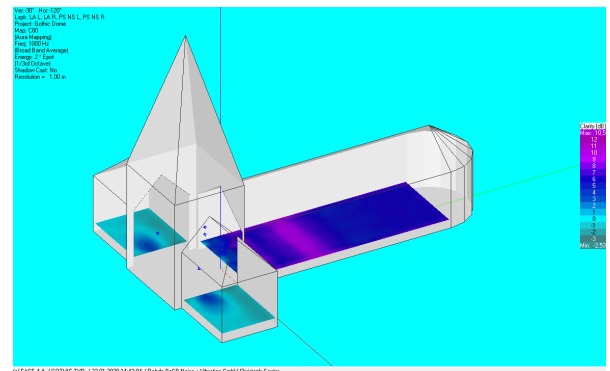


STI

C80



(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 22.01.2020 16:10:25 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

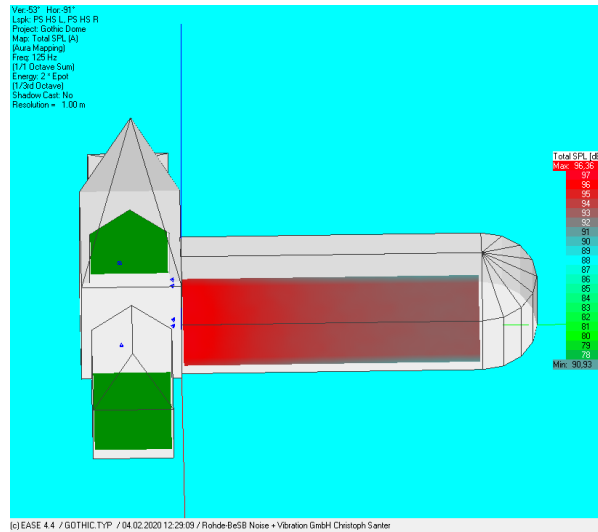
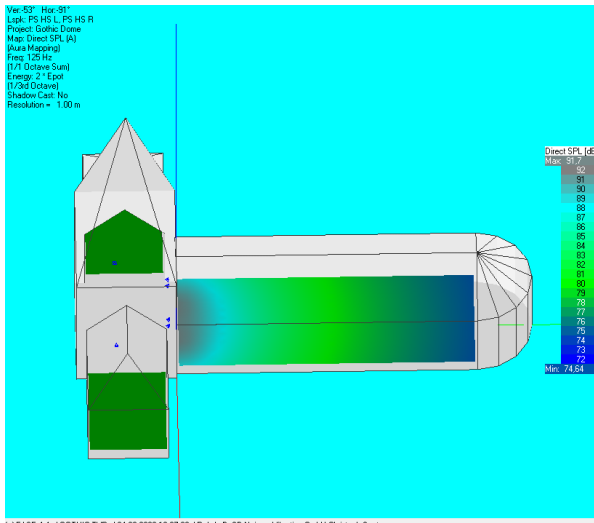


C80

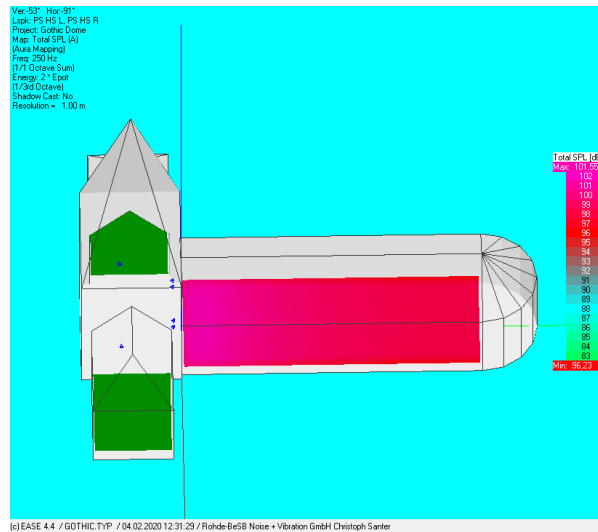
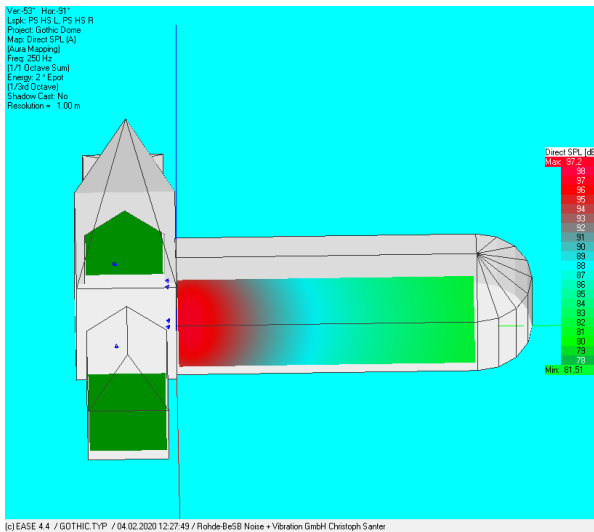
Punktschallquelle ohne Seitenschiff

SPL

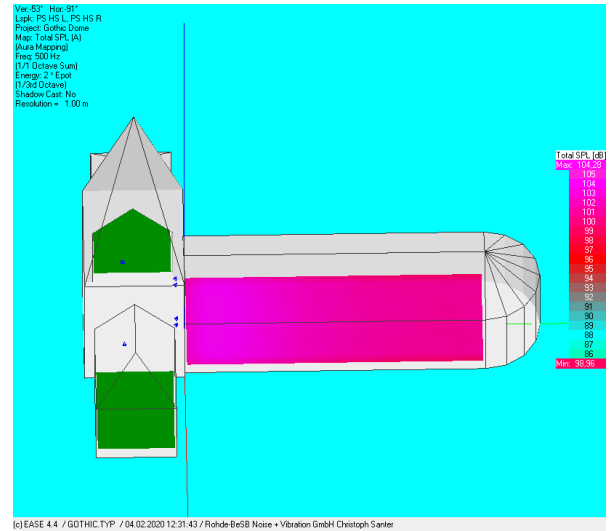
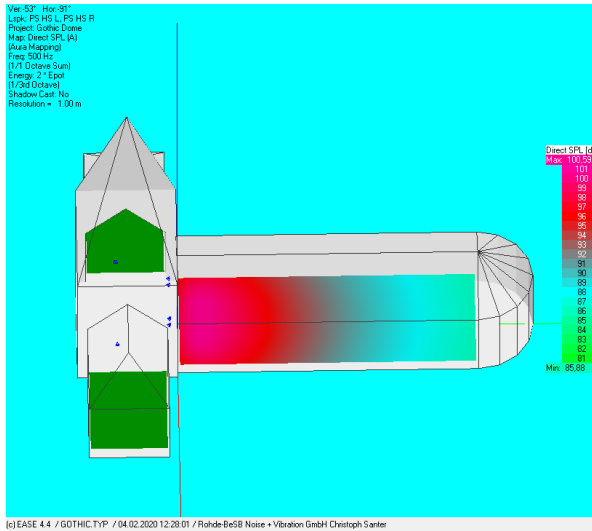
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



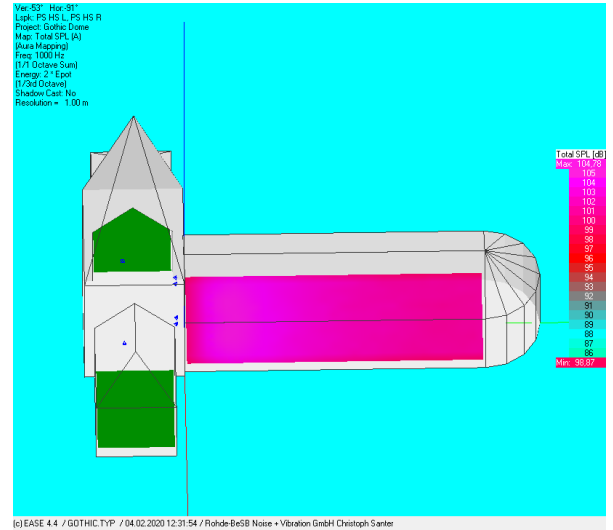
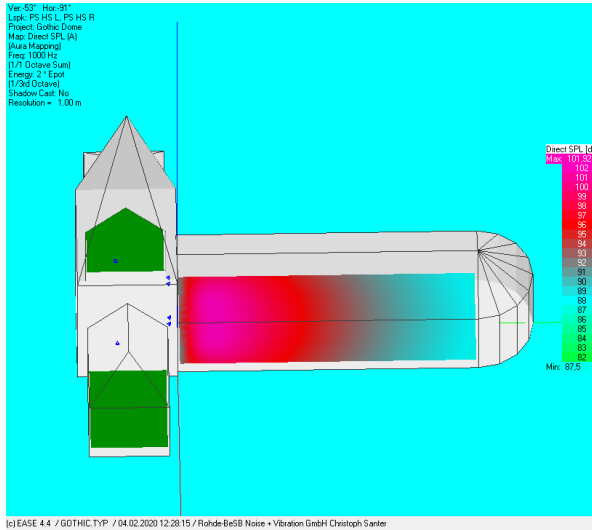
125 Hz



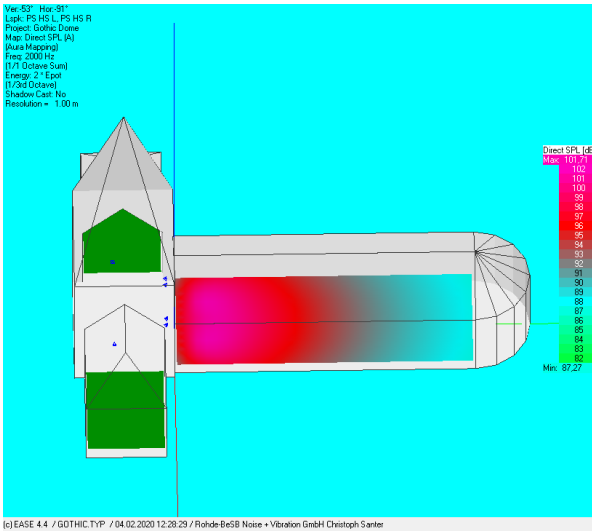
250 Hz



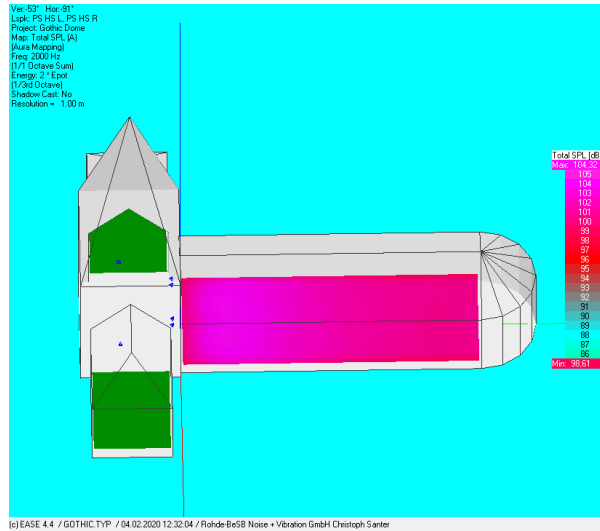
500 Hz



1000 Hz

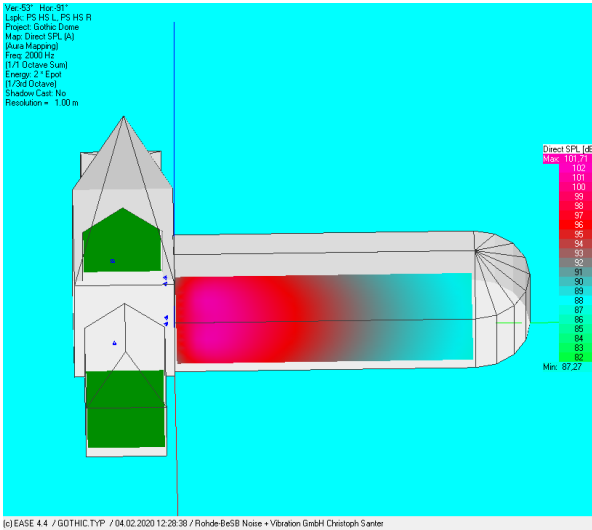


(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 12:28:29 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

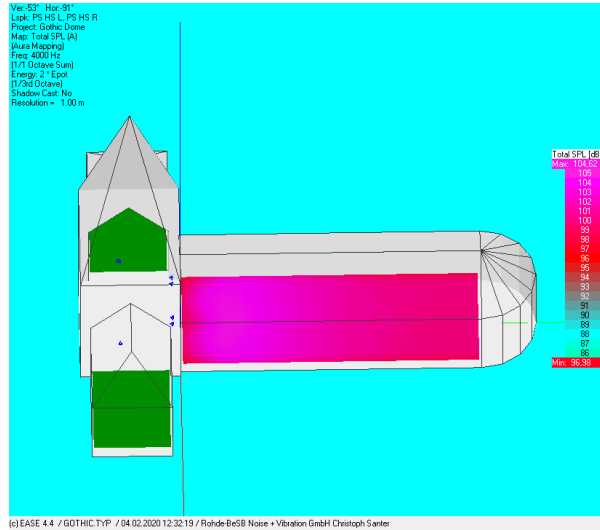


(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 12:32:04 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

2000 Hz

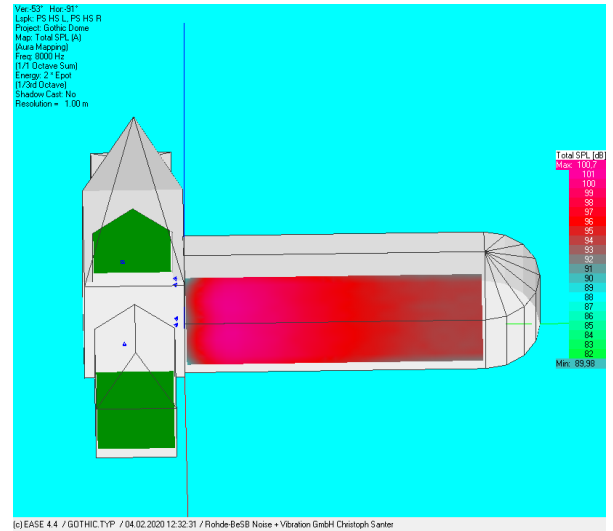
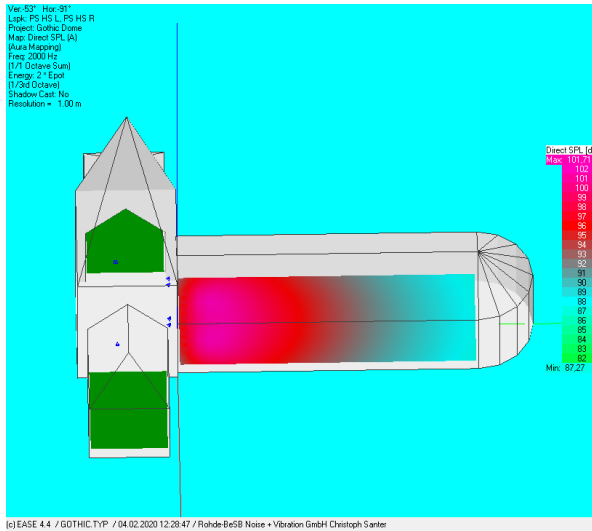


(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 12:28:38 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

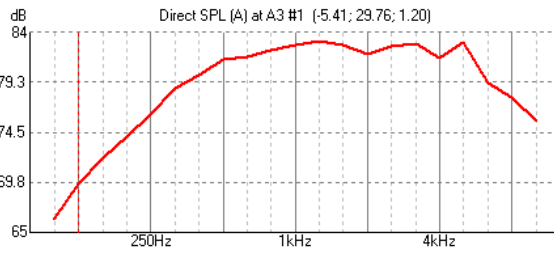


(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 12:32:19 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH Christoph Sarter

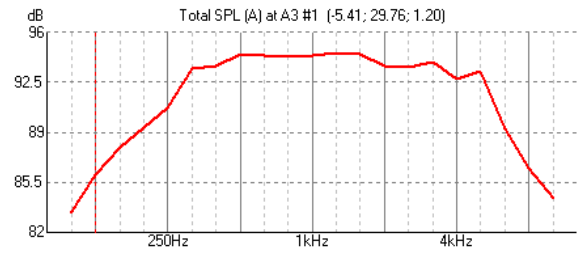
4000 Hz



8000 Hz



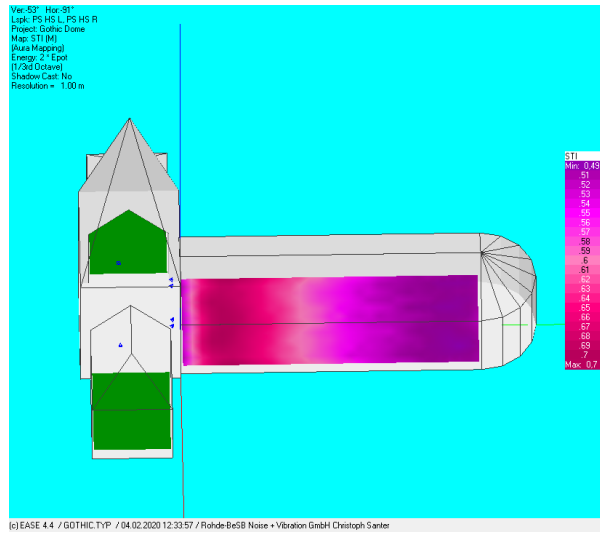
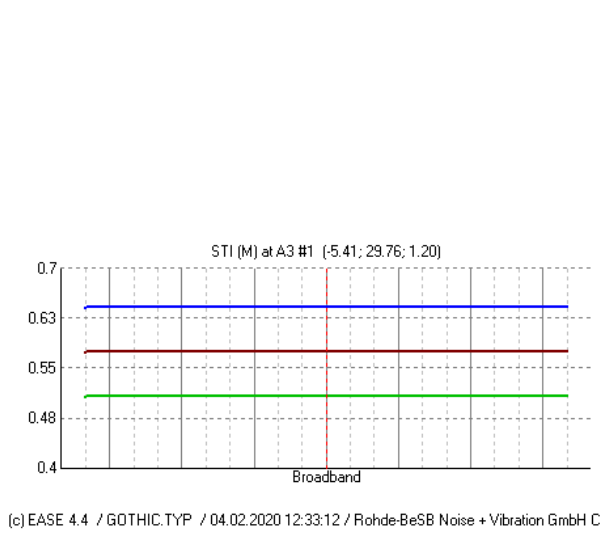
(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 04.02.2020 12:22:47 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C



(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 04.02.2020 12:29:33 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

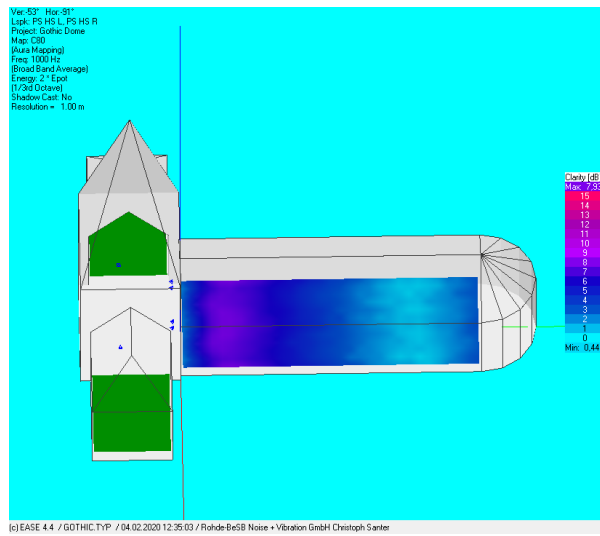
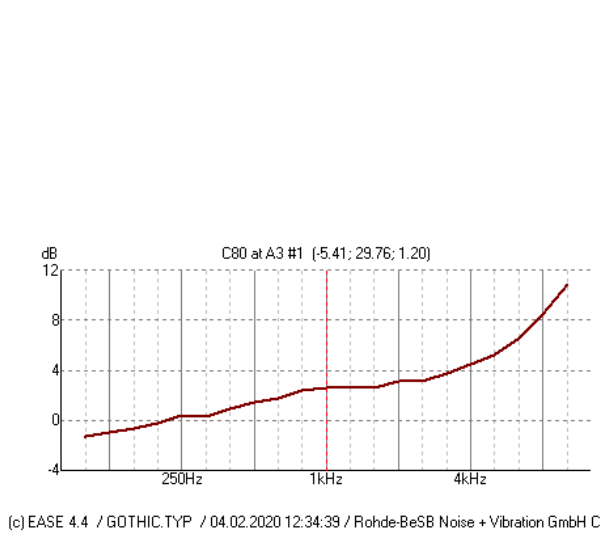
SPL overall

STI



STI

C80

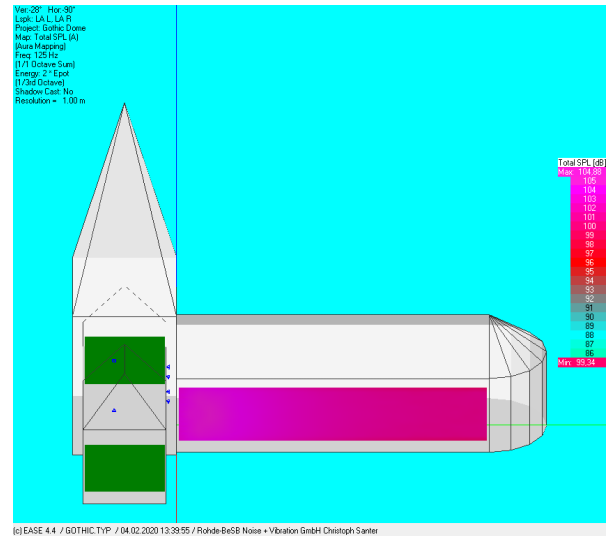
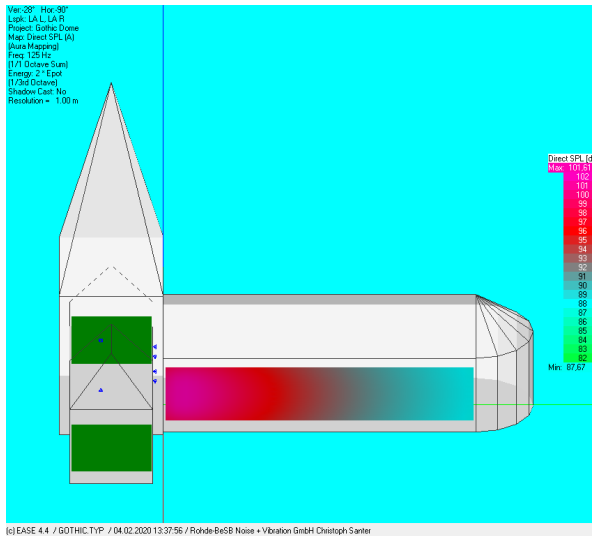


C80

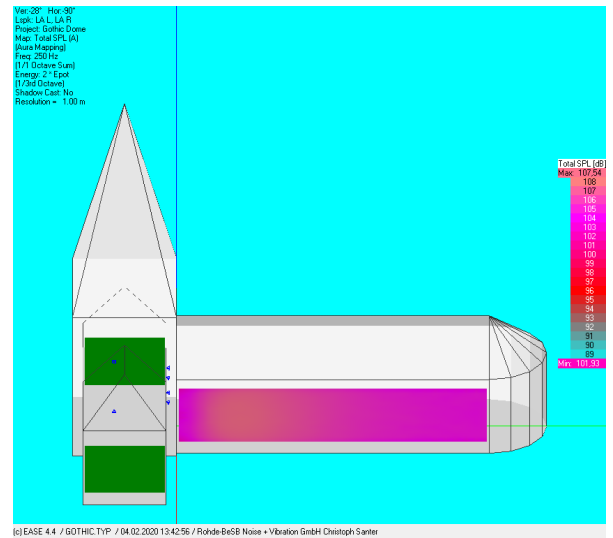
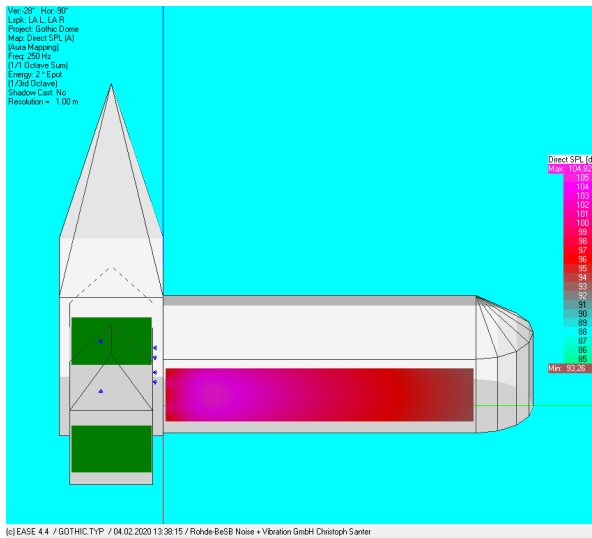
Line Array ohne Seitenschiff

SPL

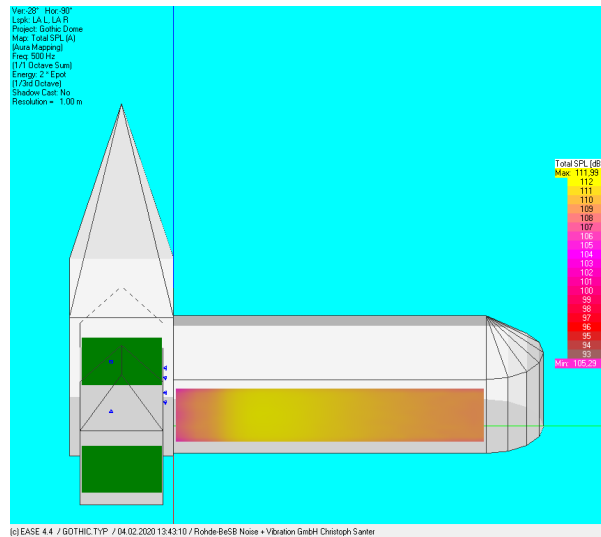
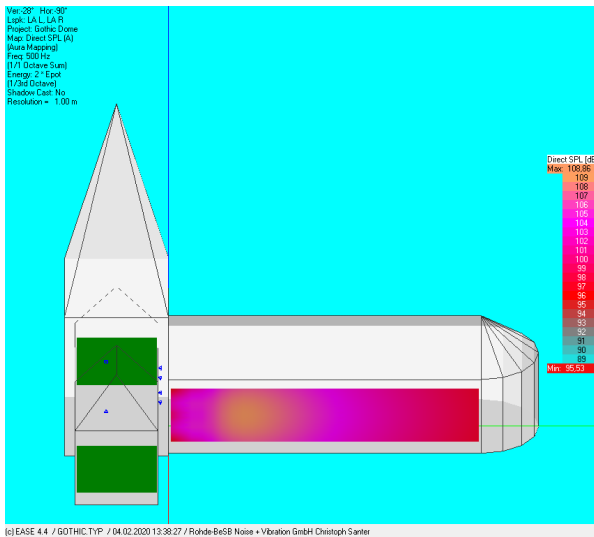
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



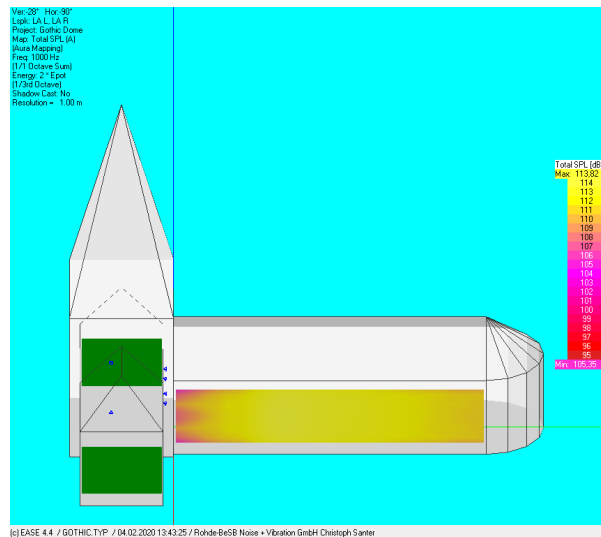
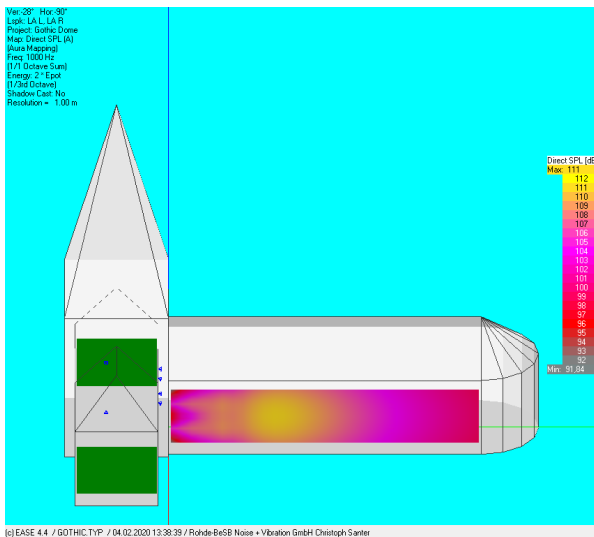
125 Hz



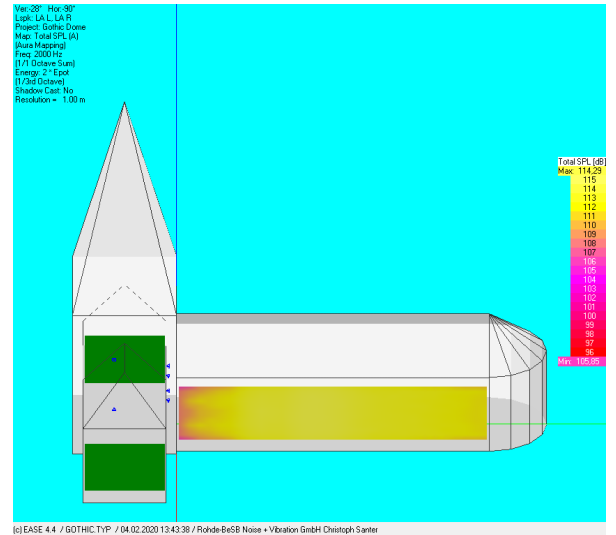
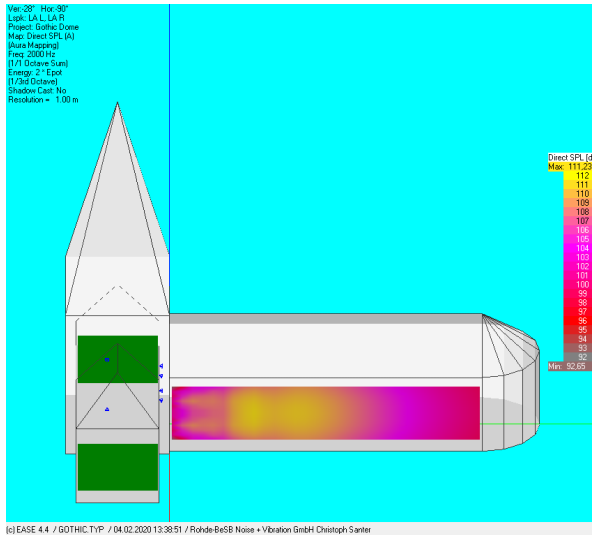
250 Hz



500 Hz



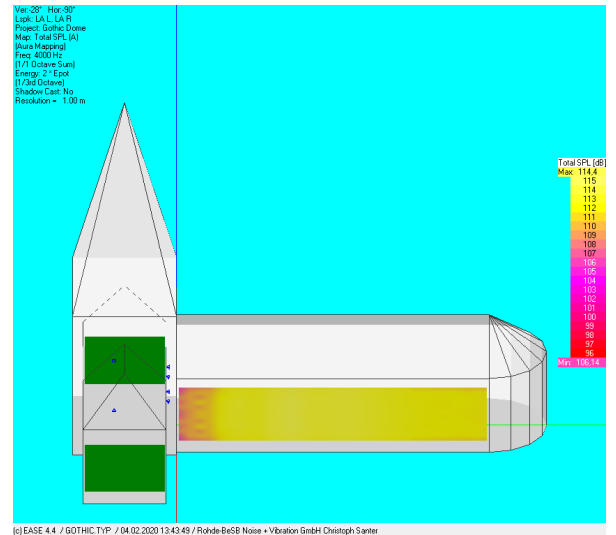
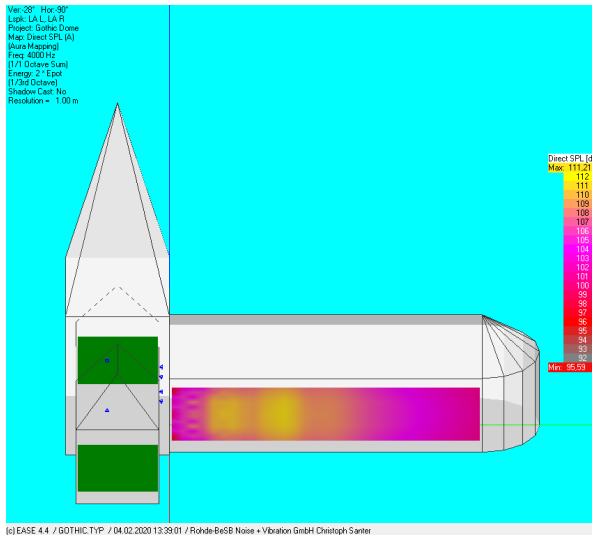
1000 Hz



(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 13:38:51 / Rohde-Bes8 Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 13:43:38 / Rohde-Bes8 Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

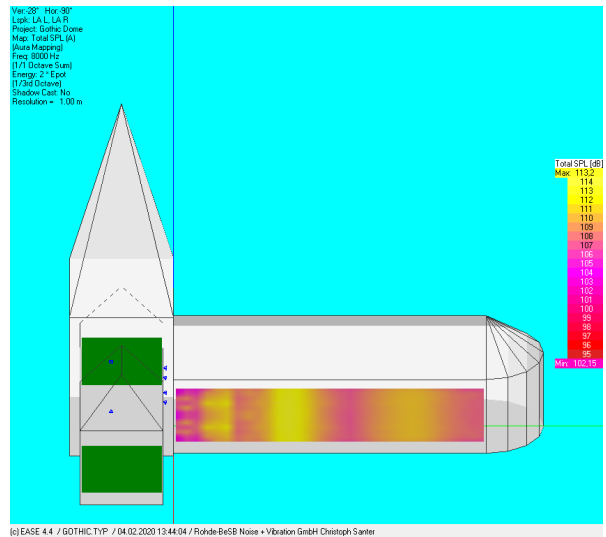
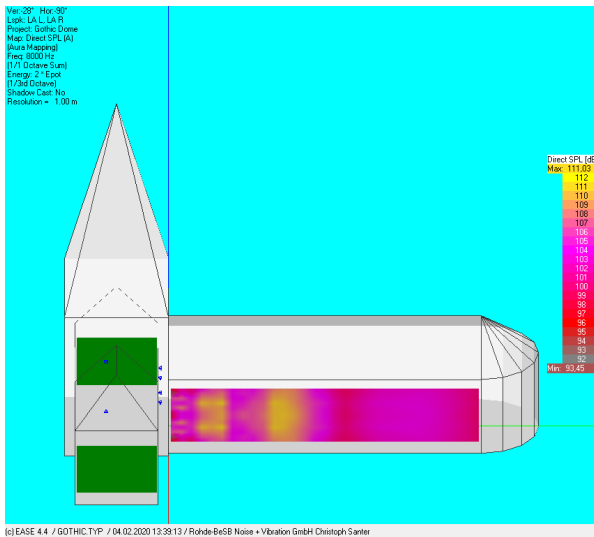
2000 Hz



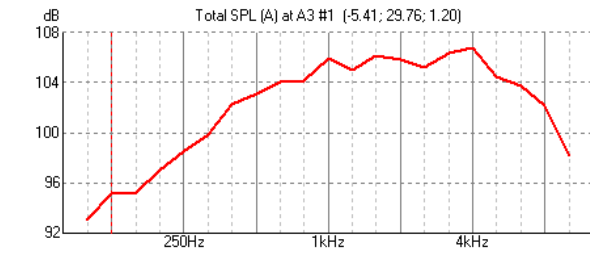
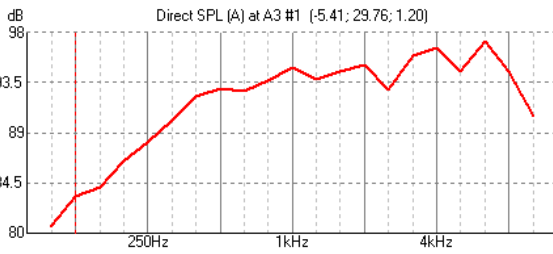
(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 13:39:01 / Rohde-Bes8 Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

(c) EASE 4.4 / GOthic.TYP / 04.02.2020 13:43:49 / Rohde-Bes8 Noise + Vibration GmbH Christoph Santer

4000 Hz



8000 Hz

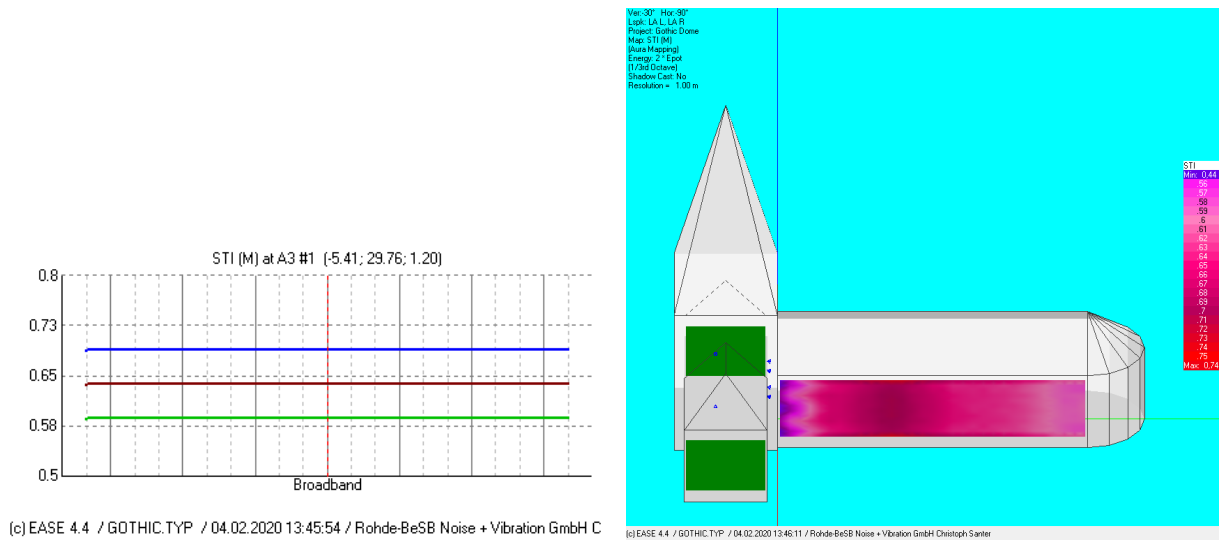


(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 04.02.2020 13:37:36 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

(c) EASE 4.4 / GOTHIC.TYP / 04.02.2020 13:39:36 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH C

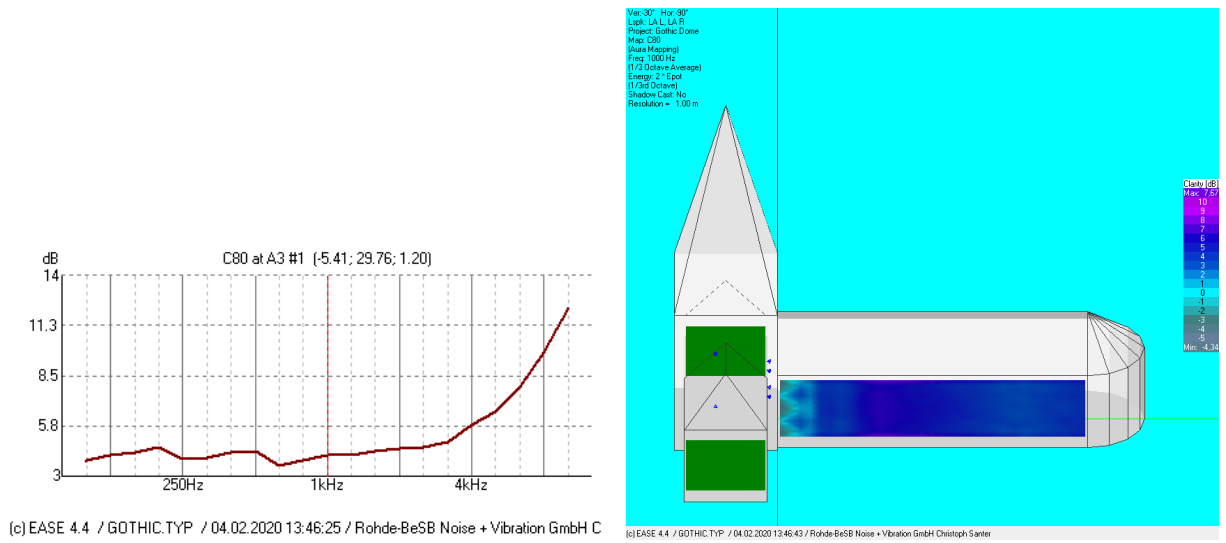
SPL overall

STI



STI

C80



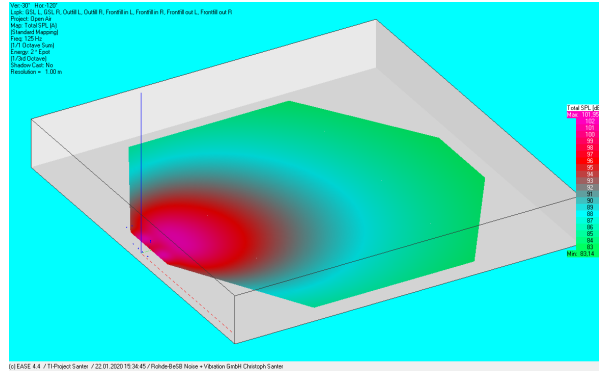
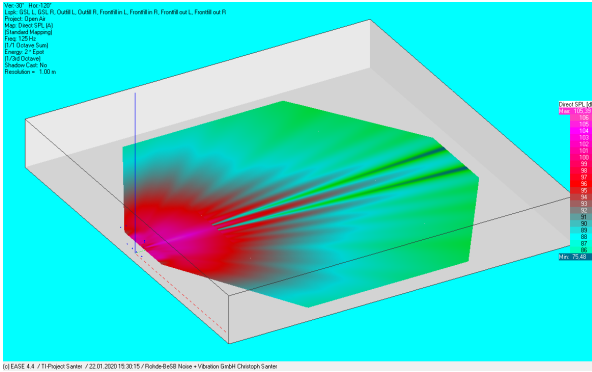
C80

Open Air

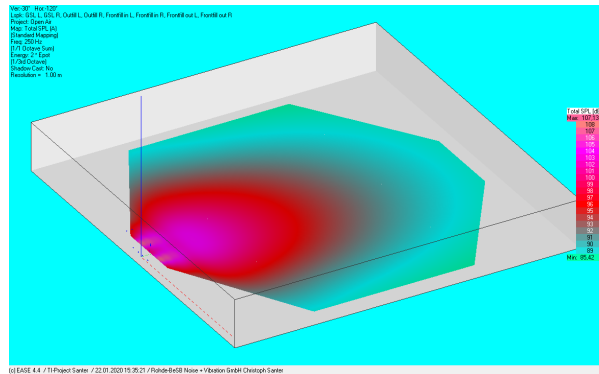
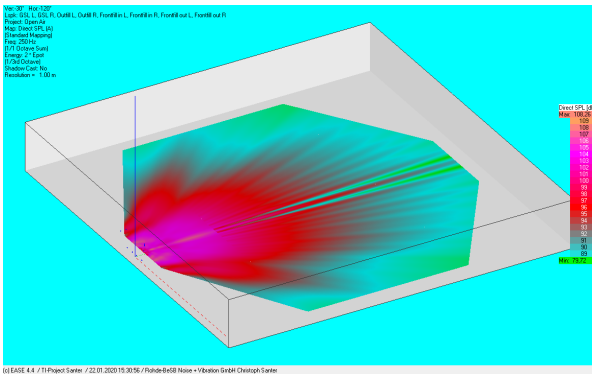
Line Array

SPL

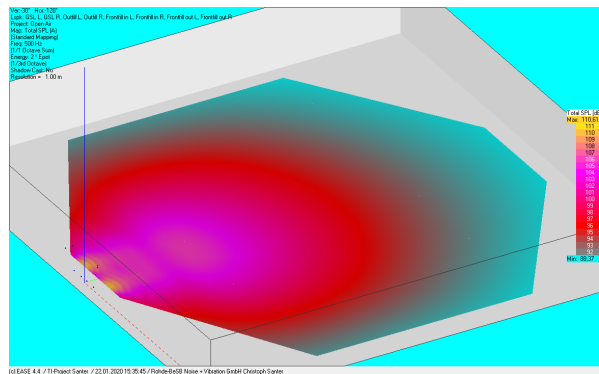
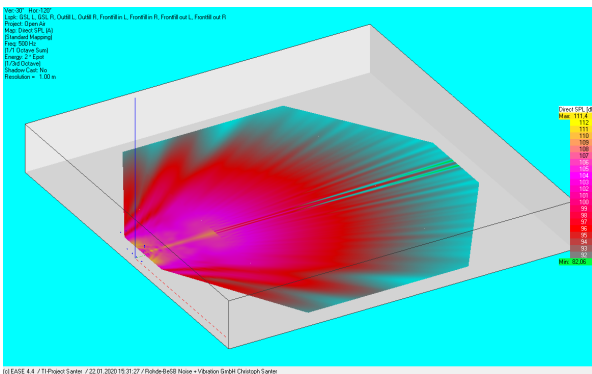
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



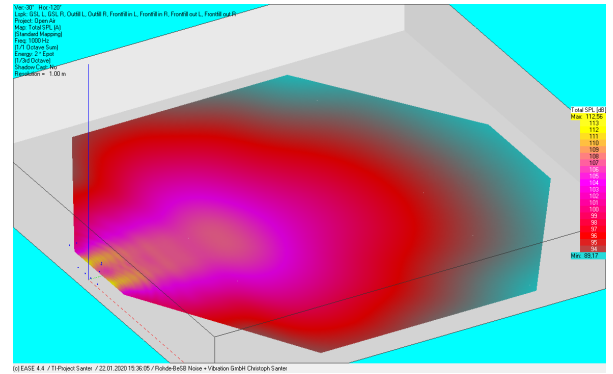
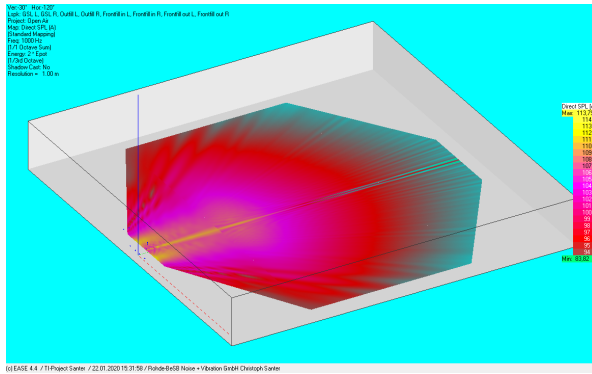
125 Hz



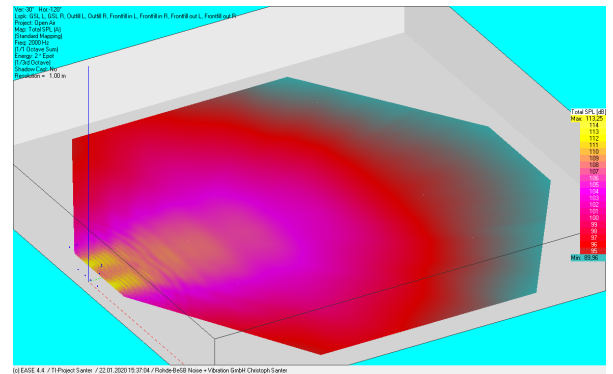
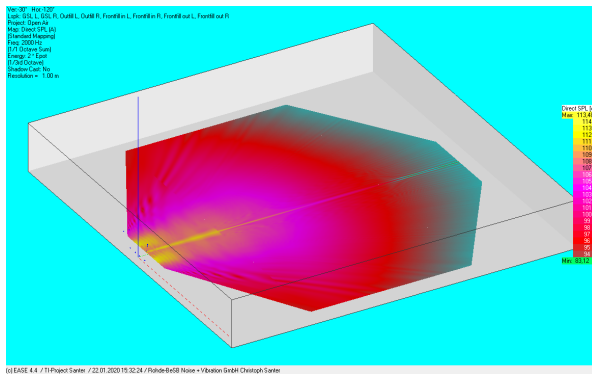
250 Hz



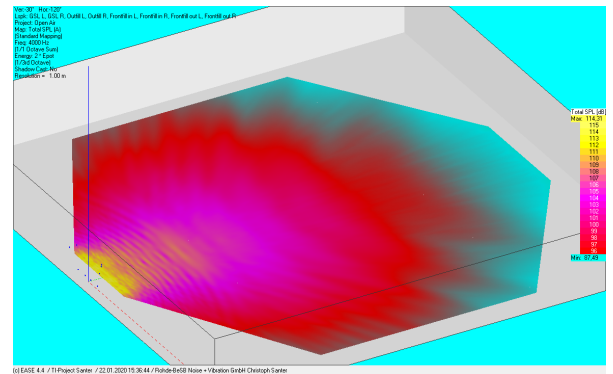
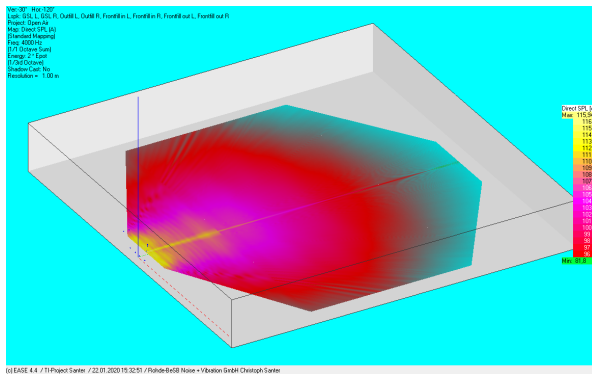
500 Hz



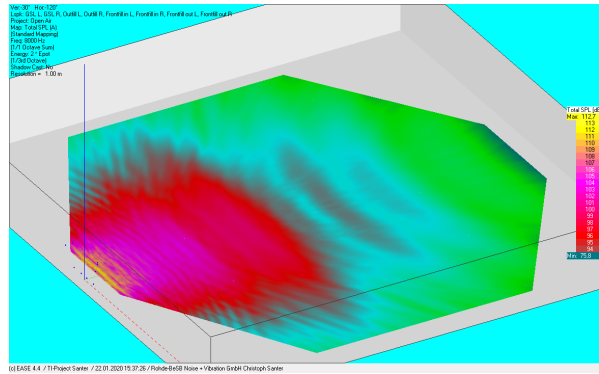
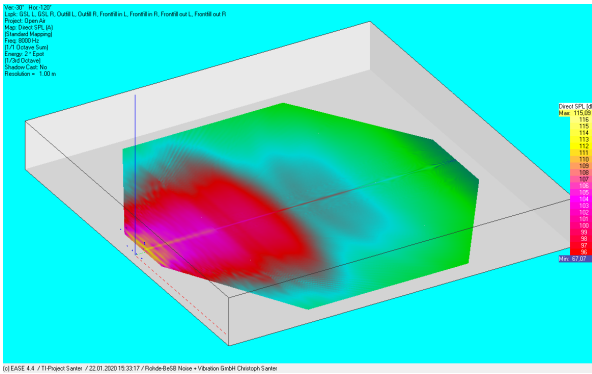
1000 Hz



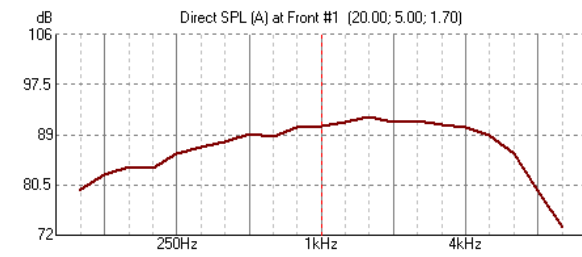
2000 Hz



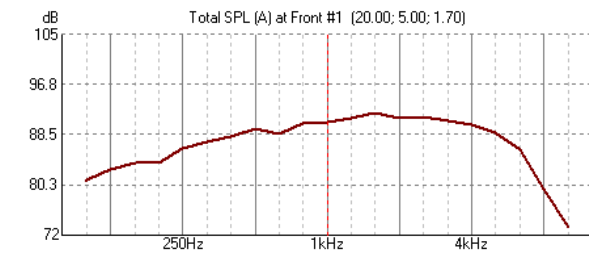
4000 Hz



8000 Hz



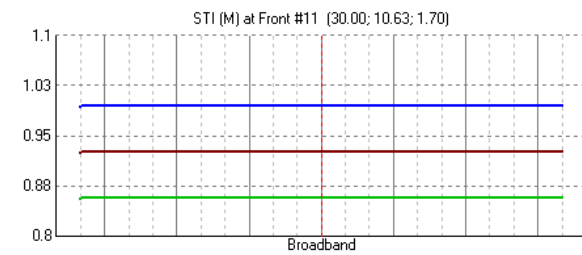
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:04:06 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH



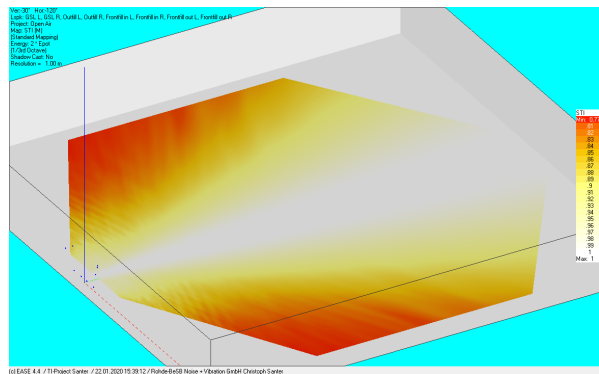
(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:05:01 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

SPL overall

STI



(c) EASE 4.4 / TI-Project Santer / 22.01.2020 16:08:47 / Rohde-BeSB Noise + Vibration GmbH

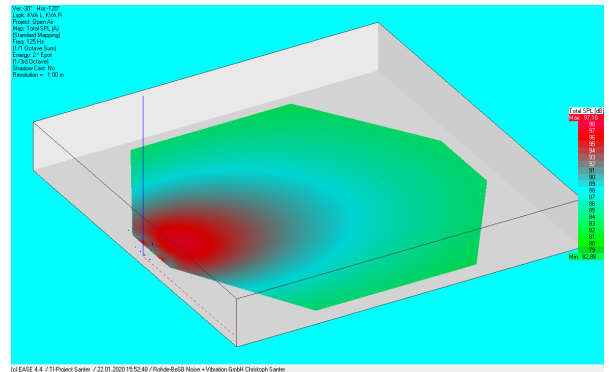
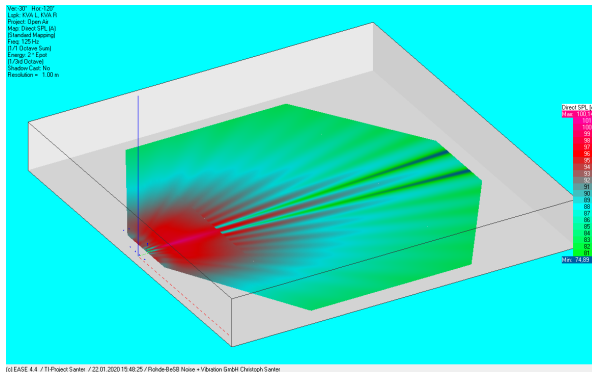


STI

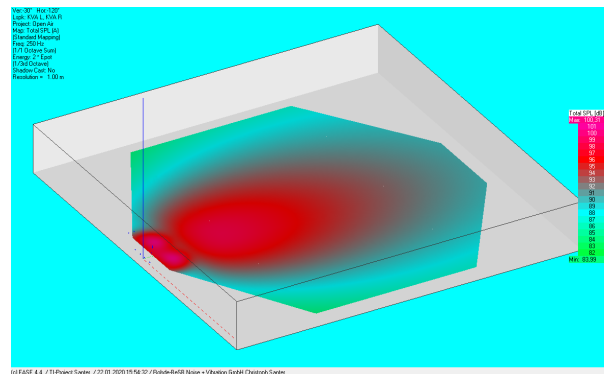
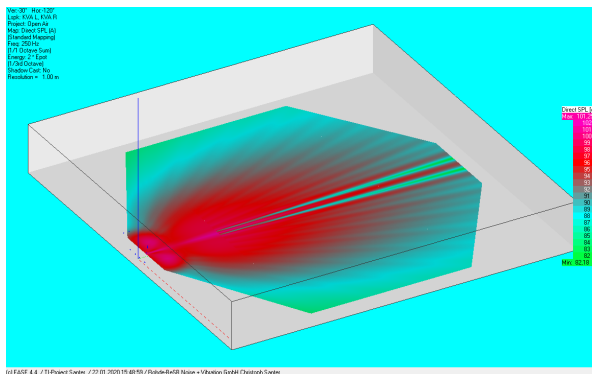
KV2audio

SPL

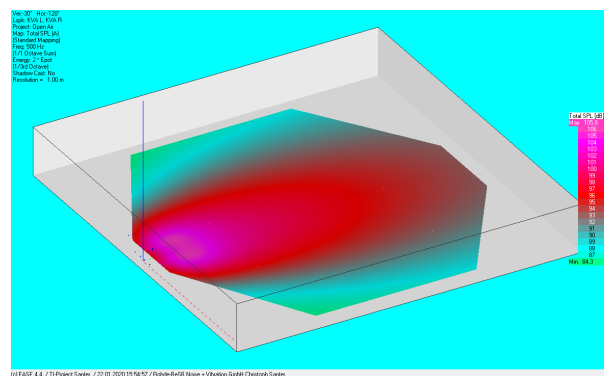
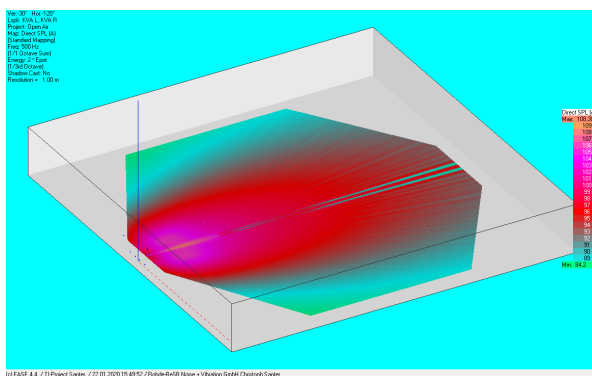
Links immer der direkte SPL, rechts der totale SPL.



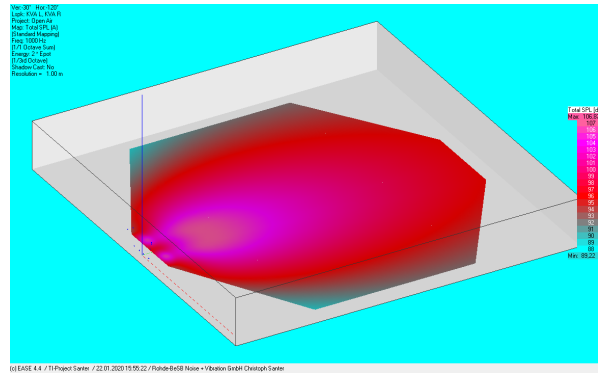
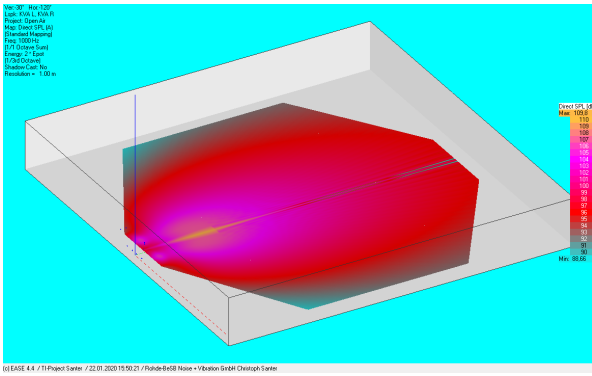
125 Hz



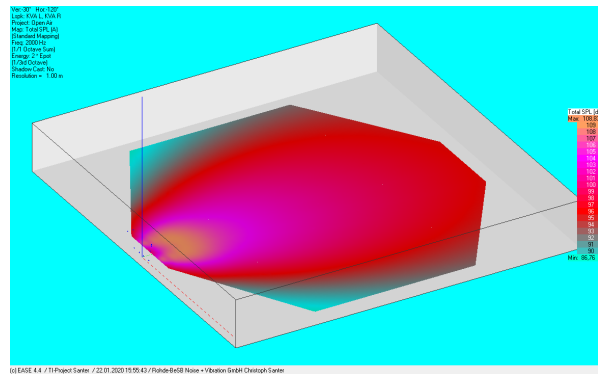
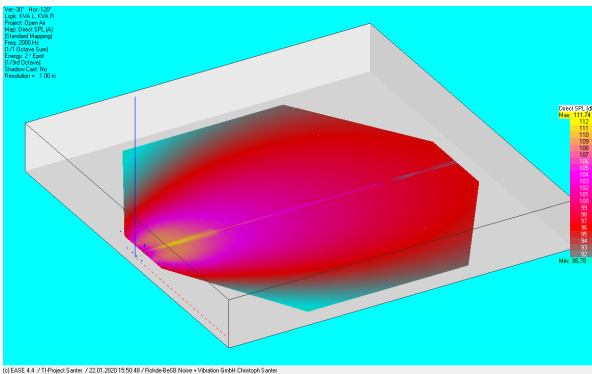
250 Hz



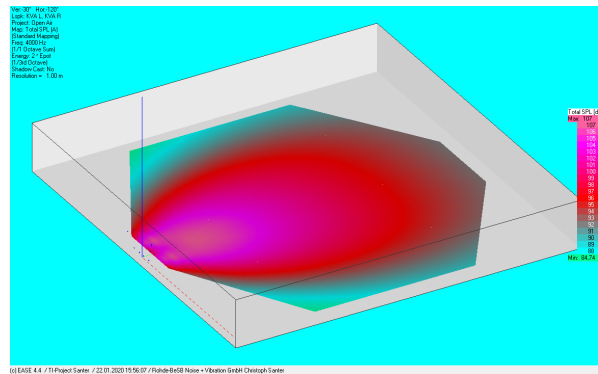
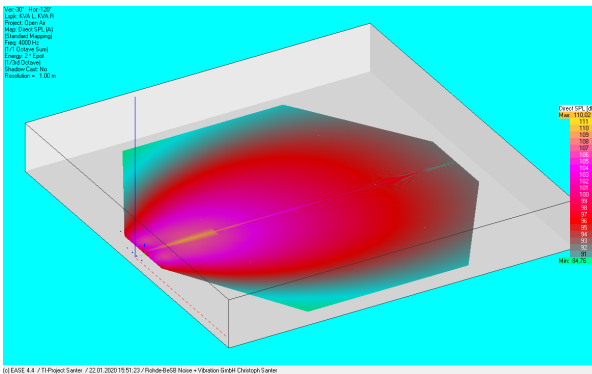
500 Hz



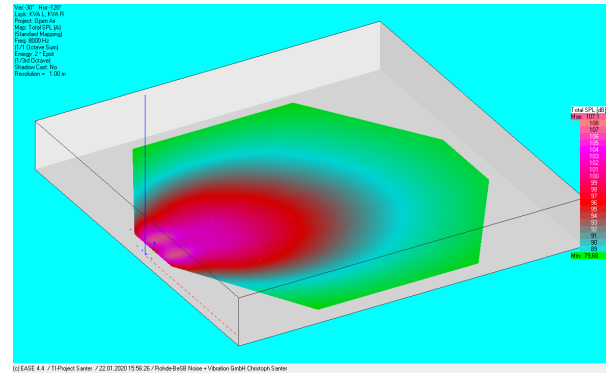
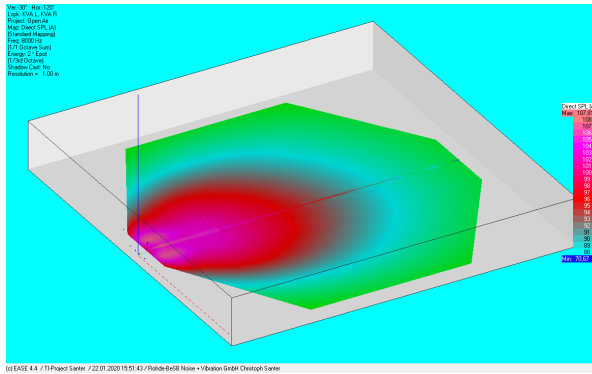
1000 Hz



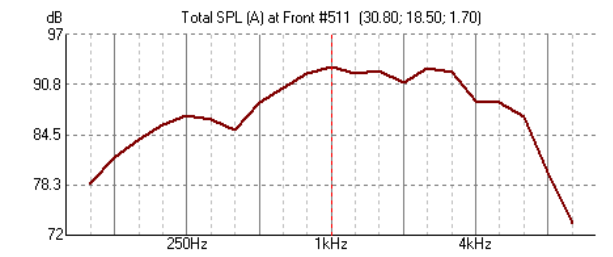
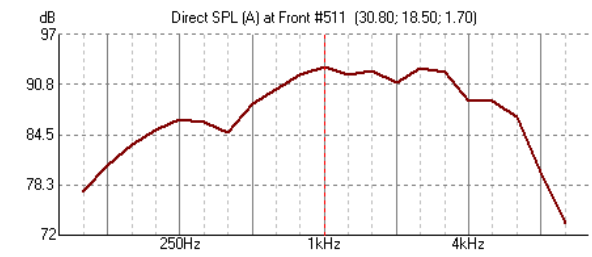
2000 Hz



4000 Hz

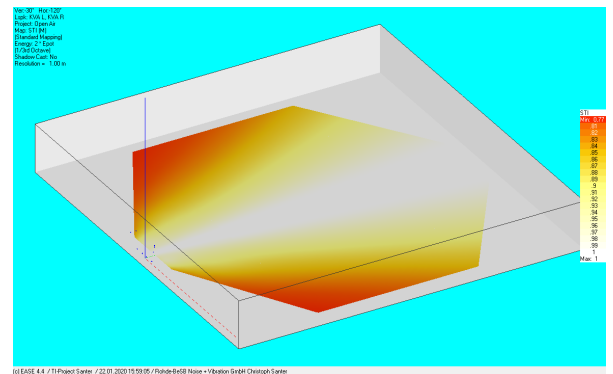
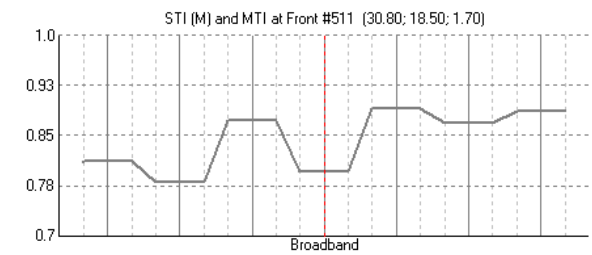


8000 Hz



SPL overall

STI



STI