

Frühlingstage der SSA
3. April 2025, Yverdon

Anwendung und Grenzen der Auralisation im Bereich der Raumakustik

Victor Desarnaulds

EcoAcoustique SA, 24. av. Université, 1005 Lausanne, desarnaulds@ecoacoustique.ch

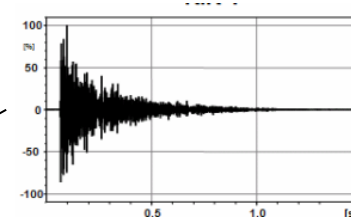
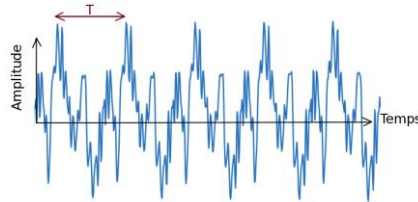
Plan der Präsentation

- 1) Einführung
- 2) Beispiel 1: Verständlichkeit mit Beschallung
- 3) Beispiel 2: Musik in einem Konzertsaal
- 4) Beispiel 3: Archäoakustik in Kirchen
- 5) Diskussion und Schlussfolgerung

Einführung

- ◆ Die Auralisation ist eine Technik, die in der Raumakustik eingesetzt wird, um das Klangerlebnis in einem bestimmten Raum zu simulieren und zu reproduzieren.
- ◆ Sie ermöglicht eine realistische Hörvorstellung davon, wie ein Ton in einer bestimmten Umgebung wahrgenommen würde, wobei die akustischen Eigenschaften des Raumes berücksichtigt werden (Nachhall, Reflexionen, Absorption usw.).
- ◆ Sie ermöglicht es, die akustischen Eigenschaften eines Raumes vor dem Bau vorherzusagen und zu optimieren und verschiedene Materialien, Formen und Konfigurationen zu testen, um die gewünschte Klangqualität zu erreichen.

Einleitung - Auralisation



Studio



Kirche

$$y(t) = s(t) * h(t)$$

$$y(t) = (s * h)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

T=0.5 s

T=1.5 s



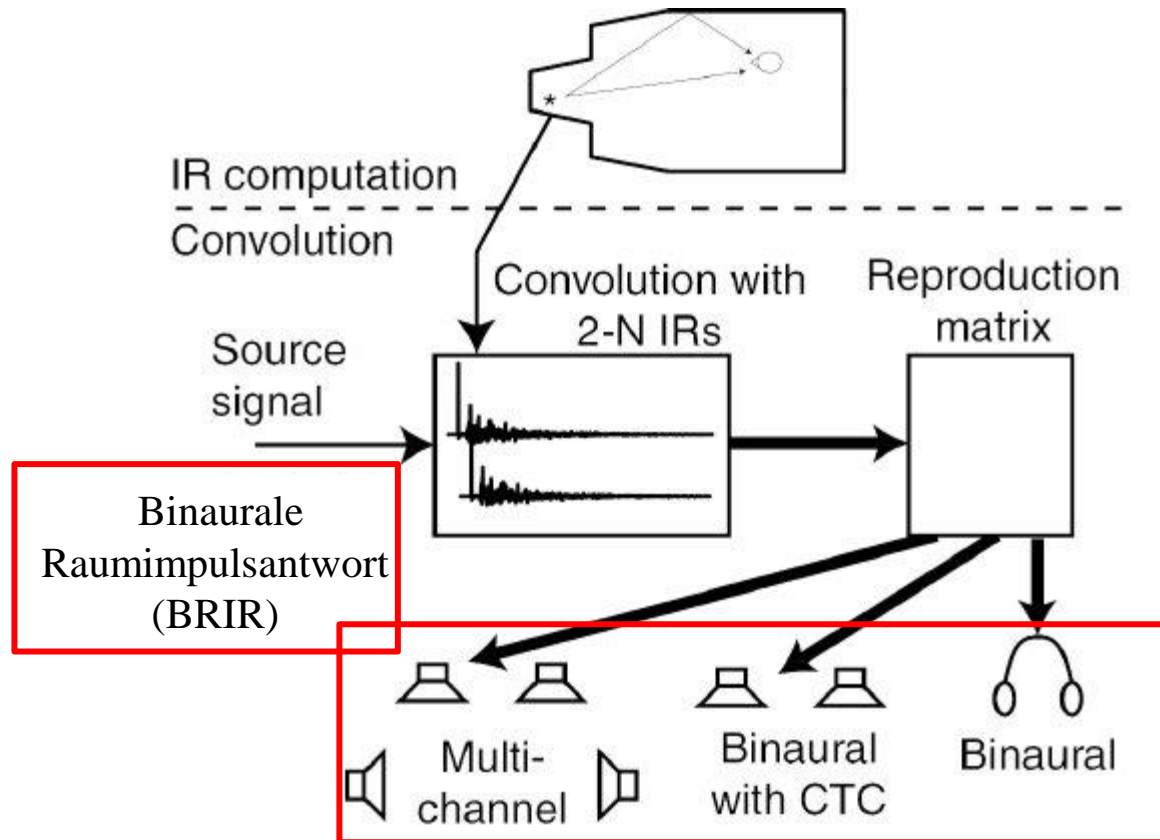
$s(t)$ ist ein in einem schalltoten Raum aufgenommener Ton

$h(t)$ ist die Impulsantwort des Raumes (für eine gegebene Quellen- und Empfangsposition)

$y(t)$ ist der Ton, der aus der Faltung von $s(t)$ und $h(t)$ entsteht

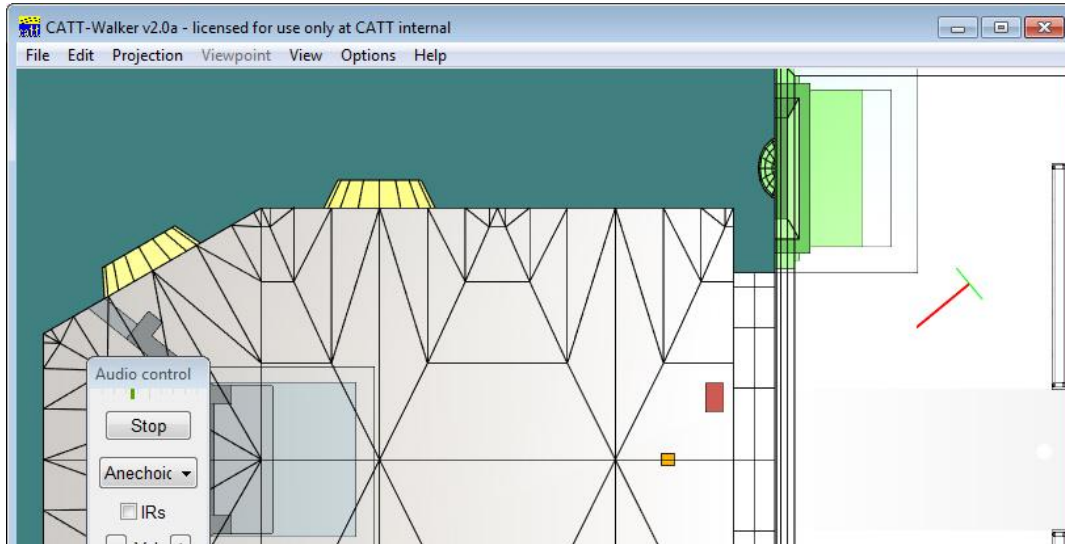
C.J.M. Hak, Room in Room Acoustics: Using Convolutions to find the Impact of a Listening Room on Recording Acoustics. International Symposium on Room Acoustics 2013.

Einleitung - Auralisation

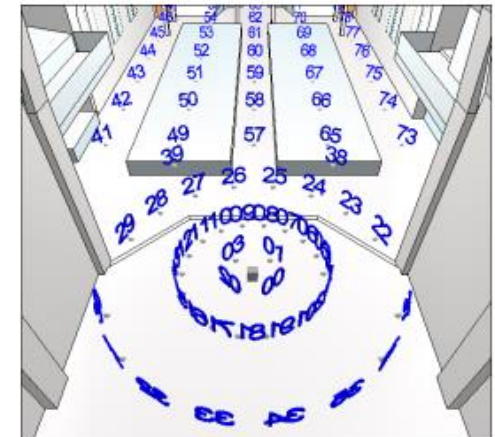
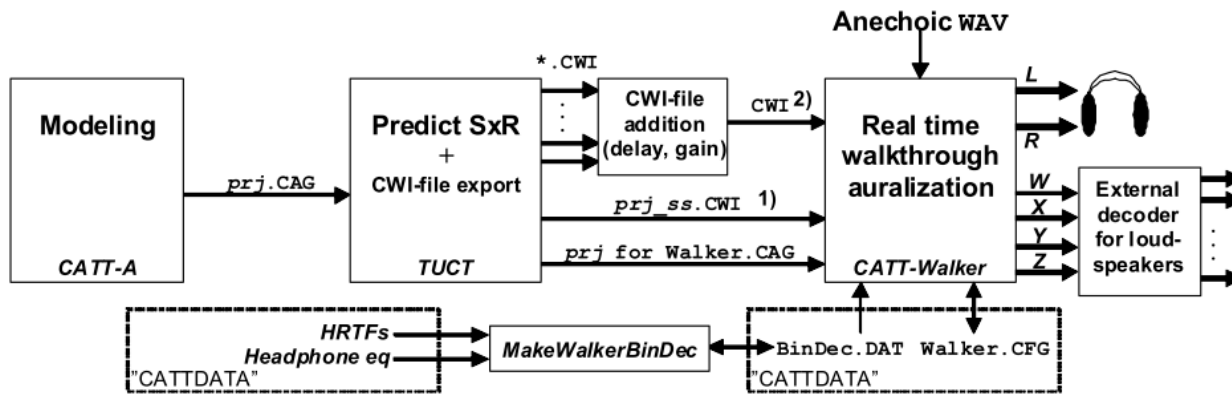


U.P. Svensson, Modelling acoustic spaces for audio virtual reality Conference: Proc. MPCA-2002

Einführung - Audiospatialisierung



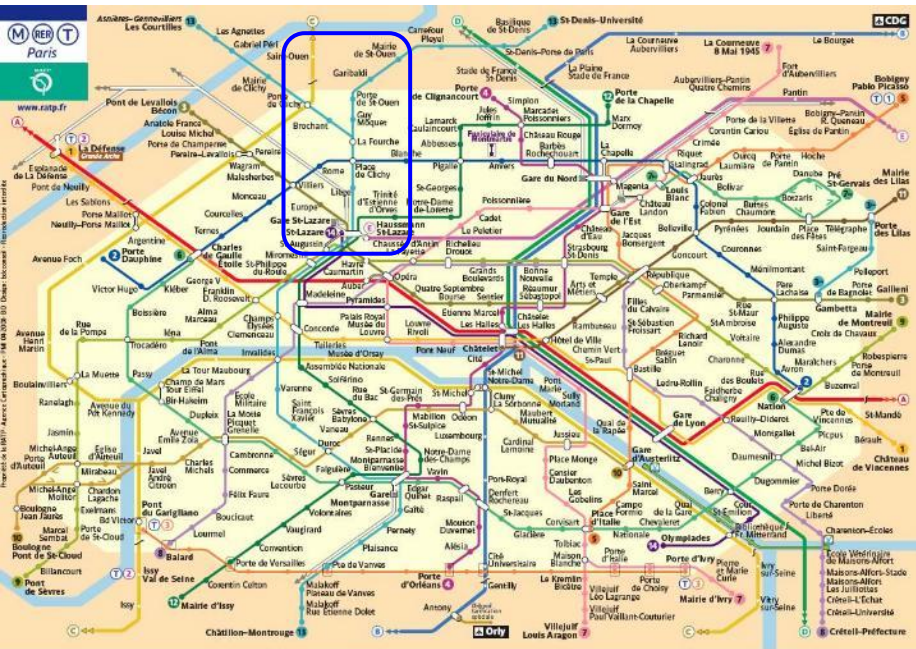
- Anhören einer statischen Situation (fester Empfänger)
- vorberechneter Klangpfad
- oder dynamisch über Kopfhörer (CATT-Walker)



https://euphonia.fr/presentation_catt.html

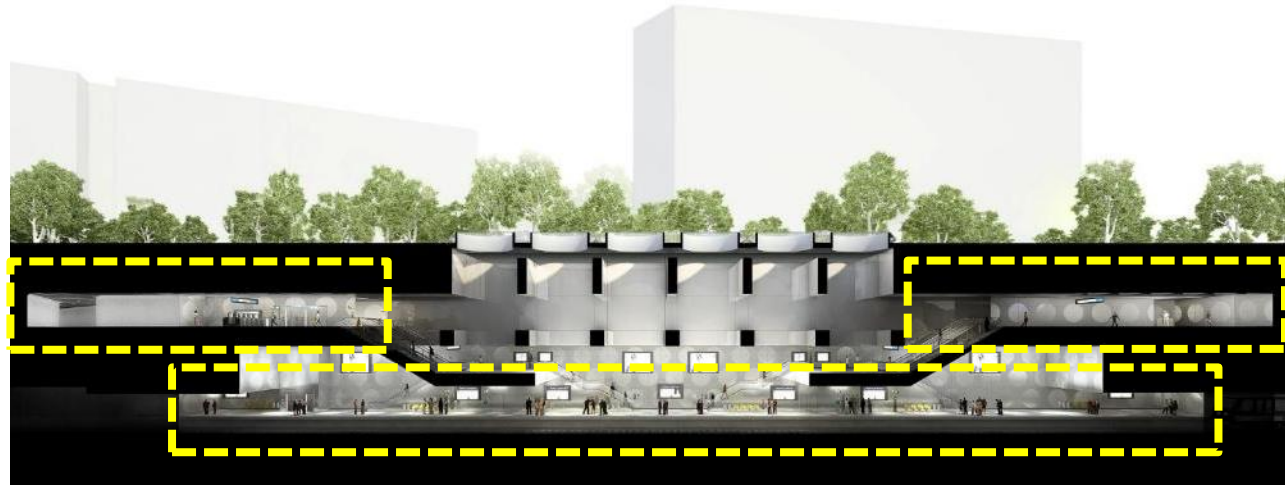
Beispiel 1: Verständlichkeit in der Metro von Paris

4 tiefe Stationen L14



Station Pont Cardinet

- ◆ Halle
- ◆ Fluktuation
- ◆ Bahnsteige




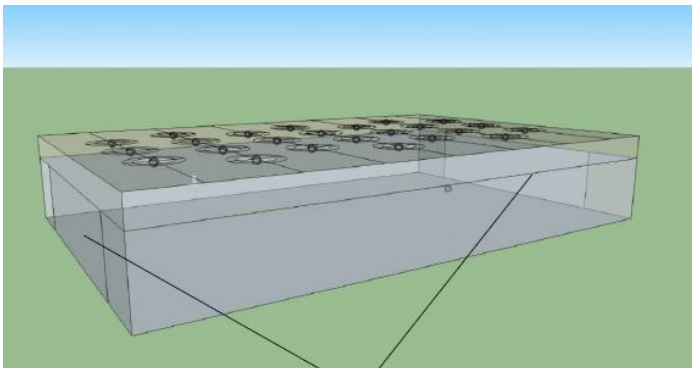
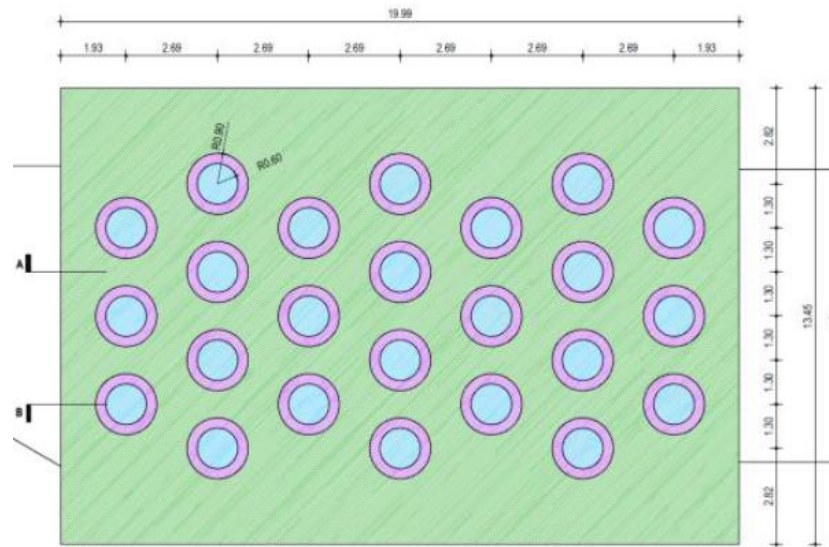
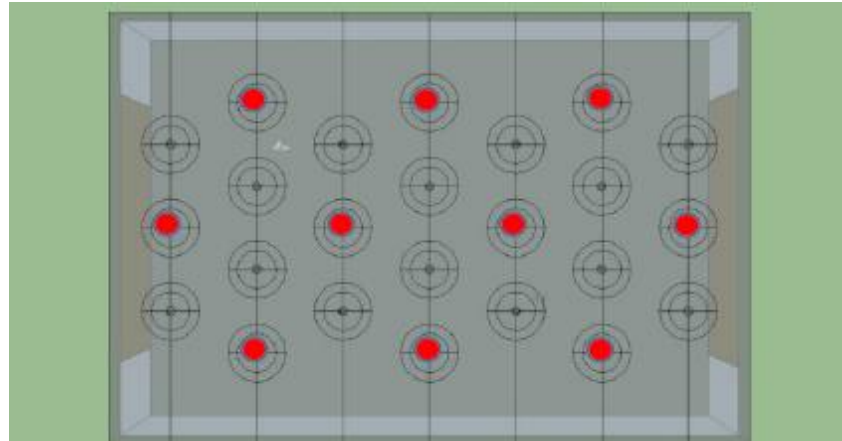
Überprüfung der Verständlichkeit durch Berechnung und Auralisation

Untersuchte Parameter :

- ◆ Akustische Behandlung (Arten, Materialpositionen)
- ◆ Beschallung (Arten, Lautsprecherpositionen)

Beispiel 1.1: Hall

- ◆ HP Deckenleuchten 
- ◆ Variante 1
(absorbierend): nur
Kreise Variante 2:
Kreise + absorbierende
Zwischendecke



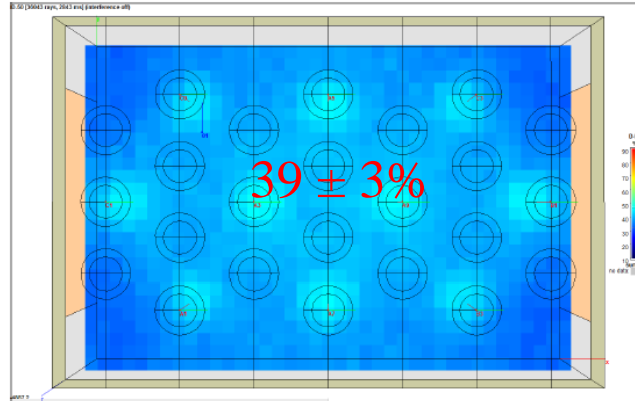
Verständlichkeit in Hall

Definition D50
(Anforderung >60%)

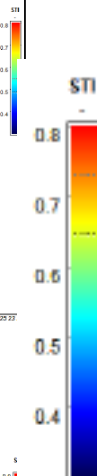
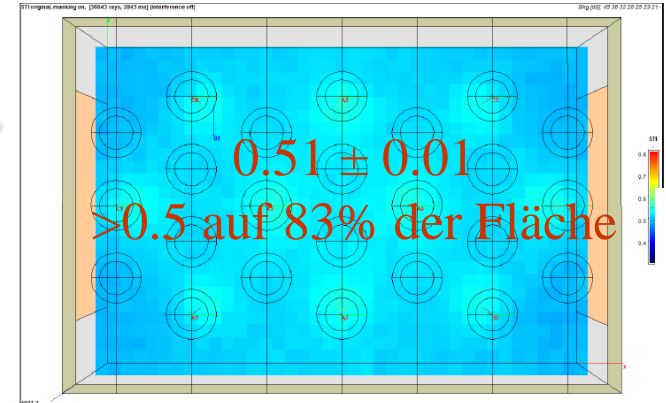
Speech Transmission Index
STI (Anforderung >0.50)

Variante 1:
Kreis

Variante 1 (4887_2_2), centre des cercles absorbants.

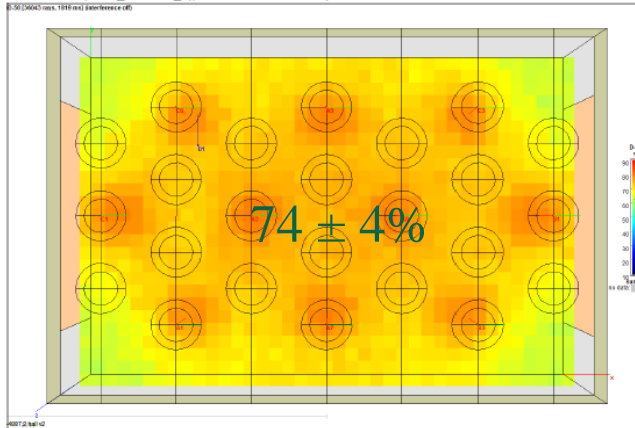


Variante 1 (4887_2_2), centre des cercles absorbant.

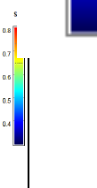
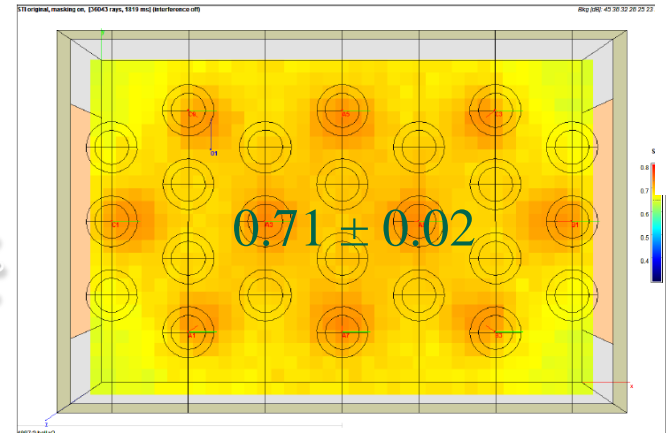


Variante 2:
Kreis + Decke

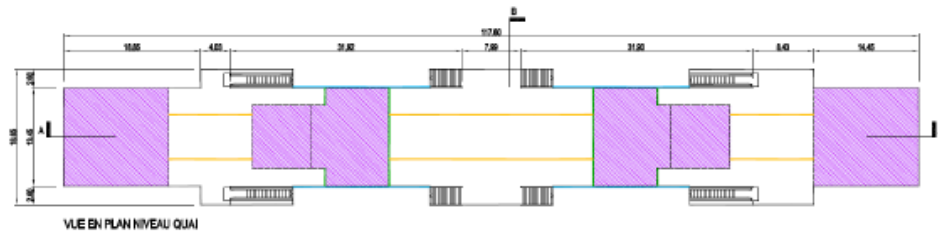
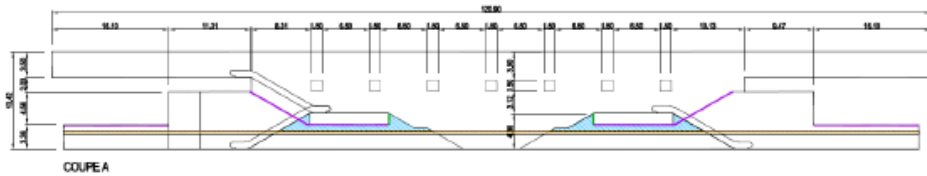
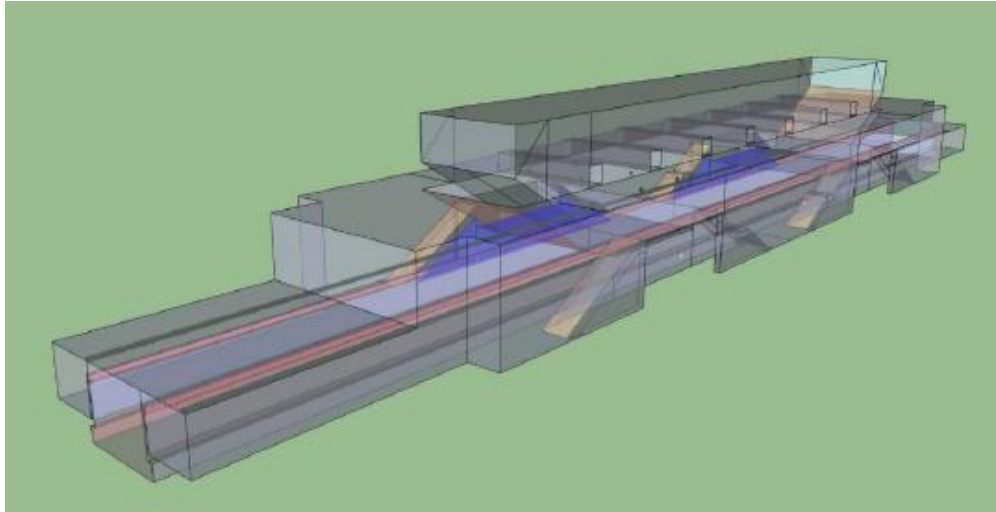
Variante 2 – (4887_2 hall v2_2), centre des cercles et plafond absorbant.



Variante 2 (4887_2 hall v2_2), centre des cercles et plafond absorbant.



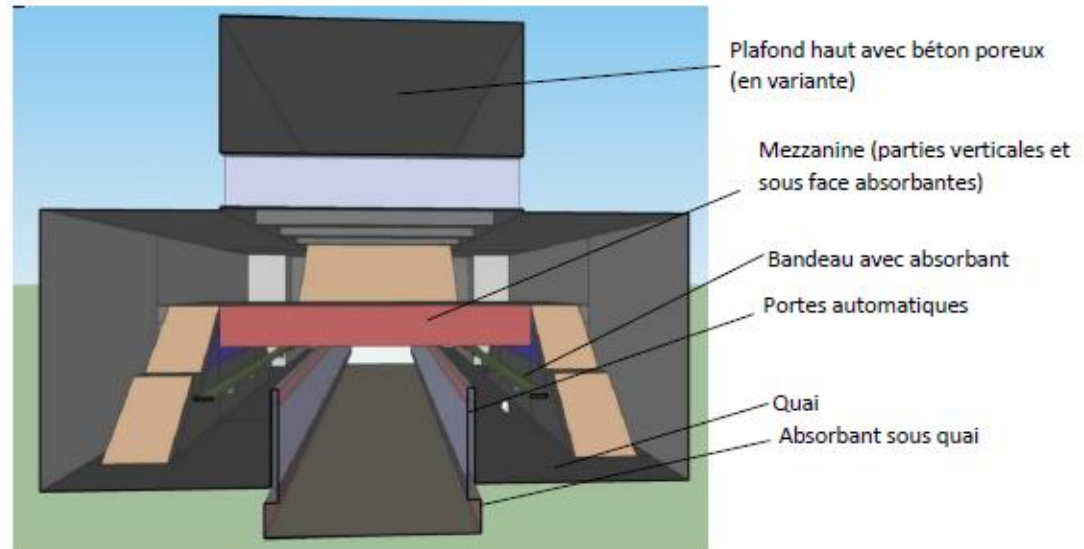
Beispiel 1.2: Bahnsteig



Sketchup-Modell

Einstellungen:

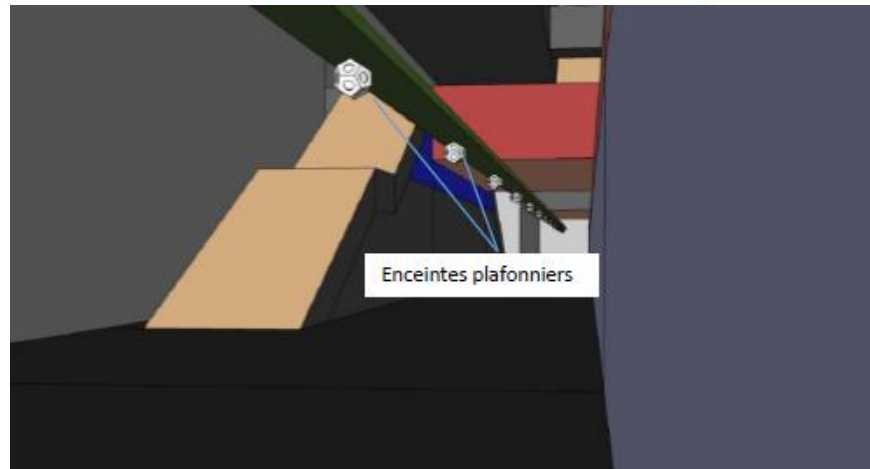
- ◆ HP Deckenleuchten (Kopfband) / Säulen (Bügel)
- ◆ Ohne/mit hoher absorbierender Decke



Varianten

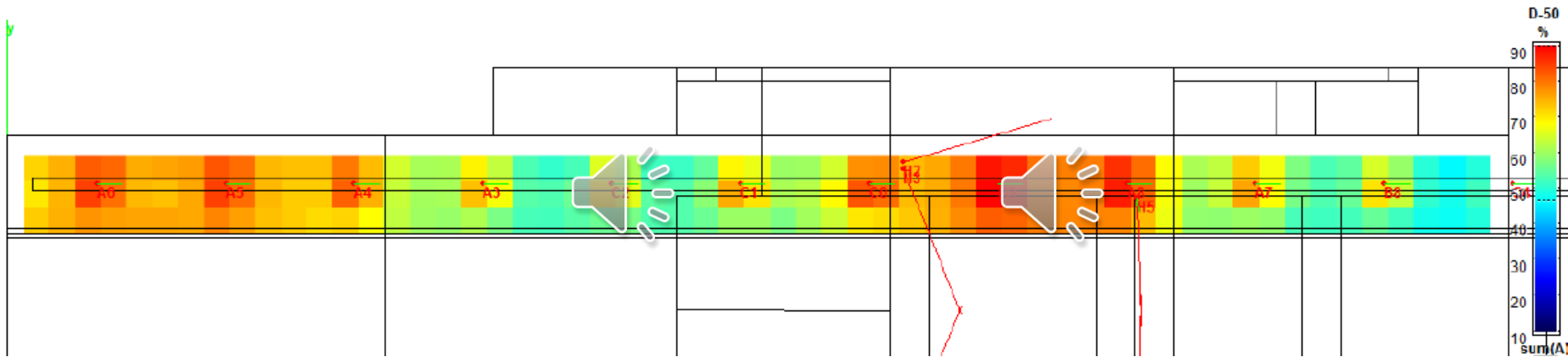
(HP/Deckenabsorber)

- ◆ V1 Deckenleuchten Ohne
- ◆ V2 Deckenleuchte Mit
- ◆ V3 Spalten Ohne
- ◆ V4 Spalten Mit

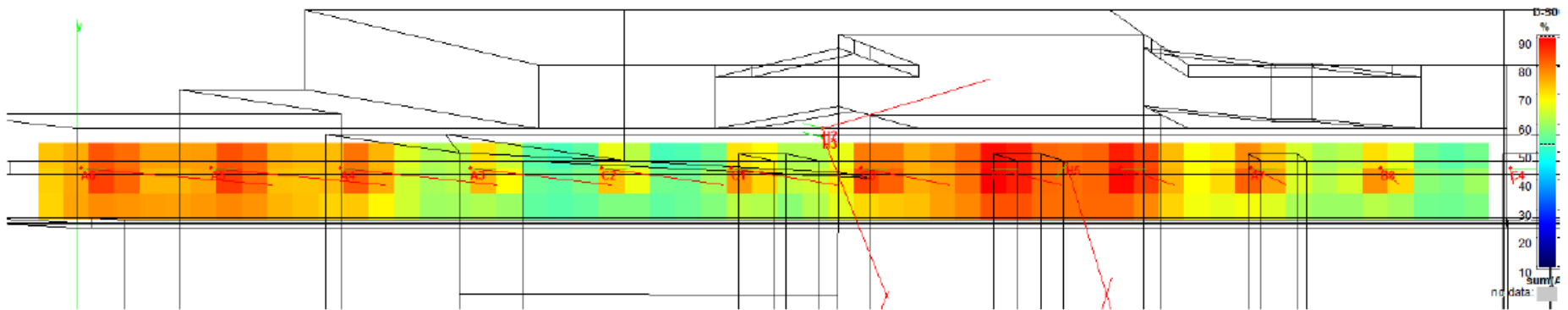


Effekt der Absorption an der Decke (D50)

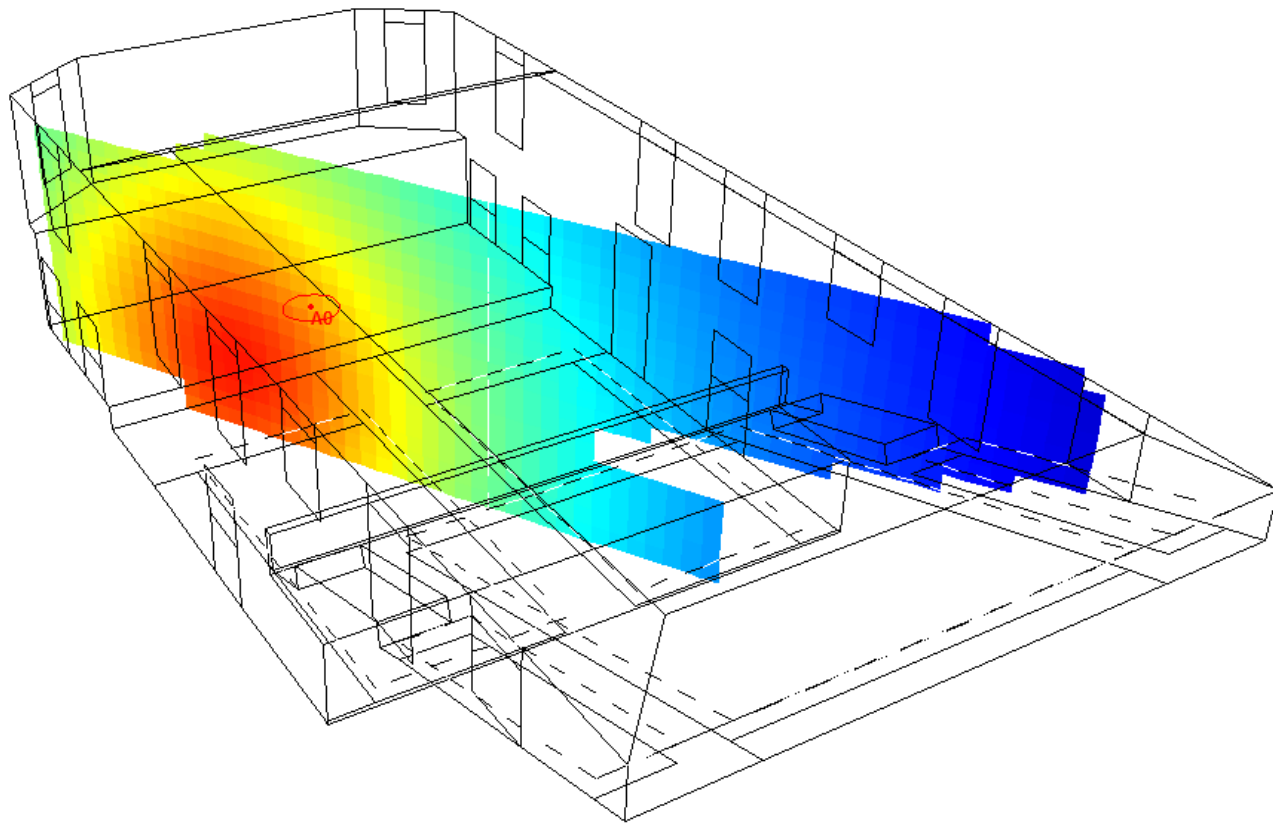
Variante 1: Hohe reflektierende Decke (Deckenlautsprecher unter der Blende)



Variante 2: Hohe absorbierende Decke (Deckenlautsprecher unter der Blende)



Beispiel 2: Konzertsaal Temple du Bas de Neuchâtel



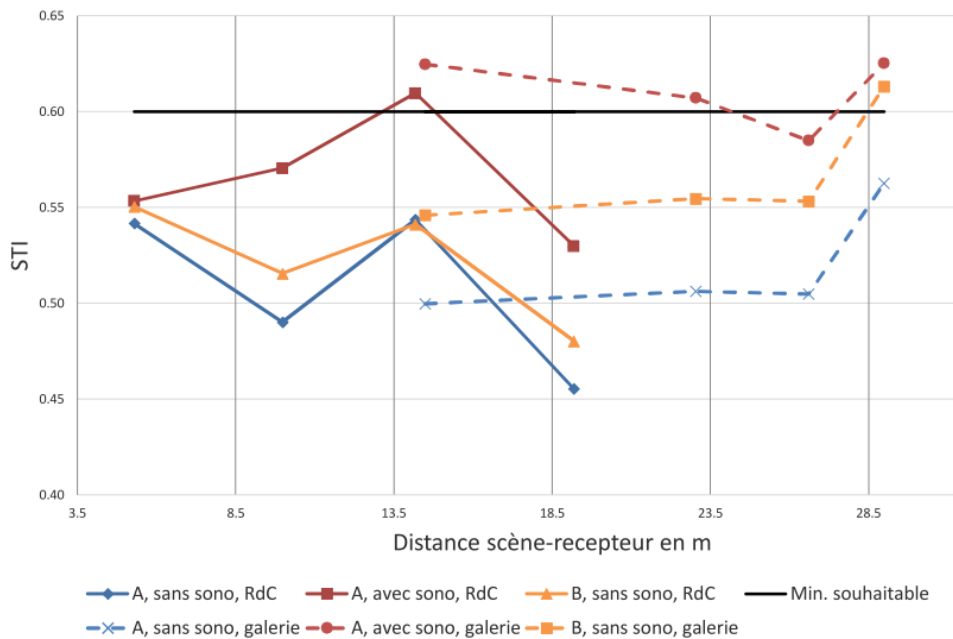
Messungen vor Renovierungsarbeiten



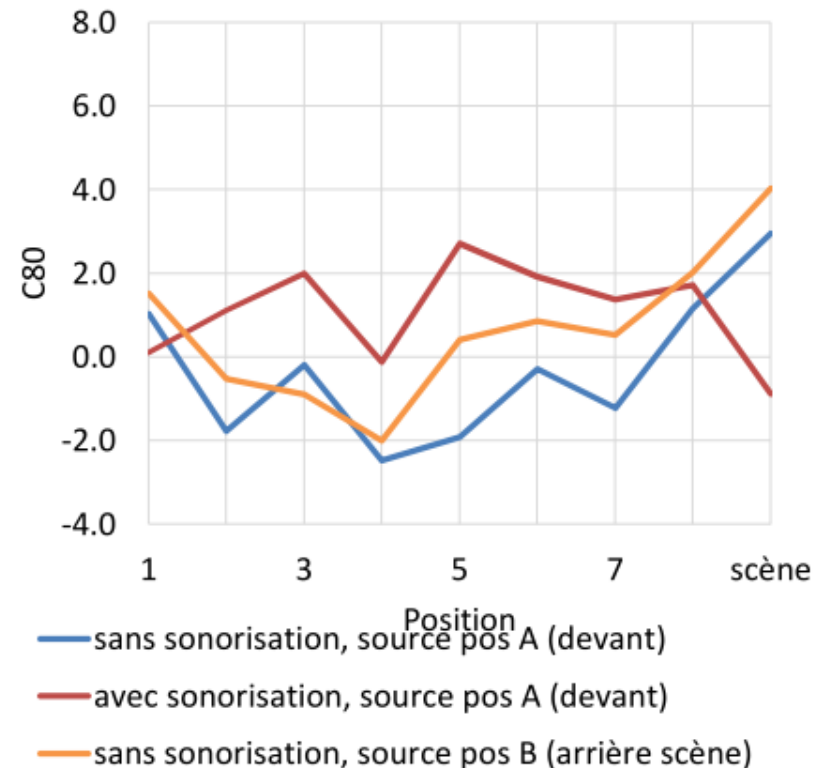
Messungen vor der Arbeit

Intelligibilité de la parole

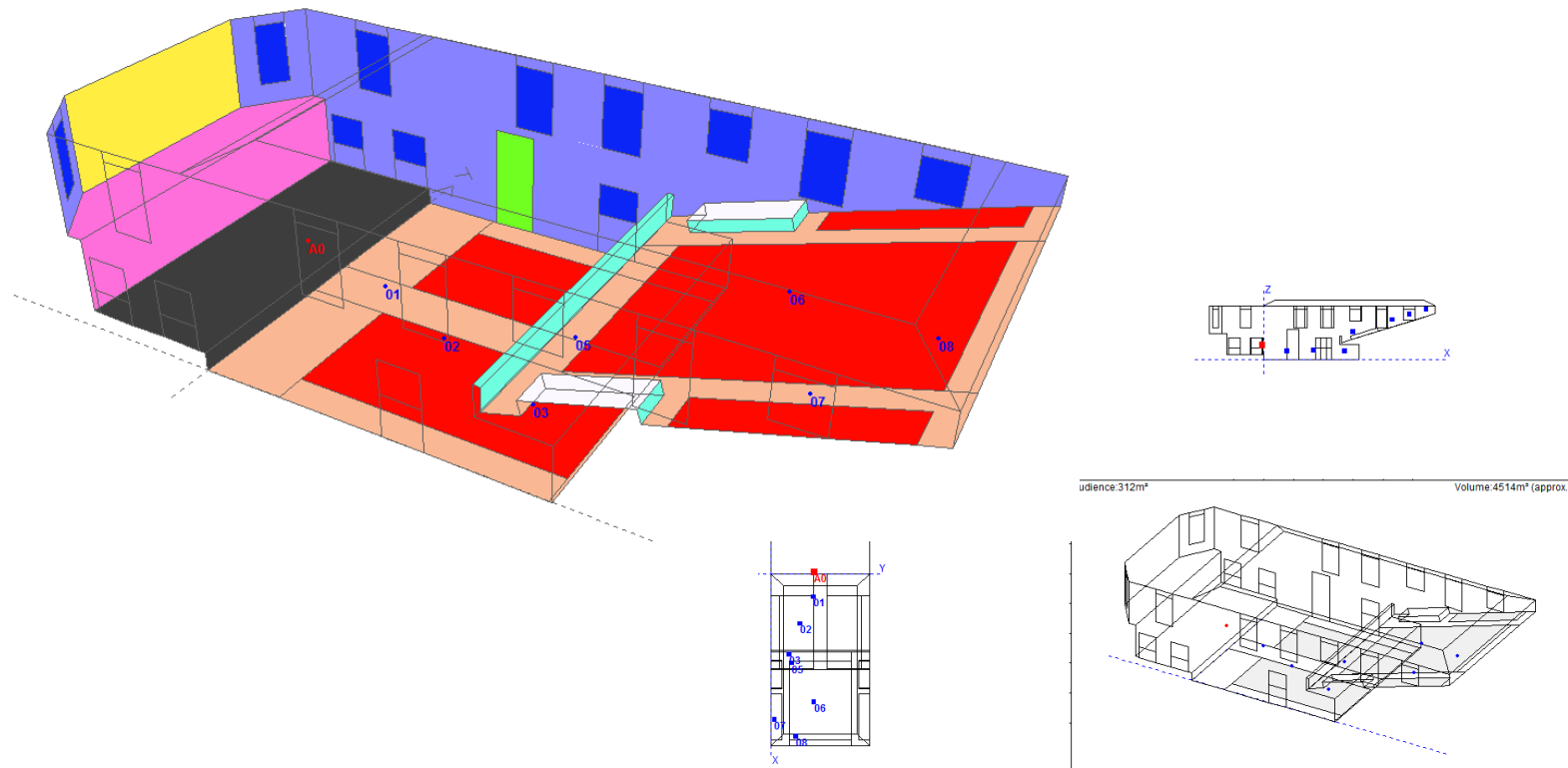
STIPA en fonction de distance ouverture scène/réception



Comparaison du C80 (500-1000 Hz) aux différents positions

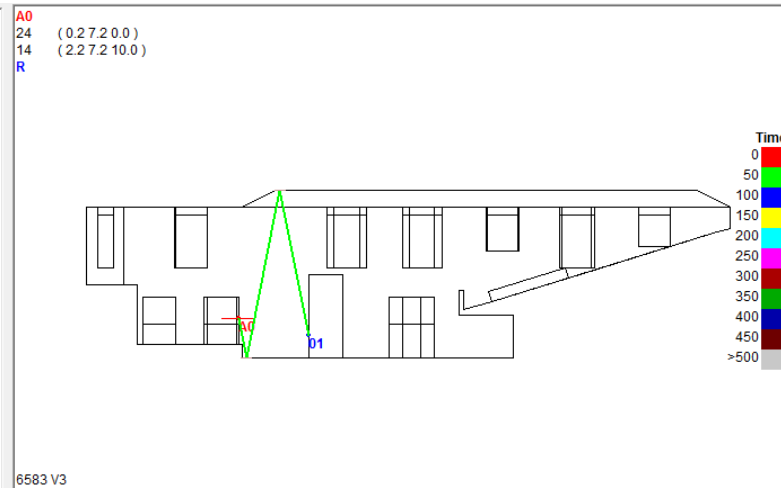
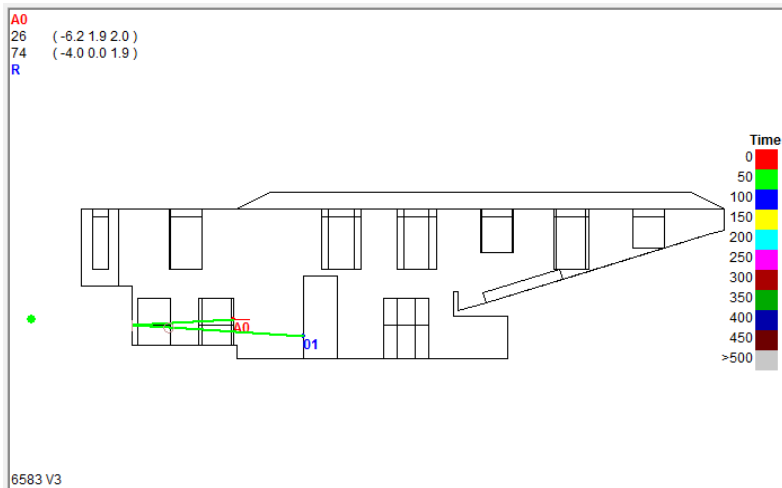


Simulationsmodell Catt Acoustic



Analyse Reflexionen Position A1

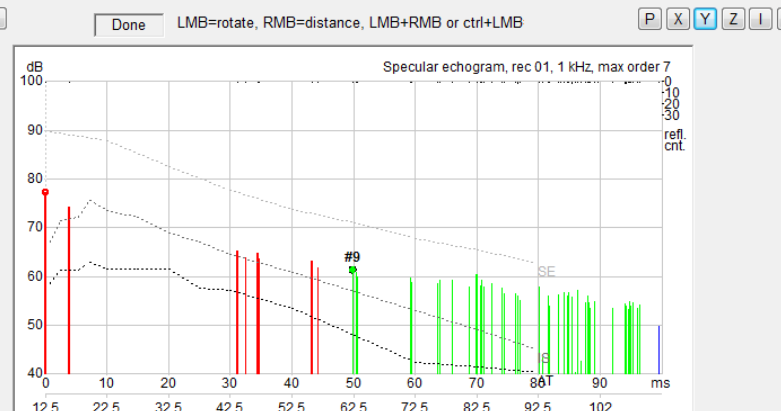
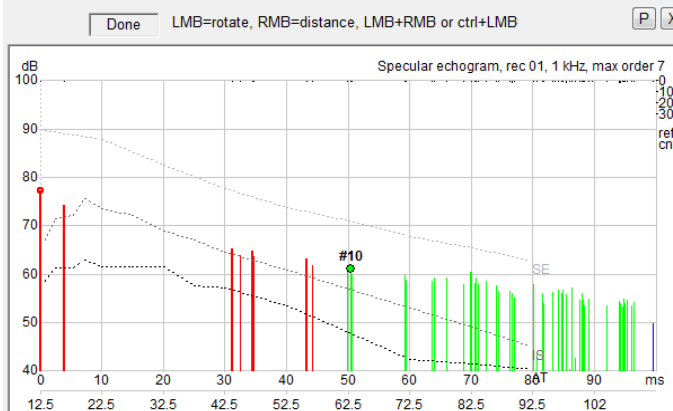
Wand- und Deckenreflexionen, Quelle A, Empfänger 1



"SE" bezieht sich auf die Hörbarkeit eines "Separate Echo".

"IS" bezieht sich auf "Image Shift or Spreading".

"AT" ist verwandt mit "Absolute Schwelle".



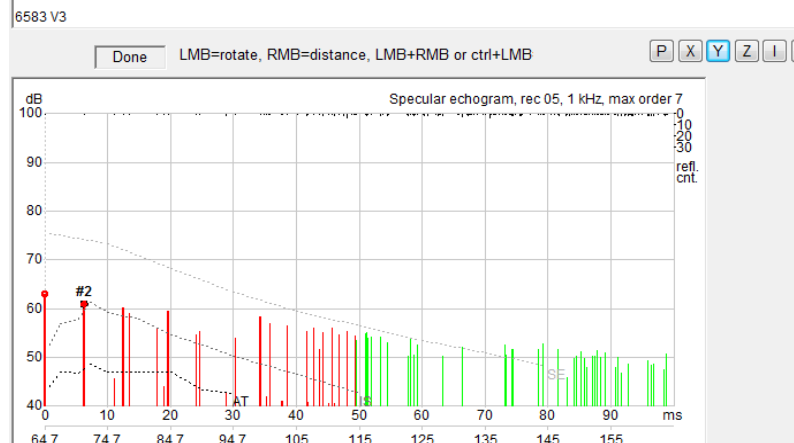
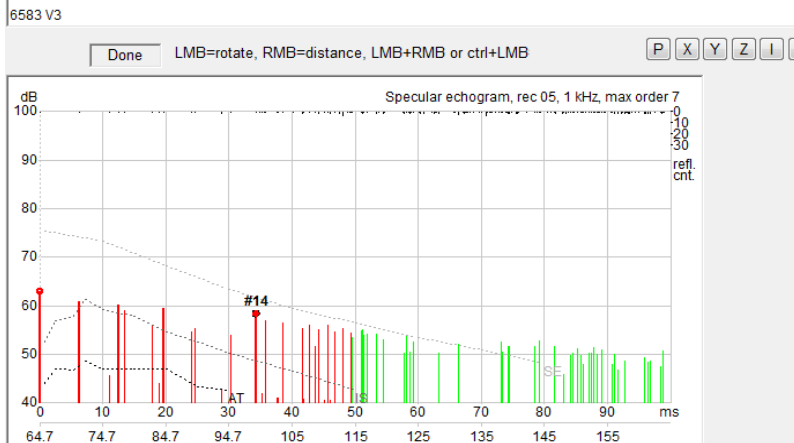
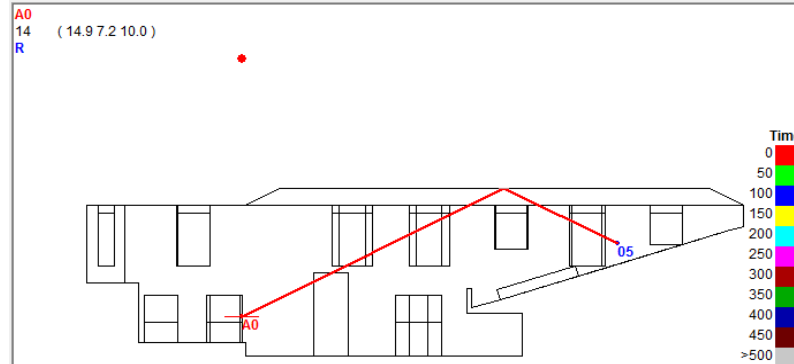
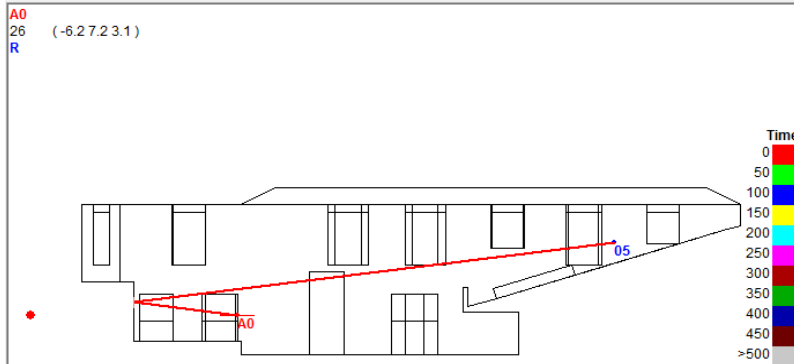
Analyse Reflexionen Position A5

Wand- und Deckenreflexionen, Quelle A, Empfänger 5

"SE" bezieht sich auf die Hörbarkeit eines "Separate Echo".

"IS" bezieht sich auf "Image Shift or Spreading".

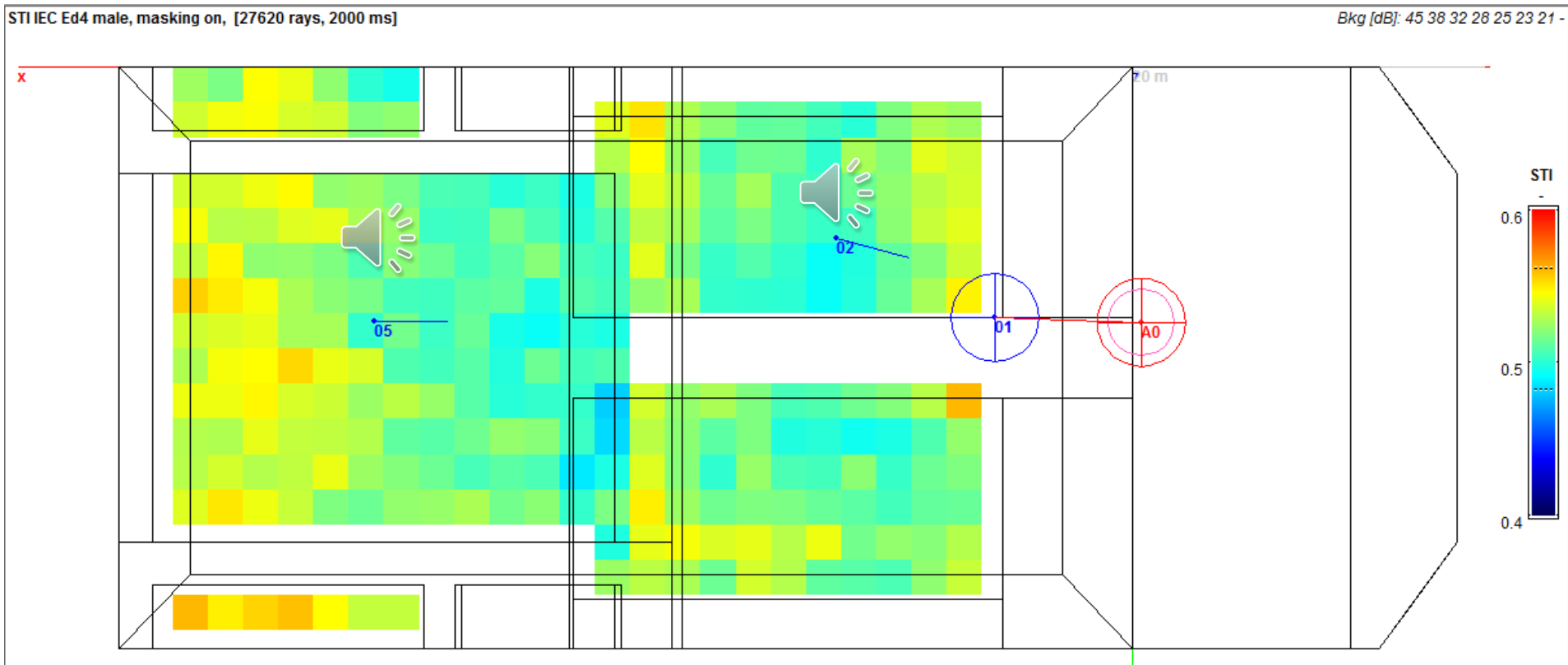
"AT" ist verwandt mit "Absolute Schwelle".



Auralisation Sprache

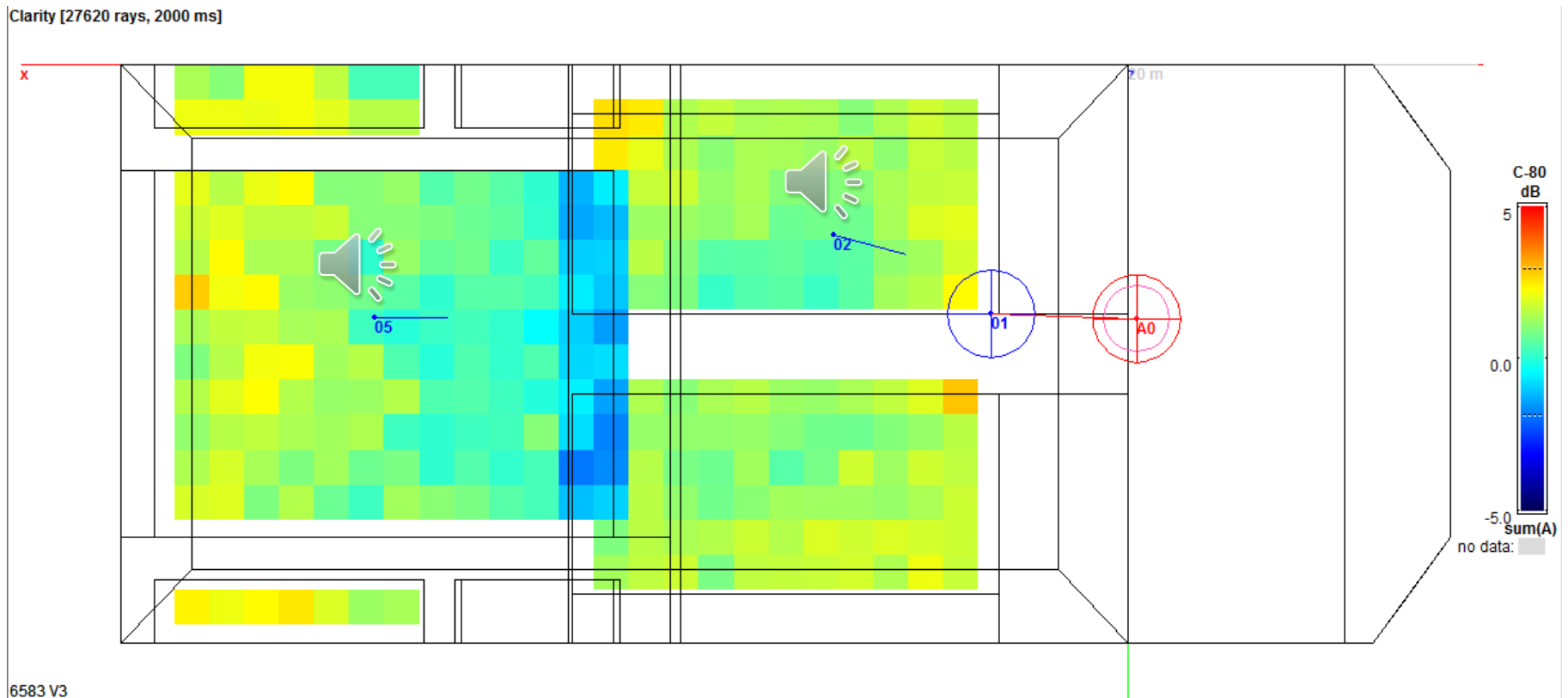
position A2 und A5

Karte der Sprachverständlichkeit (STI)



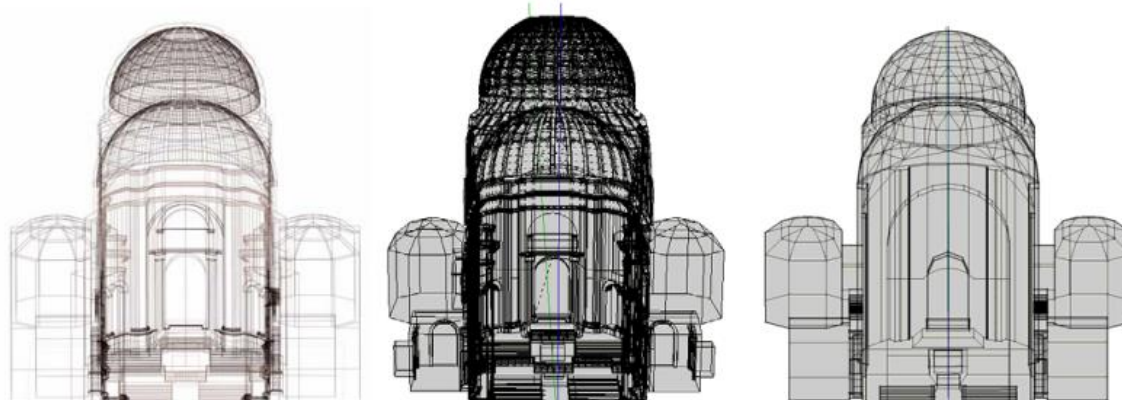
Auralisation Musik Position A2 und A5

Karte der musikalischen Klarheit (C80 in dB)



Beispiel 3: Archäoakustik

Kathedrale von Sevilla



T_{30m} (s)	EDT_m (s)	T_{Sm} (ms)	C_{80m} (dB)	D_{50m} (-)	G_m (dB)	L_{Jav} (dB)	J_{LFm} (-)	STI (-)
3.75	3.54	190.25	-0.46	0.40	5.59	-1.99	0.17	0.52



Figure 2: Picture of the Royal Chapel of the Cathedral of Seville towards the altar (left) and similar view in the VR simplified model (right).

Lidia Álvarez-Morales, *VIRTUAL REALITY IN CHURCH ACOUSTICS: VISUAL AND ACOUSTIC EXPERIENCE IN THE CATHEDRAL OF SEVILLE, SPAIN*. ICSV24, London, 23-27 Juli 2017

Kathedrale von Sevilla

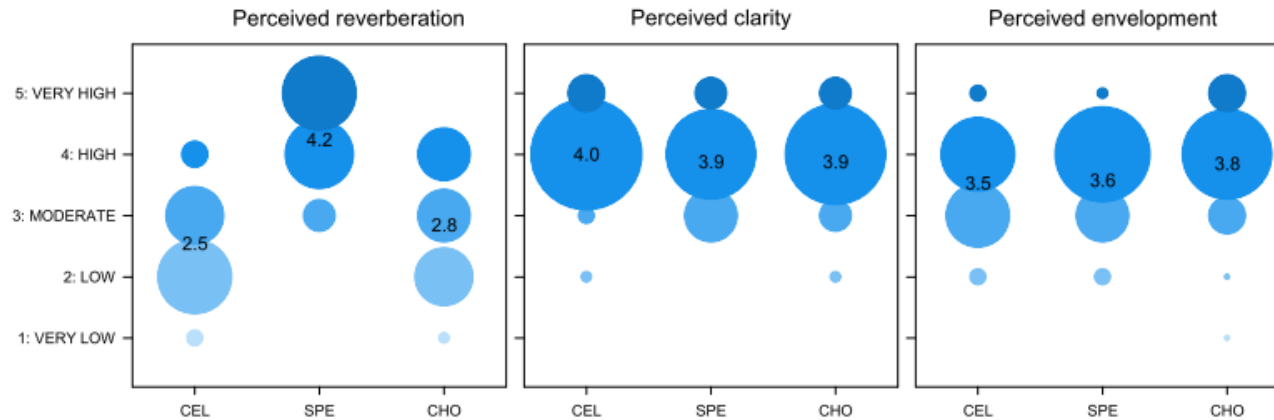


Figure 3: Listeners' perception of the reverberance of the space (left), of the clarity of the message (centre), and of the feeling of envelopment (right), in response to the three types of stimuli: Cello piece (CEL); male speech (bible reading) (SPE); and choral singing (CHO).

Mit VR-
Visualisierung

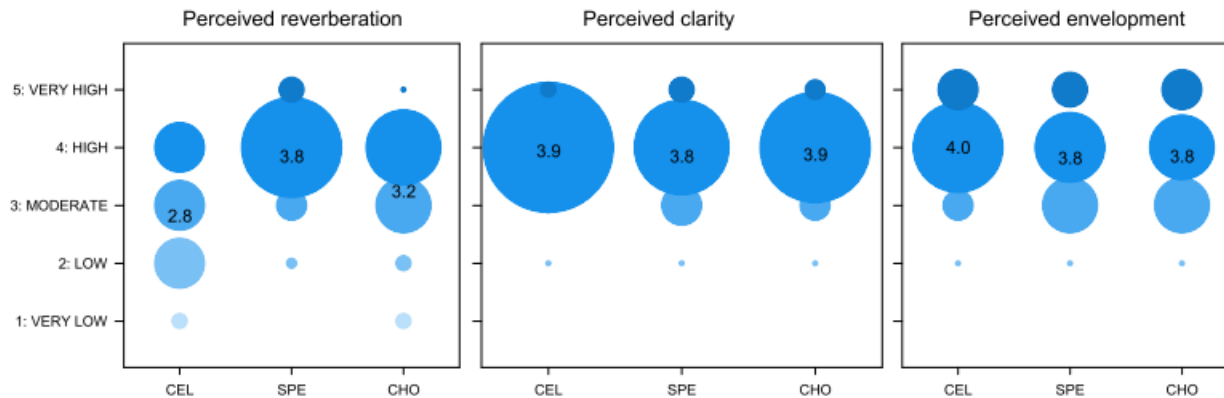
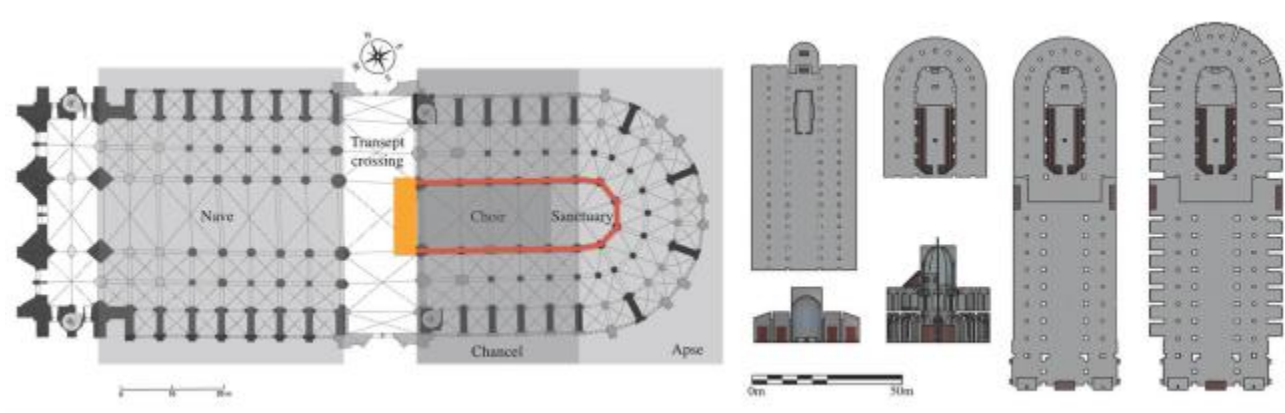


Figure 5: Listeners' perception, including visual environment, of the reverberance of the space (left), of the clarity of the message (centre), and of the feeling of envelopment (right), in response to the three types of stimuli: Cello piece (CEL); male speech (bible reading) (SPE); and choral singing (CHO).

Notre Dame de Paris - Geschichte



Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024.

Notre Dame de Paris - Messungen

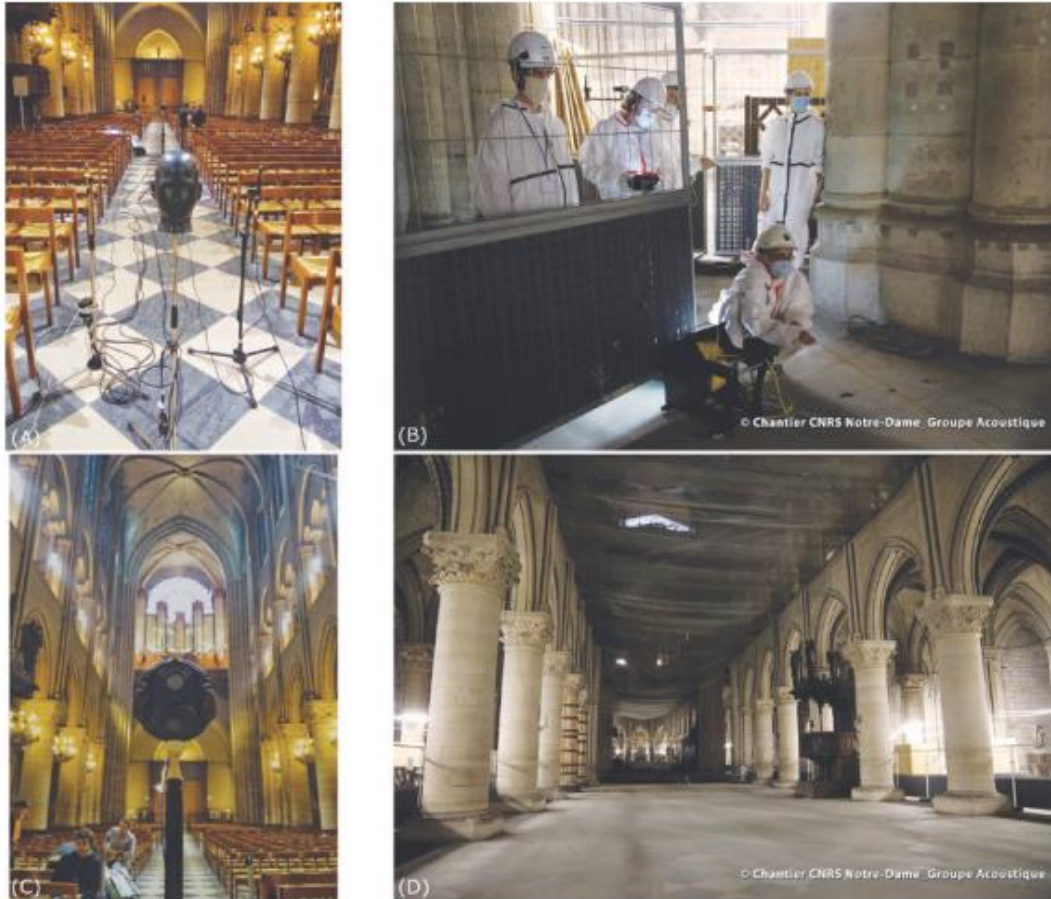


Figure 3. Prefire measurement photos. **A:** setup for binaural room impulse response measurement and the miniature dodecahedron source. Postfire measurement photos. **B:** measurement team in protective gear in the safe zone; **C:** driving the remote vehicle that towed the microphone arrays; and **D:** view of the nave, off-limits to all persons, after the initial debris cleanup. **C** and **D** reproduced from acoustic-task-force-notre-dame.dalembert.upmc.fr; courtesy of Chantier CNRS Notre-Dame Groupe Acoustique.

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024.

Notre Dame de Paris

Messungen und Simulationen

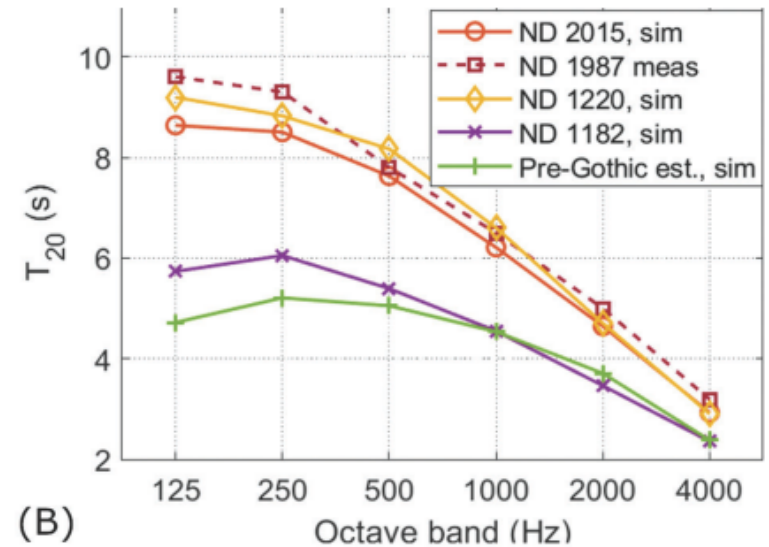
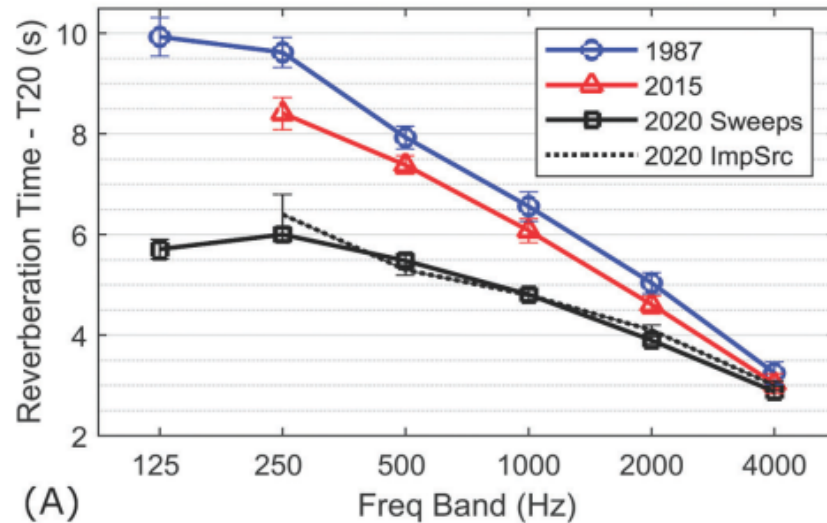


Figure 4. Mean reverberation times (T_{20}) over omnidirectional receivers for measured (meas; A) and simulated (sim; B) conditions for Notre-Dame (ND) and the speculative pre-Gothic church. Freq, frequency; ImpSrc, sweep and Impulsive type source stimuli.

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024.

Notre Dame de Paris - Simulationen

Figure 5. Center time (T_s) for unoccupied condition, comparing organ position/orientations (black arrows). Left to right: location of the contemporary grand organ in the tribune; two positions in the nave; and the location of the contemporary choir organ. Lower values indicate earlier arriving energy and hence more musical clarity. Reproduced from Canfield-Dafilou et al. (2023), with permission.



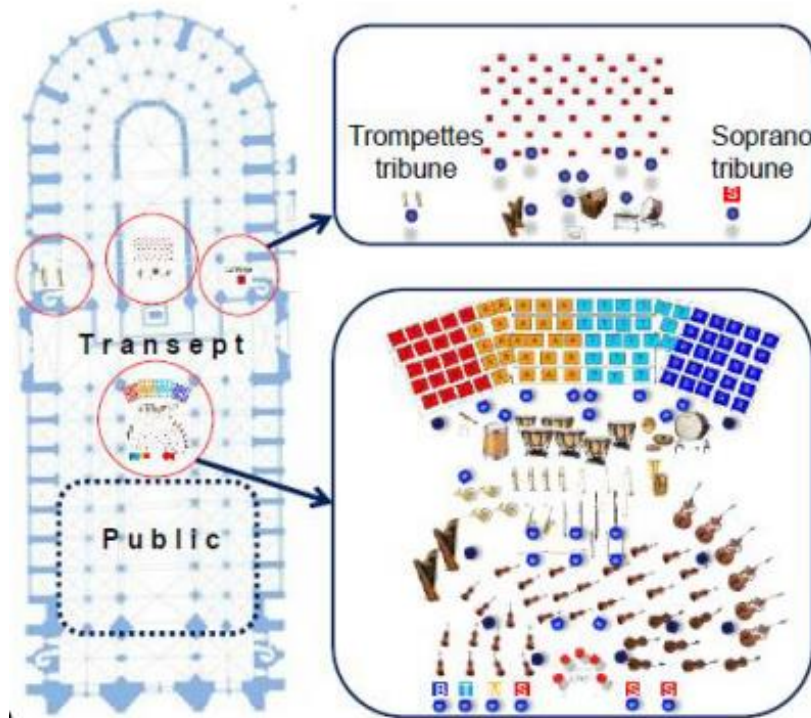
Präsentation (En) <https://youtu.be/83QClpt3hyU>

Sarabeth S. Mullins and Brian F. G. Katz, *The Past Has Ears at Notre-Dame Cathedral: An Interdisciplinary Project in Digital Archaeoacoustics*. *Acoustics Today* Volume 20, issue 2 Summer 2024.

Notre Dame de Paris - Auralisation



Notre Dame de Paris - Auralisation



Messungen

Quellposition und
45 Mikrofone

'Die Jungfrau' Jules Massenet



Simulation

Position Quelle (S)
und Empfänger

B. Postma et al., *Virtual Reality Performance Auralization in a Calibrated Model of Notre-Dame Cathedral*, Proc. EuroRegio 2016

NOTRE-DAME WHISPERS

ekko of Notre-Dame de Paris
La balade audio-immersive



DIE KLANGLICHE IDENTITÄT DER KATHEDRALE AUFWERTEN

Sorbonne Universität und Talkartive starten "Notre-Dame Whispers", einen neuartigen audio-immersiven Spaziergang, der dazu einlädt, das Pariser Monument neu zu entdecken, indem man in seine **klangliche und musikalische Geschichte** eintaucht.

ndwhispers.pasthasears.eu

4) Grenzen der Auralisation

Vorlagen

- ◆ **Genauigkeit der Simulationen:** Akustische Modelle müssen viele Parameter berücksichtigen (Raumgeometrie, Materialeigenschaften, Streuung usw.). Ein Fehler in einem dieser Parameter kann die Ergebnisse verfälschen.
- ◆ **Grenzen der Algorithmen:** Simulationsalgorithmen (z. B. Strahlenmodellierung oder numerische Methoden) haben Grenzen in Bezug auf die Genauigkeit und die Rechenzeit.
- ◆ **Computerressourcen:** Detaillierte Akustiksimulationen erfordern intensive Berechnungen, was ihre Nutzung in Echtzeit einschränken kann.
- ◆ **Nichtlineare Effekte:** Einige akustische Phänomene, wie Verzerrungen oder komplexe Wechselwirkungen zwischen Schallwellen, lassen sich nur schwer genau modellieren.
- ◆ **Menschliche Interaktion:** Die Anwesenheit von Publikum oder Musikern in einem Raum kann die Akustik verändern, was schwer zu simulieren ist.

Grenzen der Auralisierung

Diffusion und subjektive Wahrnehmung

- ◆ **Kopplung mit dem Hörraum:** Die Auralisation in einem (nicht schalltoten) Raum wird die Auralisationsbedingungen je nach dessen akustischen Eigenschaften (Tr) deutlich verändern.
- ◆ **Lautsprechersysteme:** Für eine realistische Auralisation ist ein hochwertiges Tonwiedergabesystem (z. B. ein ambisonisches oder binaurales System) erforderlich. Systeme für den Massenmarkt bieten möglicherweise keine ausreichende Klangtreue.
- ◆ **Kopfhörer:** Das Hören über Kopfhörer wird häufig zur Auralisierung verwendet, gibt aber möglicherweise die räumliche Erfahrung eines realen Raumes nicht genau wieder (Notwendigkeit der Verwendung von Head-Related Transfer Functions HRTFs).
- ◆ **Individuelle Variabilität:** Die Wahrnehmung von Geräuschen ist von Person zu Person unterschiedlich und hängt von der Morphologie des Ohrs, dem Alter und der Hörerfahrung ab.
- ◆ **Psychologischer Hintergrund:** Das subjektive Klangerlebnis kann von psychologischen oder emotionalen Faktoren beeinflusst werden, die sich nur

Schlussfolgerung und Ausblick

- ◆ **Die Auralisation ist ein mächtiges Werkzeug** für die Raumakustik, insbesondere bei der Planung oder dem Umbau von Räumen. Sie ist vor allem nützlich, um Änderungen der akustischen Parameter leichter zugänglich und wahrnehmbar zu machen
- ◆ Seine **technischen und subjektiven Grenzen** erfordern jedoch einen kritischen Ansatz und eine ständige Verbesserung der Methoden und Technologien:
- ◆ **Verbesserte Akustikmodelle:** Numerische Methoden (wie die Finite-Elemente-Methode) werden genauer und zugänglicher.
- ◆ **Virtuelle und erweiterte Realität:** Die Integration von Auralisation in VR/AR-Umgebungen eröffnet neue Möglichkeiten für immersive Erlebnisse.
- ◆ **Maschinelles Lernen:** KI könnte dabei helfen, akustische Simulationen zu optimieren und das Klangerlebnis an individuelle Vorlieben anzupassen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

