

Echtzeit-Auralisation von Konzertsälen in einem Musikproberaum

Entwicklung eines ersten Prototyps

IDN-Projekt: **Exploring the effects of room acoustics on the physical and psychological health of musicians**

Manuel Isenegger, HSLU



Bildquelle: Microsoft Designer

Projektübersicht

- Teil eines übergeordneten Projekts
 - Erforschung der **Auswirkungen der Raumakustik auf** die physische und psychische **Gesundheit** von Musikerinnen und Musikern (von Sabrina Köchli, Rose Dawn).
- Ziel
 - Entwicklung eines **Auralisationssystems**, um in **Echtzeit** Signale von Instrumenten und Stimmen mit der Impulsantwort **verschiedener Räume** zu falten.
- Erster Teil
 - Machbarkeitsstudie (durchgeführt von Lél Bartha, betreut von Manuel Isenegger, Othmar Schälli und Armin Taghipour).

Unterschied «Auralisation» und «Aktive Akustik»

- Auralisation:
 - Begriff, der **mehrere Konzepte** umfasst.
 - Wird gewöhnlich für die **Wiedergabe eines Audiosignals** (über Kopfhörer oder Lautsprecher) verwendet, wie es in einer bestimmten **physischen Umgebung** (typischerweise einem Raum) wahrgenommen würde.
- Aktive Akustik:
 - An einen **bestimmten Raum** gebunden.
 - **Hinzufügen von** künstlichem **Nachhall** zu einem Signal (entweder aufgenommen oder von einem Mikrofon) über im Raum verteilte Lautsprecher.

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (analog/historisch)

- Hallkammer

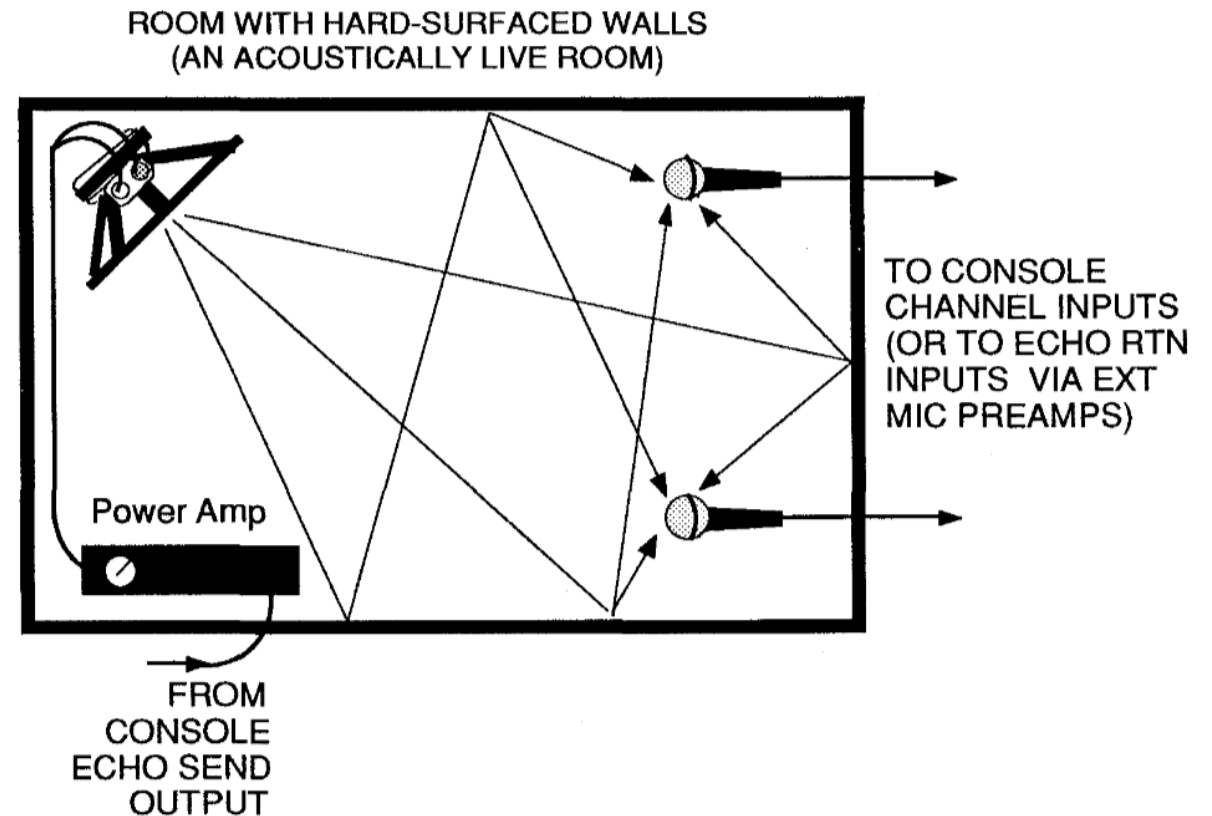


Figure 14-17. General design of an actual reverb chamber

Bildquelle: Sound Reinforcement Handbook

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (analog/historisch)

- Hallkammer
- Platten, Röhren- und Plattenhall

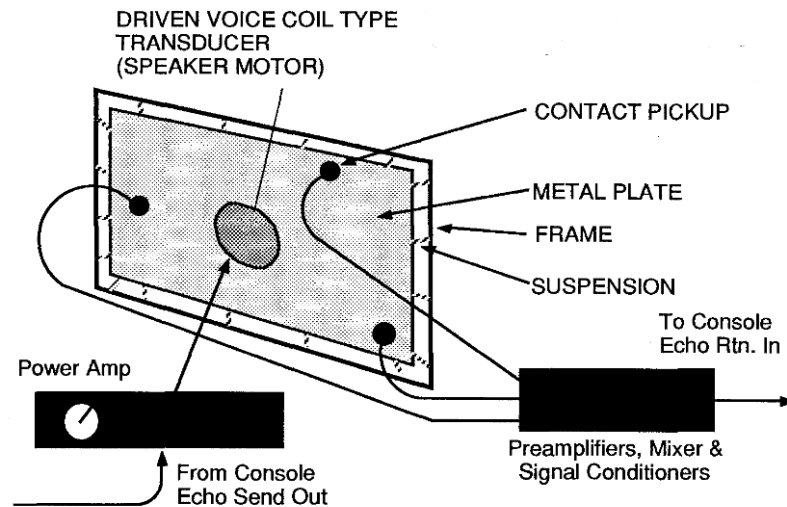


Figure 14-20. General design of a plate type reverb

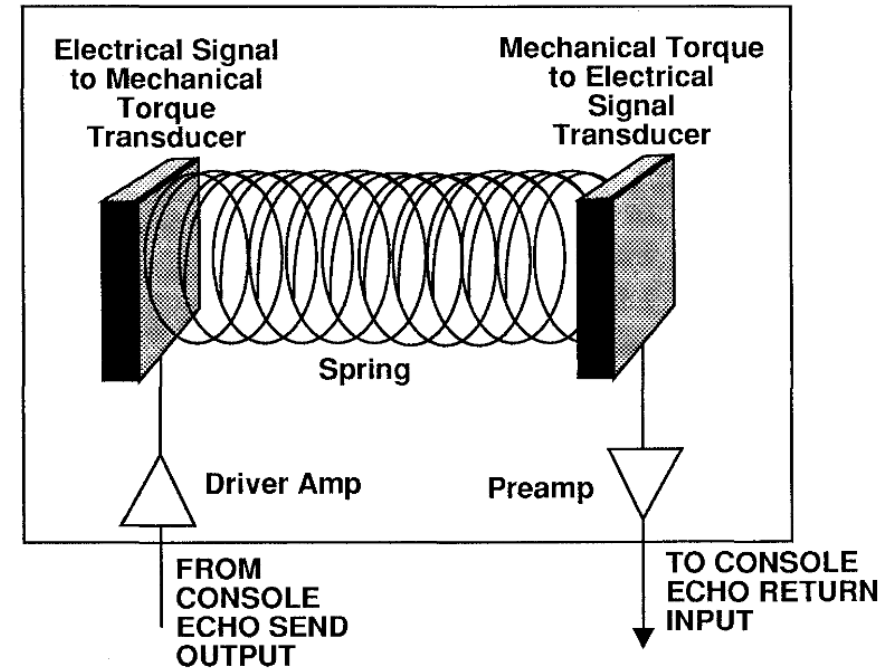


Figure 14-19. General design of a spring type reverb

Bildquelle: Sound Reinforcement Handbook

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (analog/historisch)

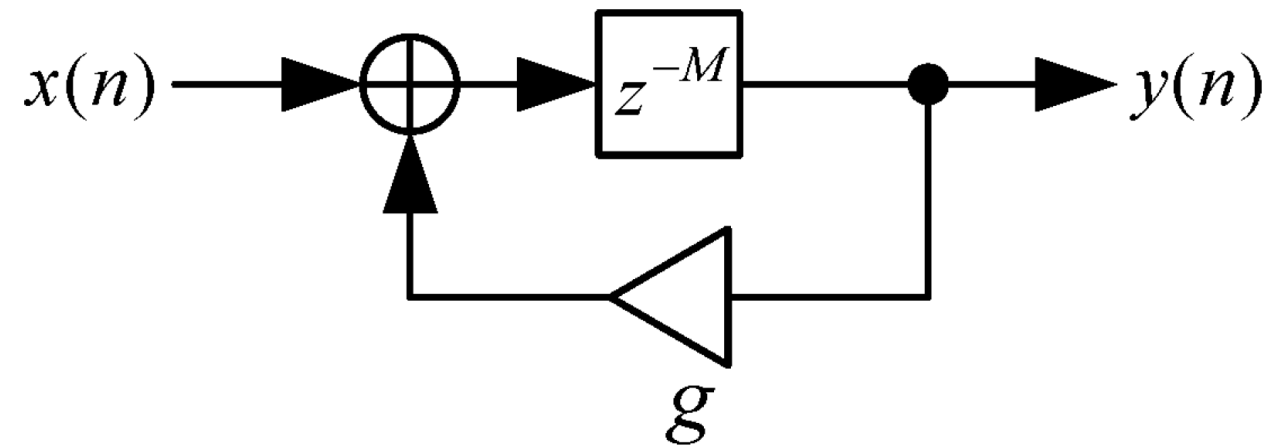
- Hallkammer
- Platten, Röhren- und Plattenhall
- Tape Delay



Bildquellen: <https://www.hispasonic.com/productos/wem-watkins-copicat/25911>;
<https://www.uaudio.jp/blog/echoplex-space-echo-and-delay-history/>

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

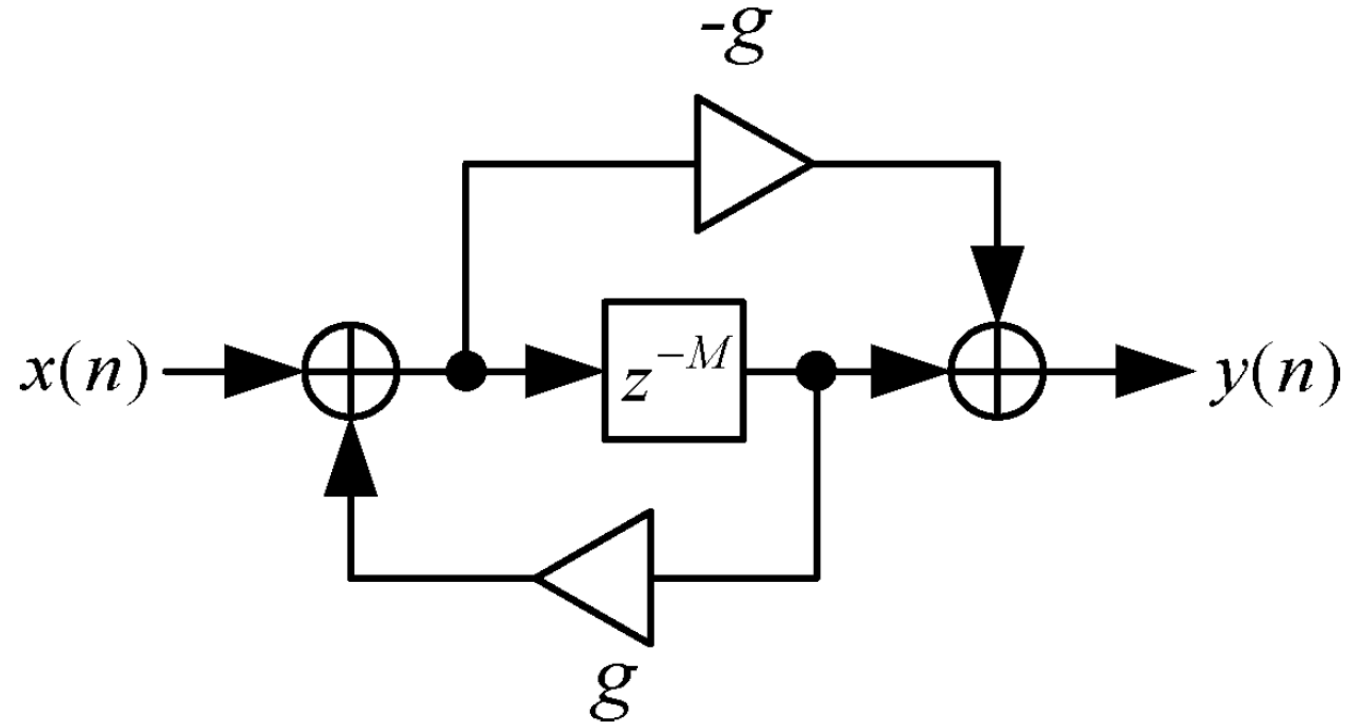
- Kammfilter



Bildquelle: Välimäki et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

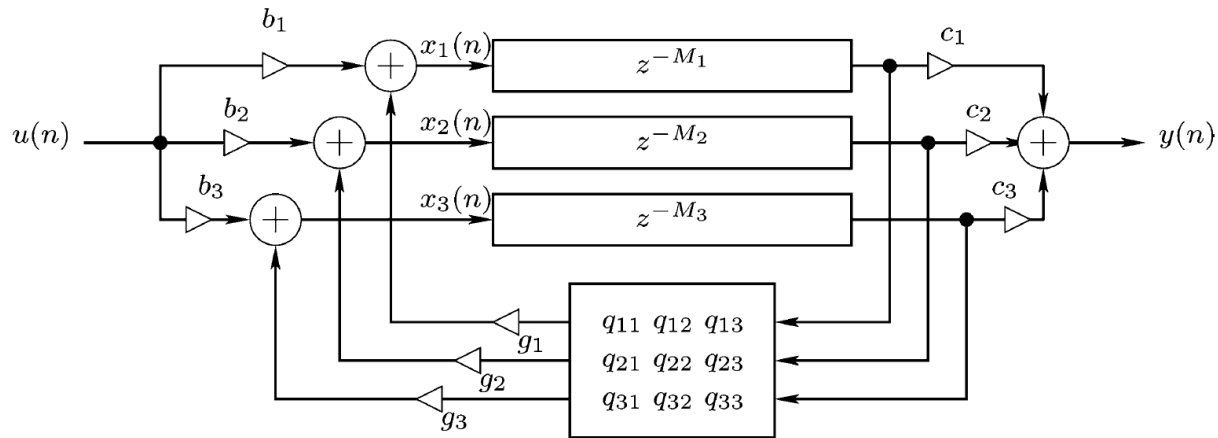
- Kammfilter
- Allpassfilter



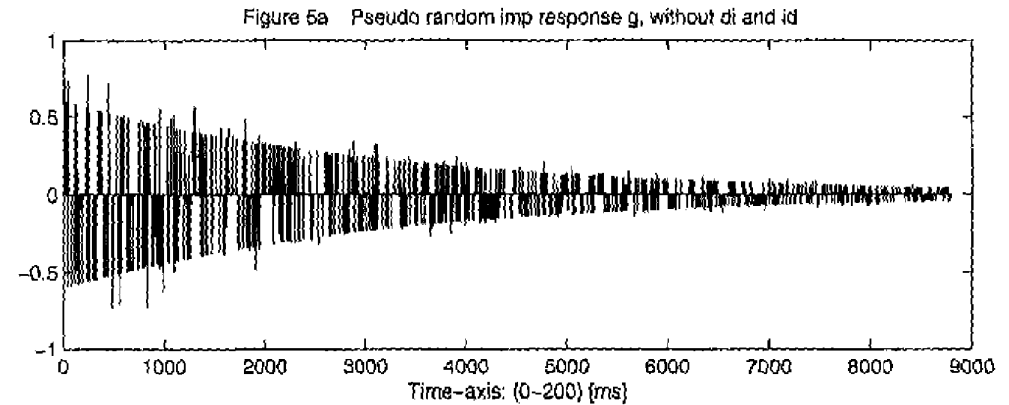
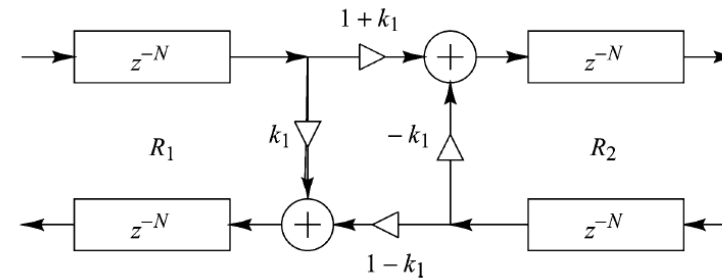
Bildquelle: Välimäki et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

- Kammfilter
- Allpassfilter
- etc.



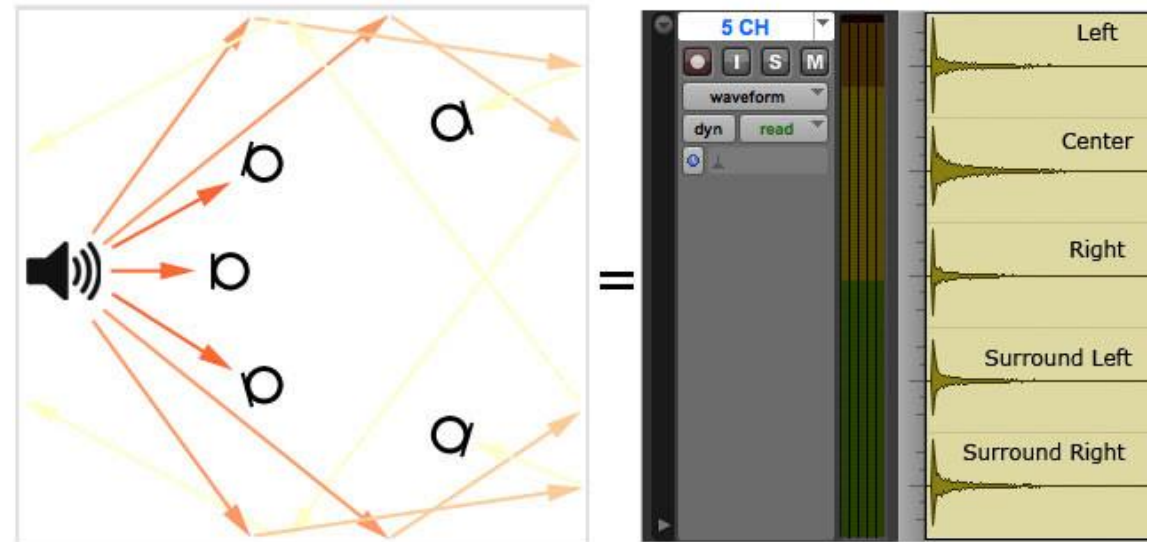
$$k_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}$$



Bildquelle: Välimäki et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Auf physikalischen Eigenschaften oder Messungen basierende Raummodelle)

- Faltung mit Impulsantwort(en)

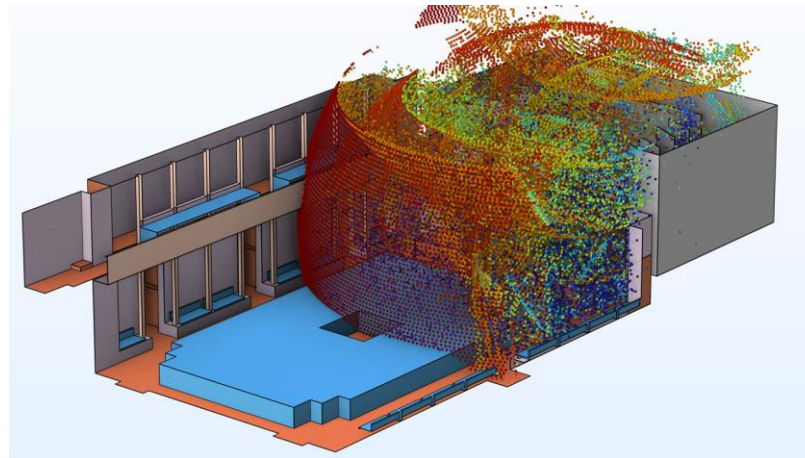


Bildquelle:

<https://www.avosound.com/en/tutorials/create-impulse-responses/convolution-reverb-multichannel>

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Auf physikalischen Eigenschaften oder Messungen basierende Raummodelle)

- Faltung mit Impulsantwort(en)
- Erhalt
 - durch Messung
 - durch Simulation:
 - Wellensimulation (z.B.: FDTD, BEM, FEM)
 - Raytracing



Bildquelle:
<https://www.comsol.com/blogs/validating-an-acoustic-ray-tracing-simulation-of-a-chamber-music-hall>



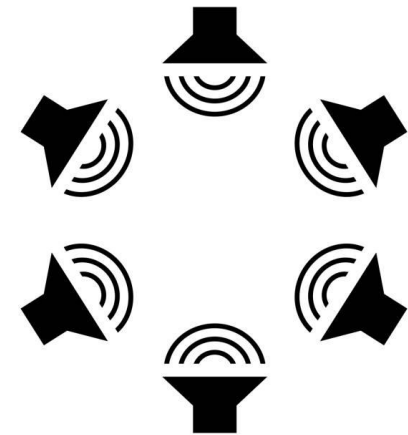
Bildquelle: Barré et al (2015)

Möglichkeiten räumlicher Wiedergabe

- Kopfhörer
 - unter Berücksichtigung von HRTF (evtl. personalisiert)
 - Möglichkeit zu Headtracking (Rotation, evtl. sogar Translation)
- Lautsprecher
 - Mono
 - Stereo
 - «Surround»:
 - Normal: 2.1, 5.1, 7.1
 - Spezial: 9.1, 11.1, 5.1.2, 7.1.4
 - Kino und Spezialanwendungen:
- 22.2, IMAX 12.0, Ambisonics, Auro-3D, Dolby Atmos, etc.



Bildquelle: Flaticon by Freepik



Bildquelle: iStockphoto LP

Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «Digital Innovation Lab» des
Royal College of Music



Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «SoundLab» von Arup



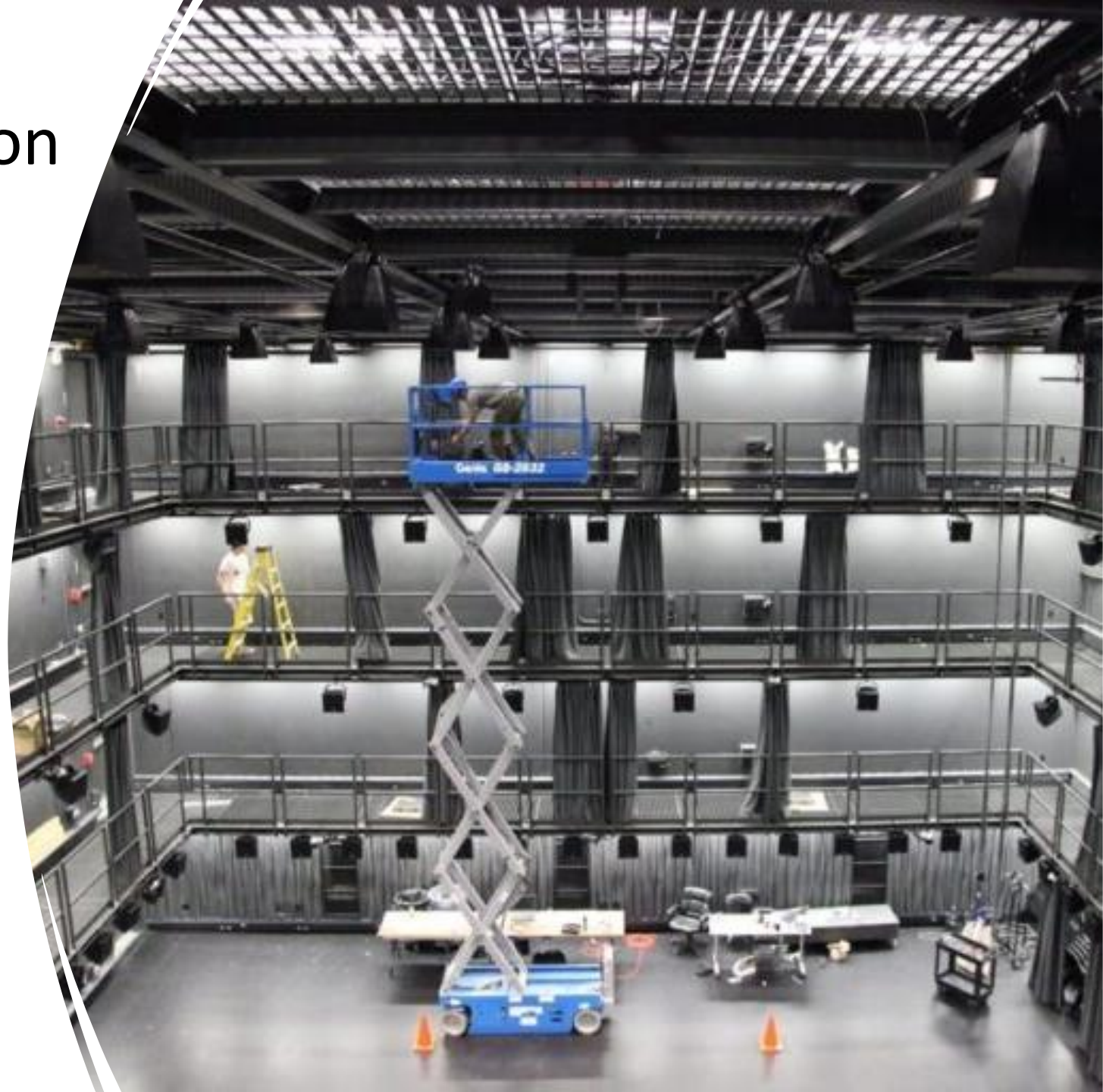
Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «AuraLab» der EMPA



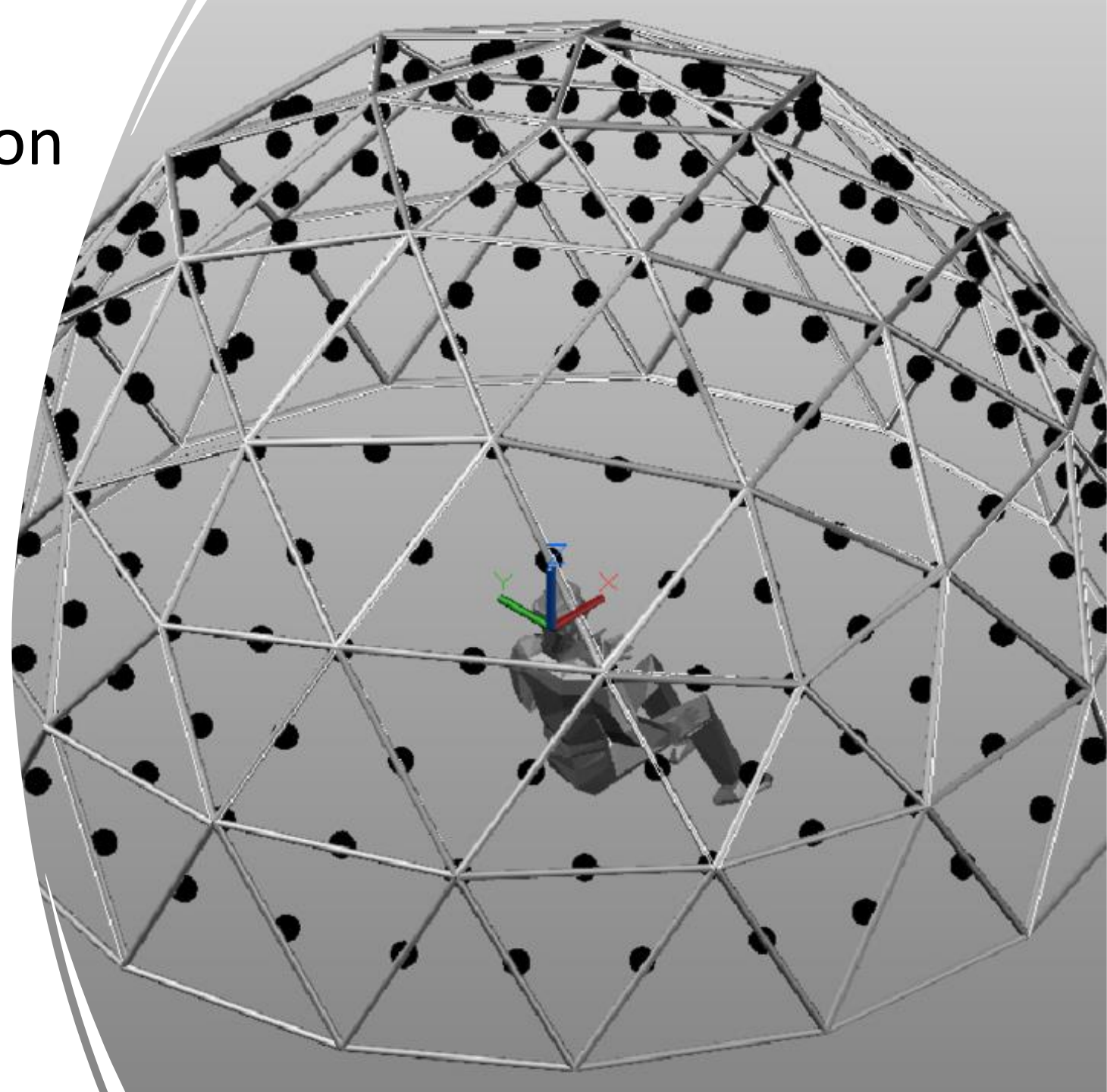
Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «The Cube» des Virginia Tech



Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «The Dome» der
Universität Sydney



Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «Constellation» von Meyer Sound



Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

- «Ambiance» von L-Acoustics



Beispiele der Auralisation und aktiven Akustik

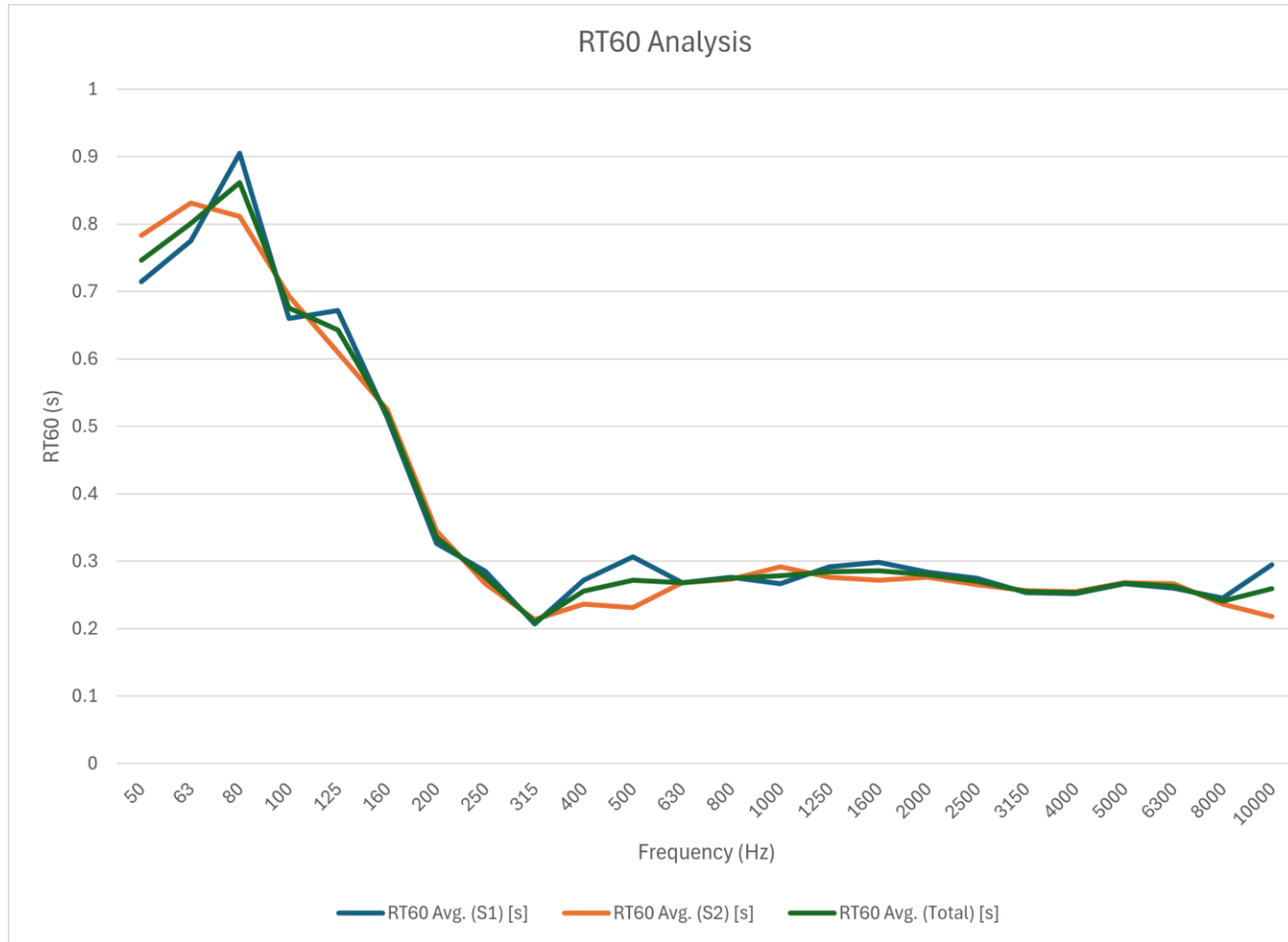
- «Amadeus Active Acoustics»



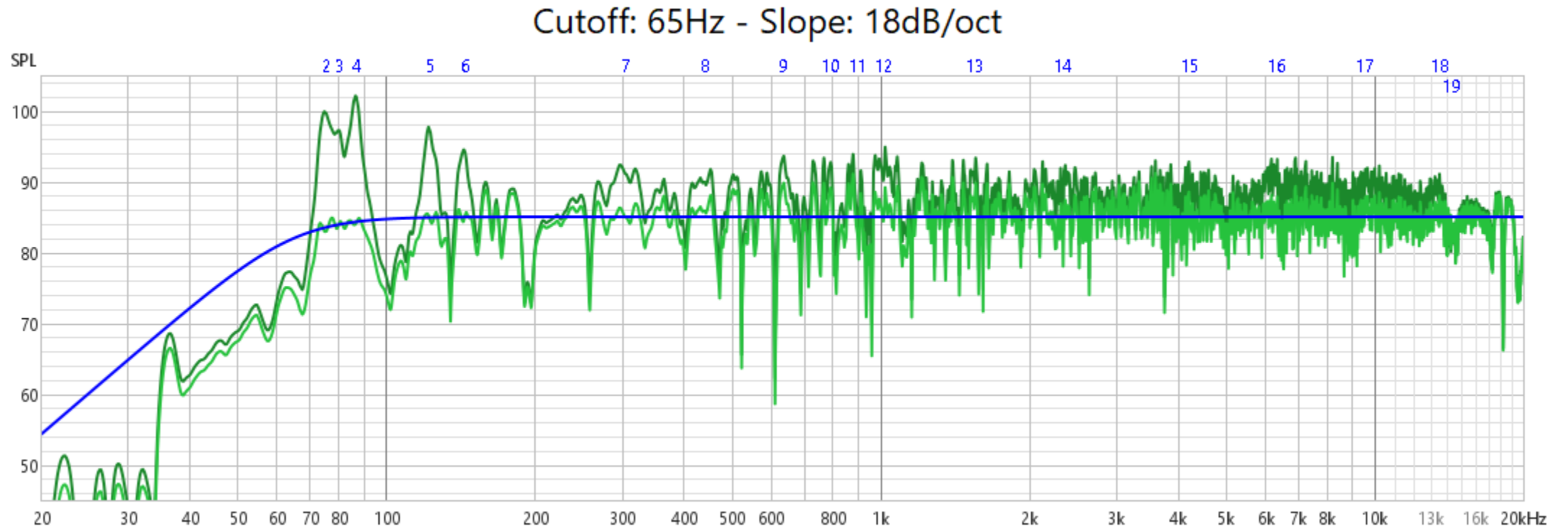
Entwicklung des «SP-Lab» Prototyps

- Randbedingungen
 - **Festgelegter Raum** der Musikhochschule Luzern.
 - Entscheidung: System mit Lautsprechern
 - **Keine Kopfhörer**: Zu sperrig für die MusikerInnen
 - Verfügbarkeit von 6 Lautsprechern (mit Verstärkern) der Musikhochschule.
- Interne Entscheidungen:
 - Signalverarbeitung in Reaper (DAW-Software) mit Laptop.
 - Verwendung von **vorhandenen Impulsantworten**

Raumakustische Eigenschaften des Proberaums

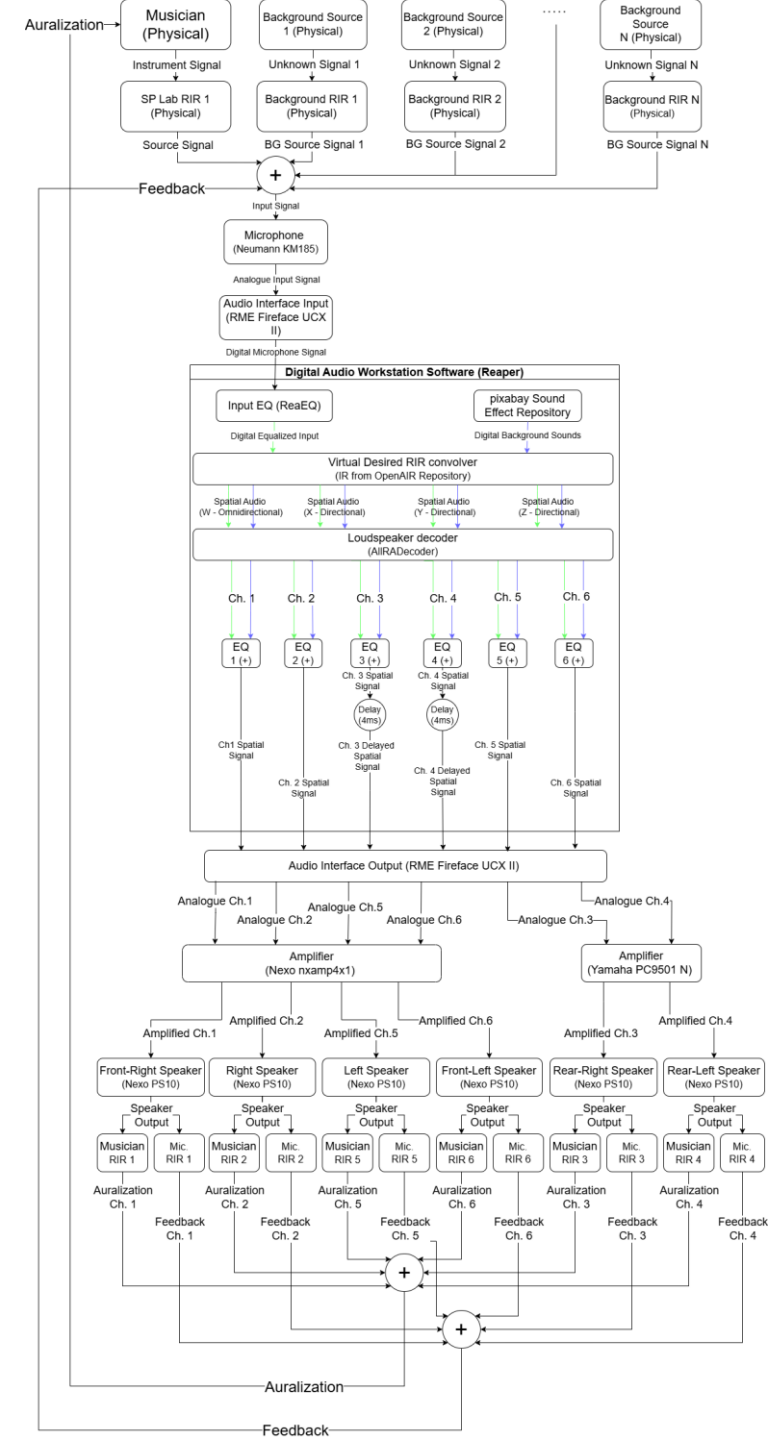


Linearisierung des Pfads Lautsprecher-Musiker*in



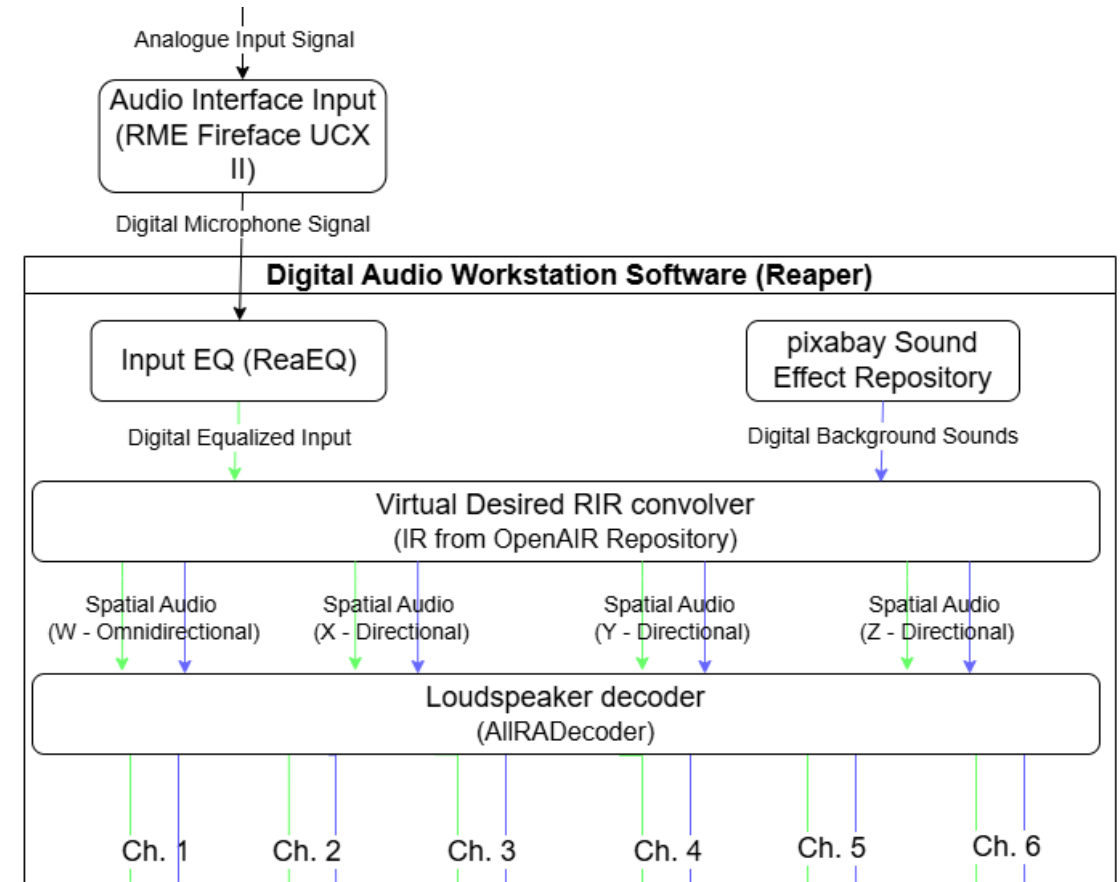
Signalverarbeitung

- SIMO (Single In Multiple Out) System



Signalverarbeitung

- SIMO (Single In Multiple Out) System
 1. Digitalisierung
 2. Hinzufügen von künstlichen Geräuschen
 - OpenAIR library, Ambisonic B-format
 3. Faltung
 4. Dekodierung für Lautsprecher
 - IEM AllRADecoder

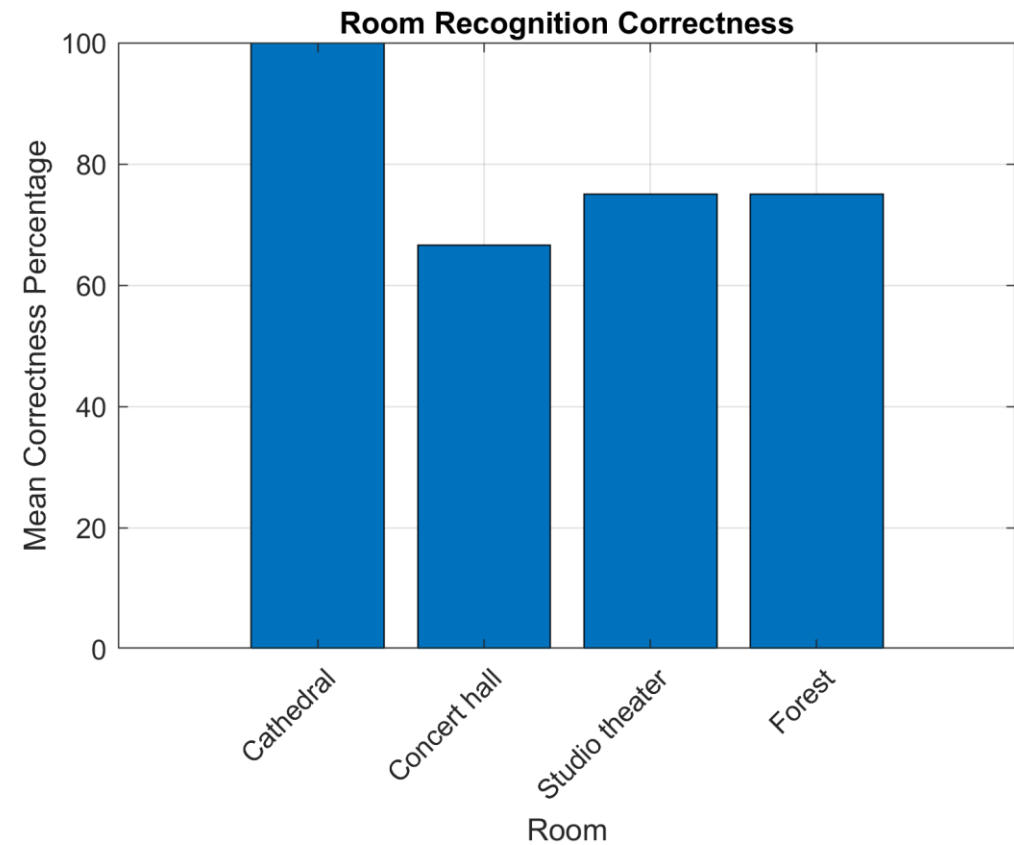
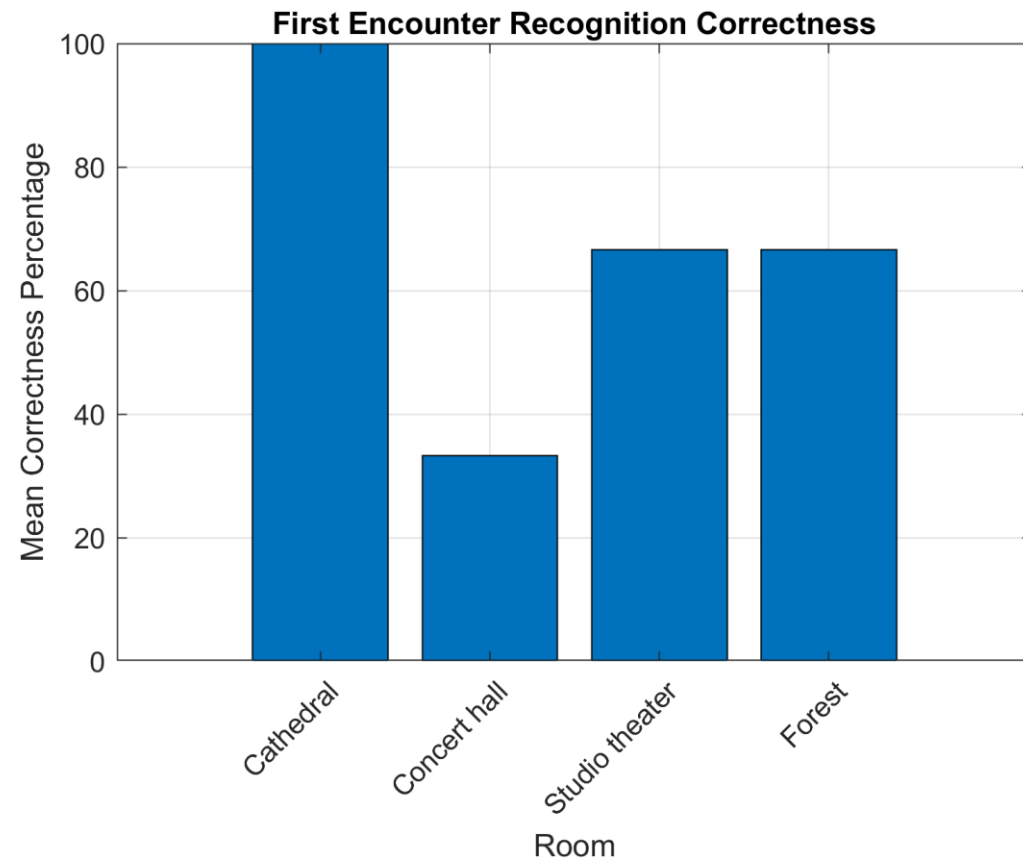


Demonstration

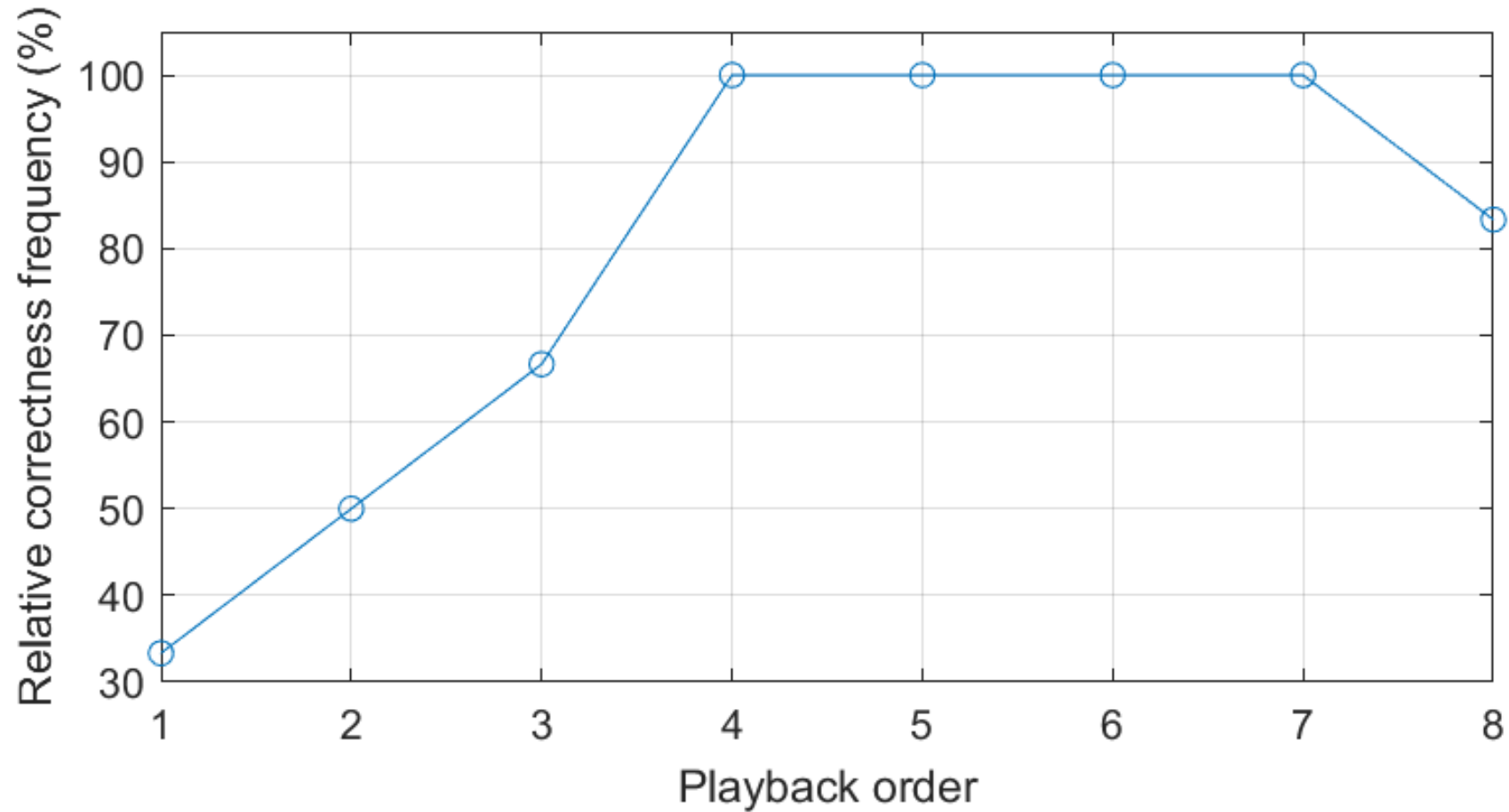
Psychoakustisches Experiment - Methodik

- **Wahrnehmung** des Systems durch Musiker*innen.
- 4 Blöcke
 1. Fähigkeit der Teilnehmer/innen, verschiedene akustische Simulationen zu **unterscheiden**.
 - i. mit Vorinformationen und Übungsphase
 2. Wahrnehmung von **Realismus**
 3. Der Einfluss von **zusätzlichen Hintergrundgeräuschen** auf die Wahrnehmung.
 4. **Interview** mit freien Antworten
- **6 Musiker*innen** der Musikhochschule Luzern mit unterschiedlichem instrumentalem Hintergrund.
 - Blasinstrumente (Saxophon, Waldhorn, Barocktrompete)
 - Sänger*innen

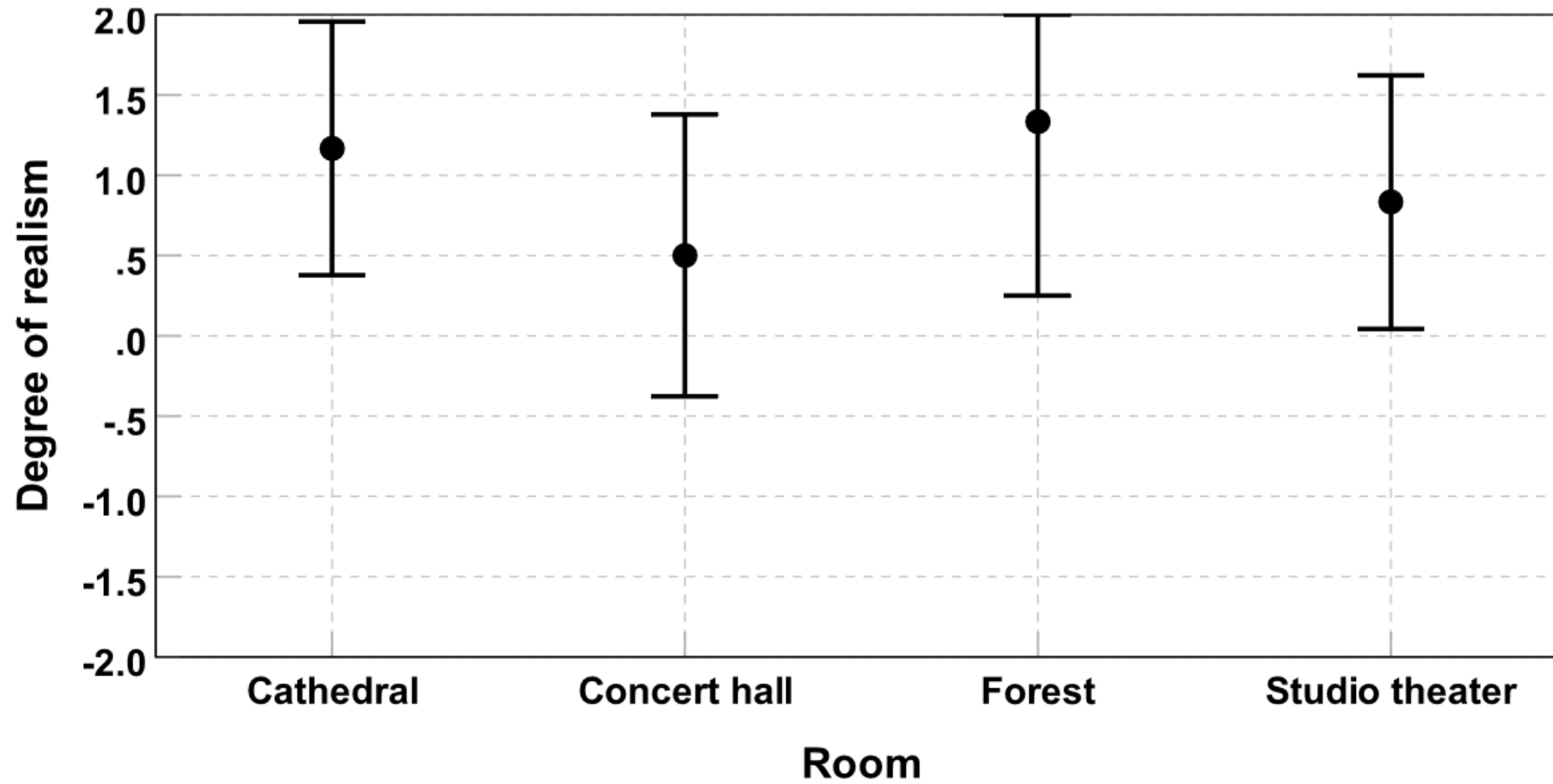
Psychoakustisches Experiment - Ergebnisse



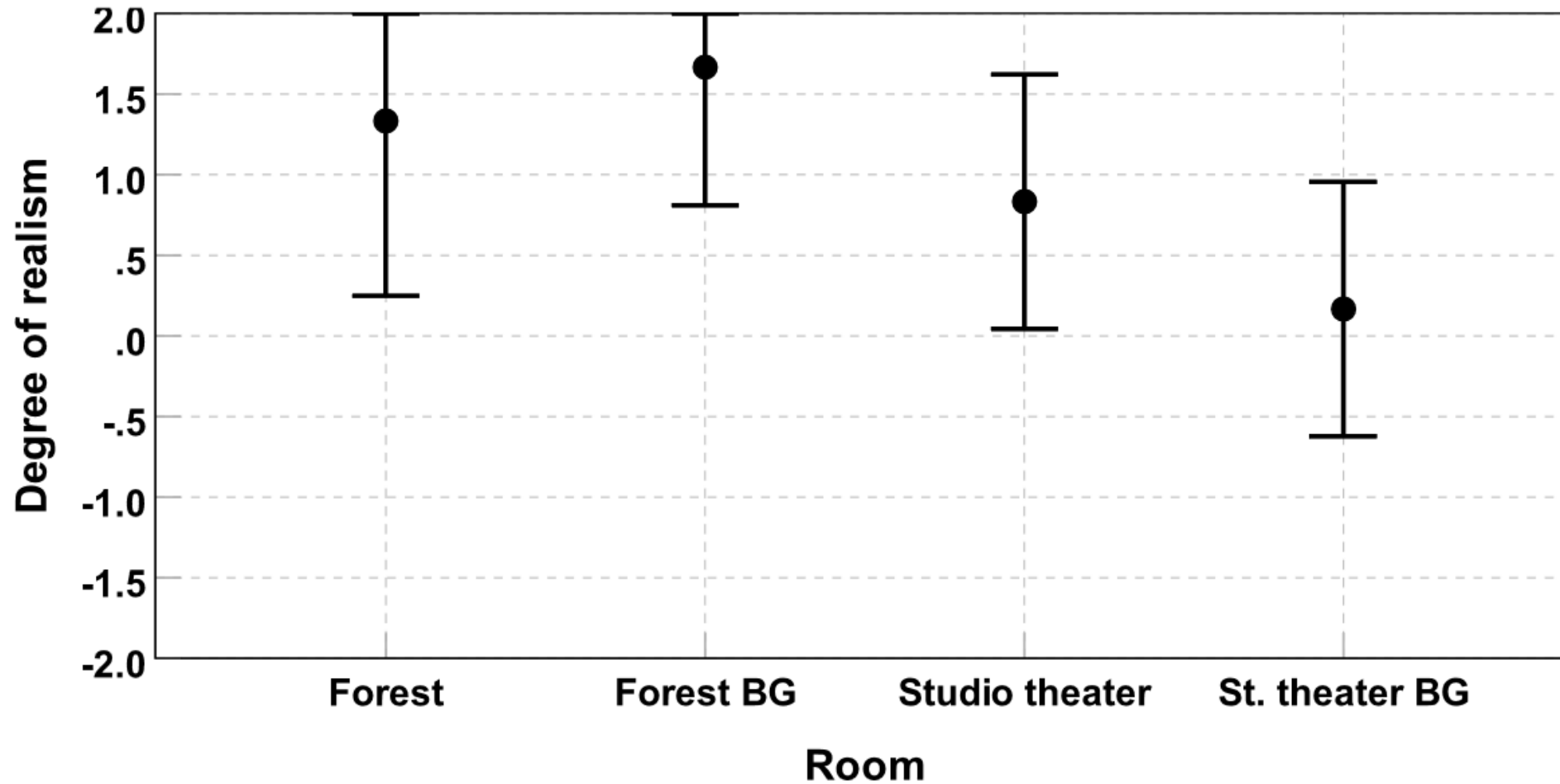
Psychoakustisches Experiment - Ergebnisse



Psychoakustisches Experiment - Ergebnisse

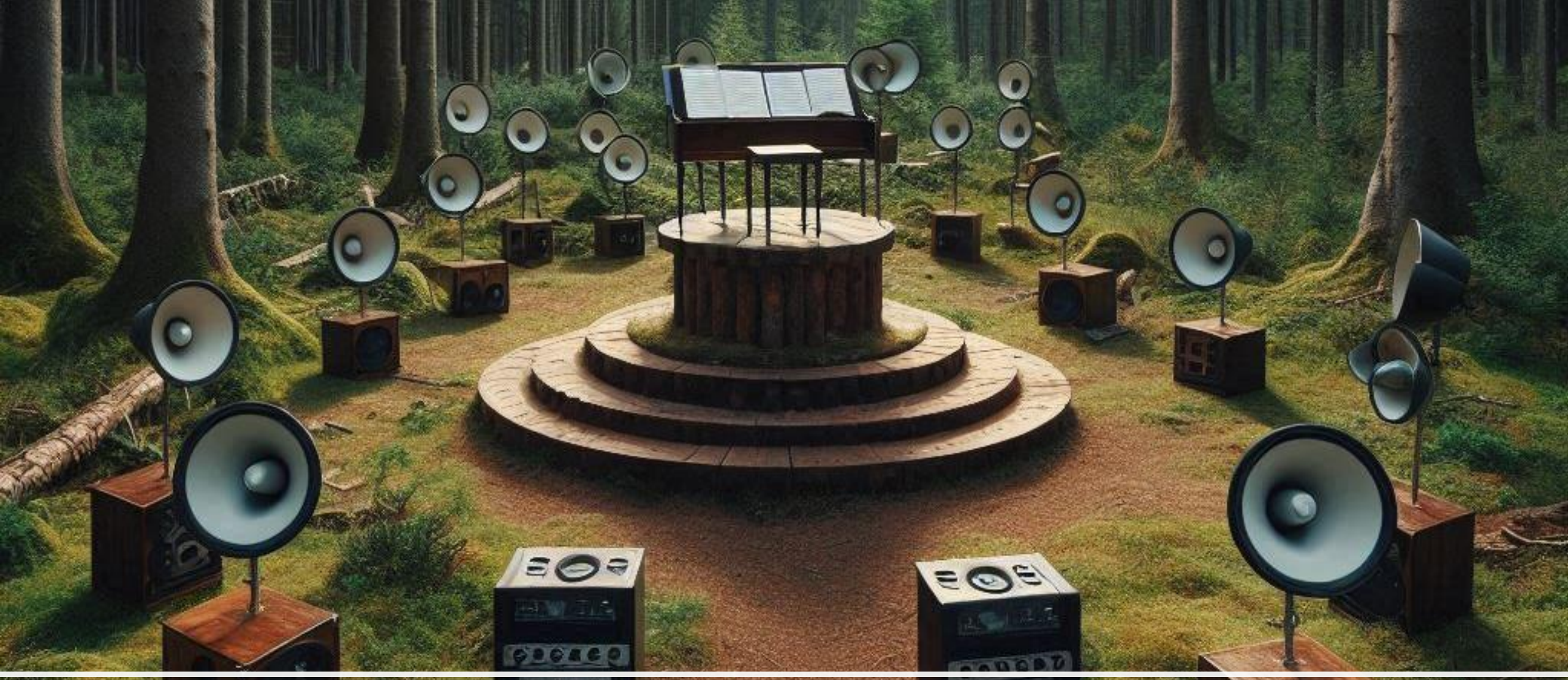


Psychoakustisches Experiment - Ergebnisse



Psychoakustisches Experiment - Ergebnisse

- Antworten aus dem Interview:
 - *Die Auralisation bietet das Potenzial, die **musikalische Anpassungsfähigkeit zu verbessern**.*
 - *Insbesondere durch die Möglichkeit verschiedener akustischer Szenarien.*
 - *Es bestehen Bedenken hinsichtlich der **technischen Komplexität** bei der Verwendung und der **Bewegungseinschränkungen** während der Benutzung.*
 - ***Unflexible Mikrofonplatzierung** (wegen der Linearisierung).*



Fragen

Quellen (1)

- (1) HSLU, "Exploring the effects of room acoustics on the physical and psychological health of musicians." <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=6835>, Accessed: March 2025.
- (2) Valimaki, Vesa, et al. "Fifty years of artificial reverberation." IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing 20.5 (2012): 1421-1448.
- (3) Davis, Gary, and Gary D. Davis. "The sound reinforcement handbook." Hal Leonard Corporation, 1989.
- (4) Rubak, Per, and Lars G. Johansen. "Artificial reverberation based on a pseudo-random impulse response." 1998.
- (5) Barré, Sébastien, and Natalia Manrique Ortiz. "Room impulse response measurement and delay-and-sum beamforming, application to room and building acoustics." Proc. Euronoise. Vol. 2015. 2015.

Quellen (2)

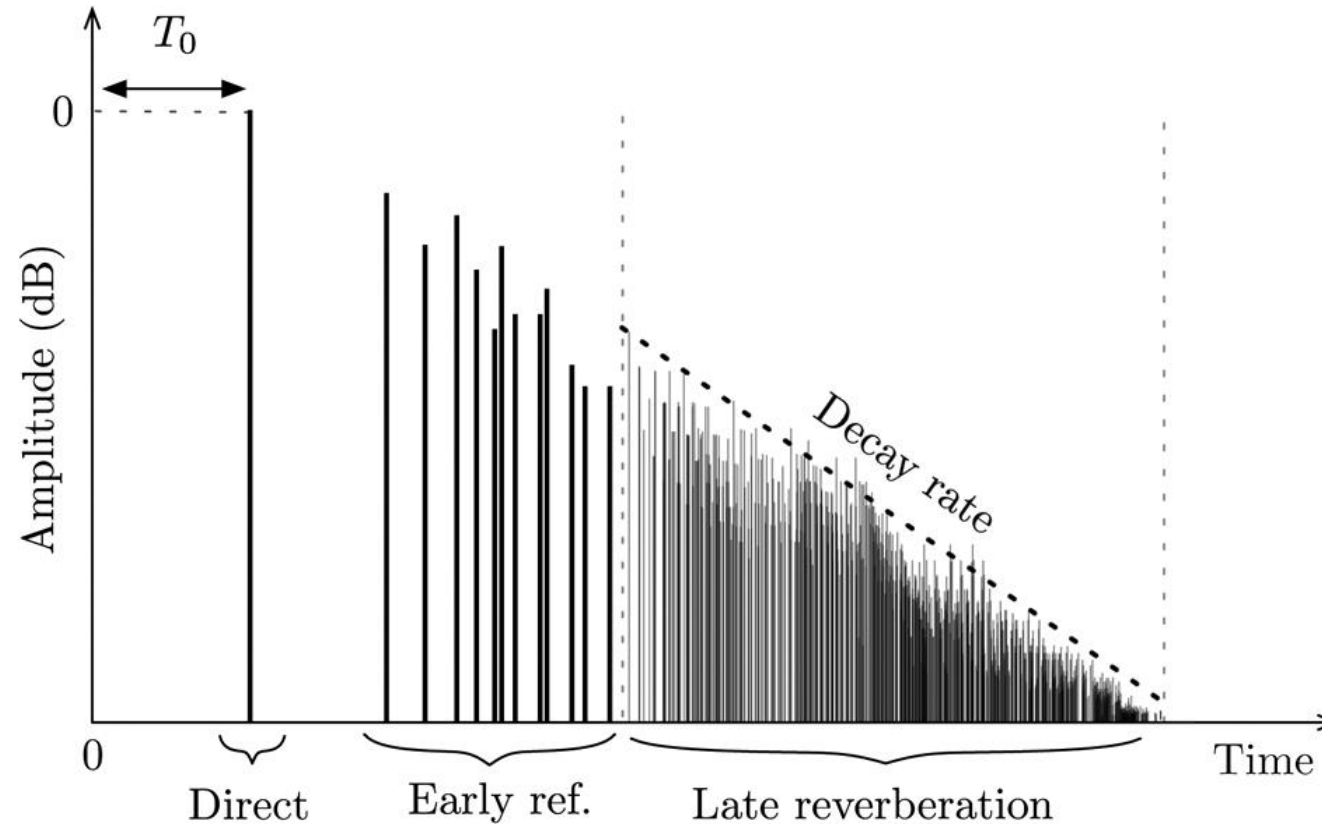
- (6) Royal College of Music London, “Immersed in sound: Inside the Digital Innovation Lab” <https://www.rcm.ac.uk/upbeat/articles/featureinsidethenewdolbystudio.aspx>, Accessed: March 2025
- (7) Arup, “Soundlab: Immersive auralization environment.” <https://www.arup.com/services/digital-solutions-and-tools/soundlab/>, Accessed: March 2025.
- (8) Pieren, Reto, Kurt Heutschi, Roalt Aalmoes, and Dick G. Simons. "Evaluation of auralization and visualization systems for railway noise sceneries." INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, vol. 255, no. 7, pp. 168-179. Institute of Noise Control Engineering, 2017.
- (9) Virginia Tech, “The Cube at Virginia Tech.” <https://icat.vt.edu/studios/mac/the-cube.html>, Accessed: March 2025.
- (10) University of Sydney, “Spatial audio and acoustics lab – the dome.” <https://www.sydney.edu.au/architecture/our-research/research-labs-and-facilities/spatial-audio-and-acoustics-lab.html>, Accessed: March 2025.
- (11) Meyer Sound, “Constellation by Meyer Sound.” <https://meyersound.com/product/constellation/>, Accessed: March 2025.
- (12) L-Acoustics, «Ambiance™ – Connecting Sound & Space» <https://www.l-acoustics.com/products/ambiance/>, Accessed: March 2025
- (13) Amadeus, «Amadeus Active Acoustics» <https://amadeus-acoustics.com/active-acoustics>, Accessed: March 2025

Quellen (3)

- (14) OpenAIR, "Open acoustic impulse response (openair) library," 2025. Accessed: 2025-03-21.
- (15) Institute of Electronic Music and Acoustics (IEM), "Allradecoder guide - iem plug-in suite," 2023. Accessed: 2025-03-21.
- (16) Cockos Incorporated, "Reaeq equalizer plugin," 2025. Accessed: 2025-03-24.
- (17) Room EQ Wizard, "REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software," 2024. Accessed: 2025-03-24

Anhang

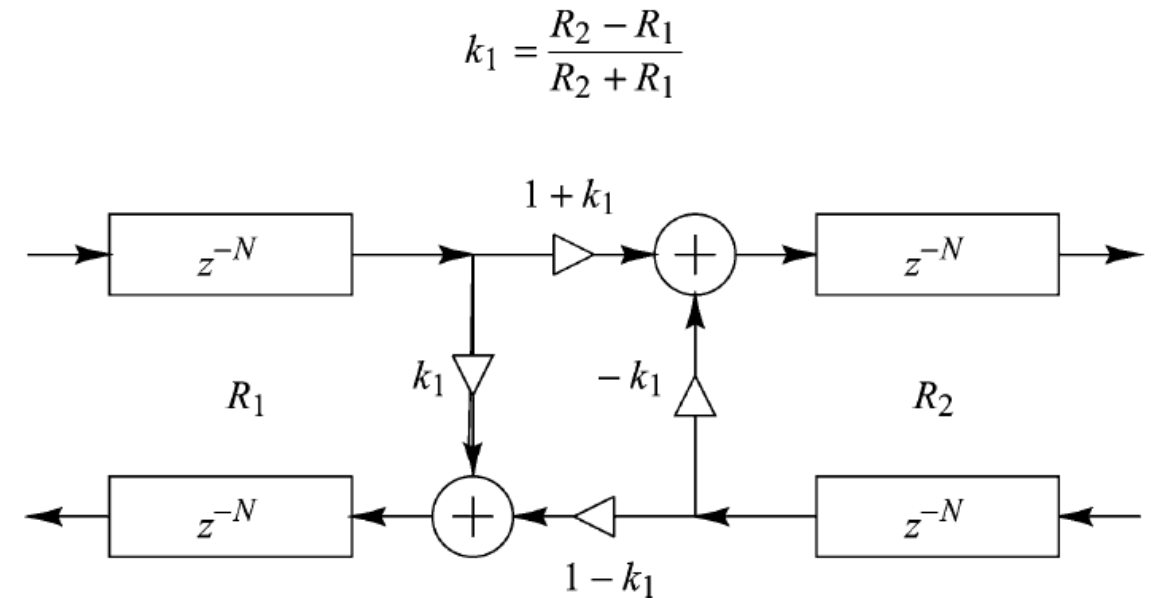
Kleine Lektion: «Nachhall»



Bildquelle: Välimäki (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

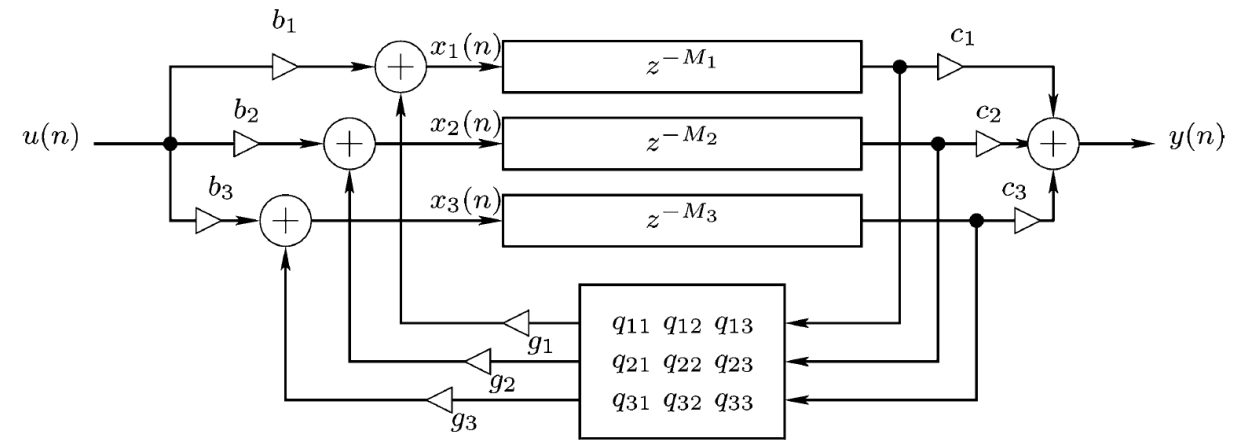
- Kammfilter
- Allpassfilter
- Digitale Waveguide Networks



Bildquelle: Välimäki et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

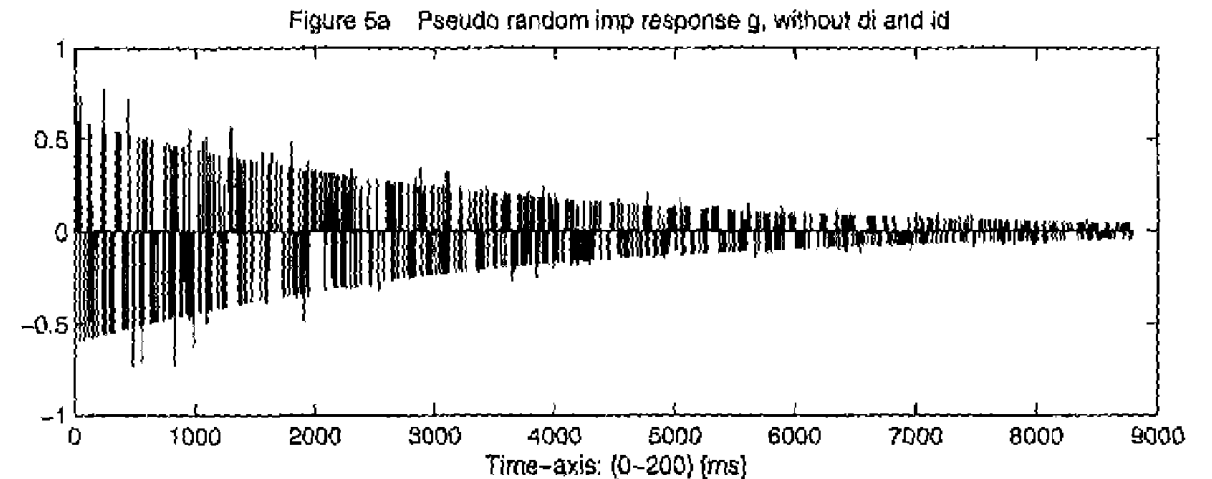
- Kammfilter
- Allpassfilter
- Digitale Waveguide Networks
- Feedback Delay Networks (FDN)



Bildquelle: Välimäki et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Delay Netzwerke)

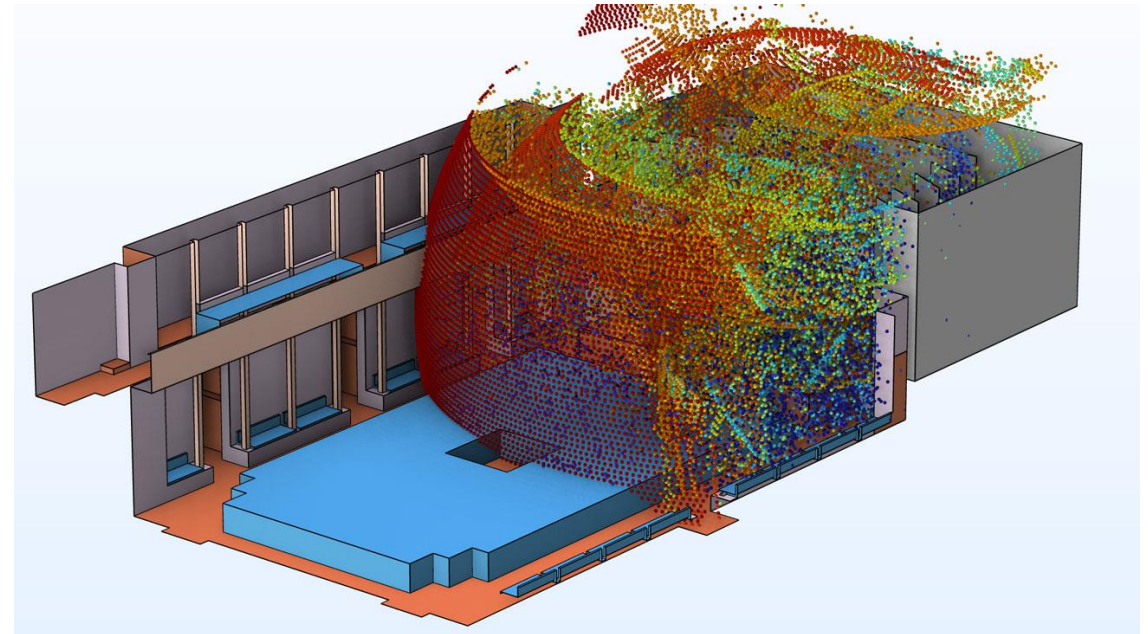
- Kammfilter
- Allpassfilter
- Digitale Waveguide Networks
- Feedback Delay Networks (FDN)
- Algorithmen zur künstlichen Erzeugung späten, pseudo-zufälligen Nachhalls



Bildquelle: Rubak et. al (2012)

Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung von Nachhall (Auf physikalischen Eigenschaften oder Messungen basierende Raummodelle)

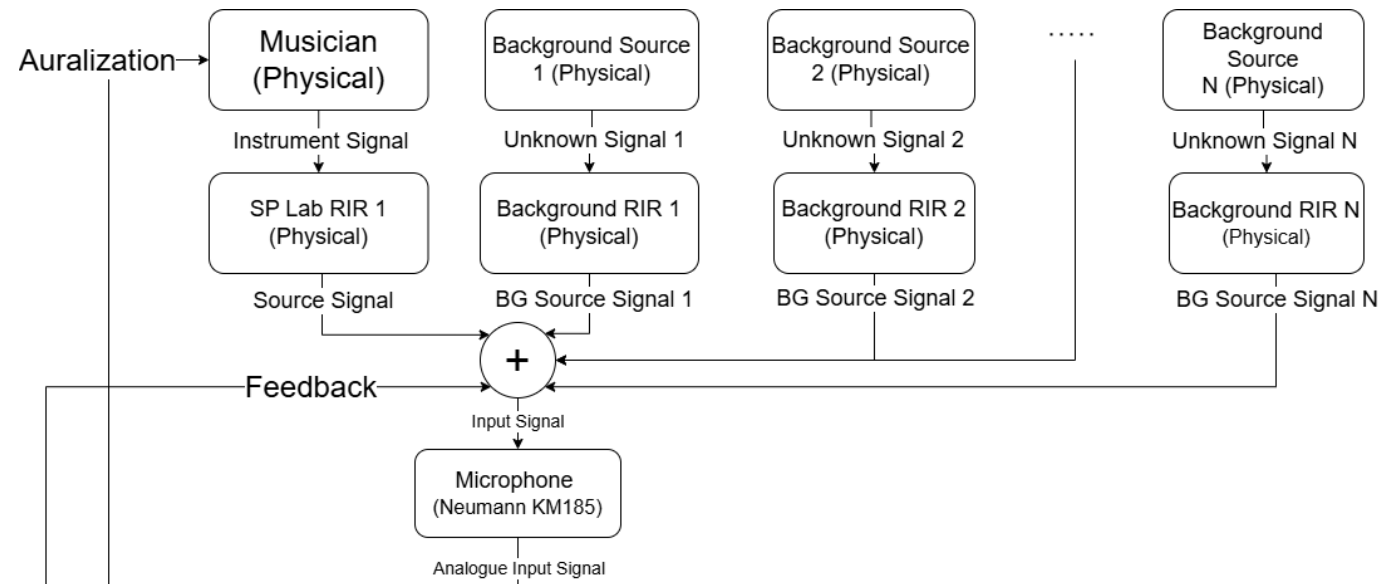
- Faltung mit Impulsantwort(en)
- Verschiedene Ergebnisse der Modelle:
 - Impulsantwort
 - Durch Wellensimulation (z.B. FDTD, BEM, MEF)
 - Zeitlich-energetische Antworten, die vor der Faltung in eine Impulsantwort umgewandelt werden müssen.
 - Typischerweise durch Raytracing
 - Liste der Reflexionspfade, die durch eine Filterstruktur auralisiert oder in eine Impulsantwort umgewandelt werden können.
 - Typischerweise durch Raytracing



Bildquelle: <https://www.comsol.com/blogs/validating-an-acoustic-ray-tracing-simulation-of-a-chamber-music-hall>

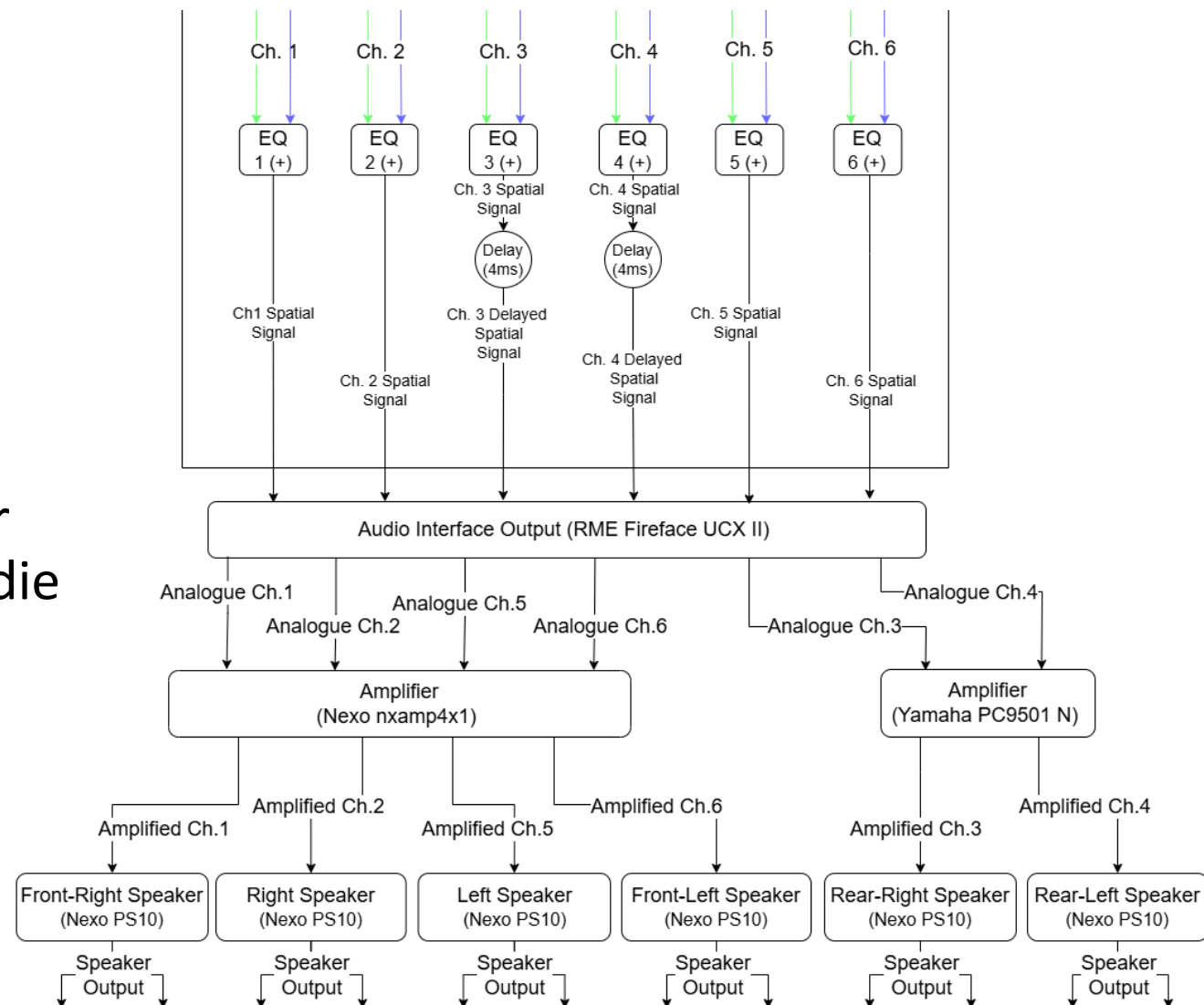
Signalverarbeitung

- SIMO (Single In Multiple Out) System
- Signal der Musiker*innen, Lautsprechersignal (Feedback) und Hintergrundgeräusche des Raums



Signalverarbeitung

- SIMO (Single In Multiple Out) System
- Signal der Musiker*innen, Lautsprechersignal (Feedback) und Hintergrundgeräusche des Raums
- Digitalisierung, Hinzufügen künstlicher Signale, Faltung und Dekodierung für die Lautsprecher
- Linearisierung, Verzögerung und Verstärkung



Signalverarbeitung

- SIMO (Single In Multiple Out) System
- Signal der Musiker*innen, Lautsprechersignal (Feedback) und Hintergrundgeräusche des Raums
- Digitalisierung, Hinzufügen künstlicher Signale, Faltung und Dekodierung für die Lautsprecher
- Linearisierung, Verzögerung und Verstärkung
- Wiedergabe durch Lautsprecher im Raum

