

SCHALL-LOKALISIERUNG MIT AKUSTISCHEN KAMERAS IN DER BAU- UND RAUMAKUSTIK

DR. THOMAS RITTENSCHOBER

Gründer und Geschäftsführer
Seven Bel GmbH

Vortrag im Rahmen des 11. Bauphysikertreffen
Wien, 3. Oktober 2024

AGENDA

**QUALITÄTSASPEKTE DER
SCHALLVISUALISIERUNG**

FUNKTIONSWEISE AKUSTISCHER KAMERAS
BEAMFORMING
SOUND FIELD SCANNING

ANWENDUNGEN

TIEF-FREQUENTER LÄRM VON HVACs
KLICKGERÄUSCHE AN SITZEN
LECKAGEN IN FAHRZEUGKABINEN

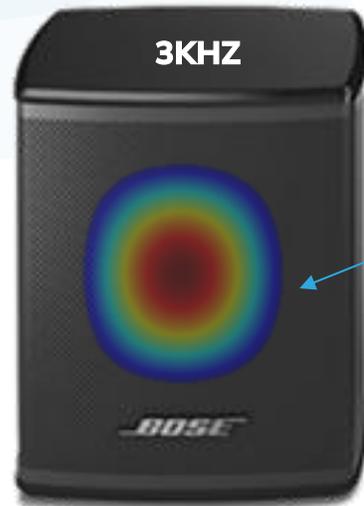
QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG



**WARUM
DER DURCHMESSER DER
MESSFLÄCHE
WICHTIG IST**

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN IN AKUSTISCHEN BILDERN



ROT ist stark
BLAU ist 6dB geringer

Das **Bild** einer punktförmigen Schallquelle wird durch eine radial verteilte Quelle mit abnehmender Stärke von der Quelle weg dargestellt.

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

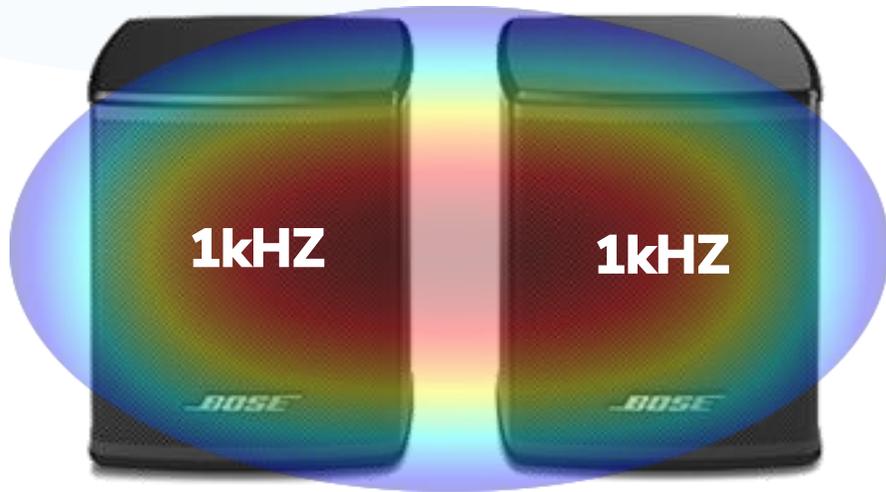
ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN IN AKUSTISCHEN BILDERN



Je niedriger die Frequenz der Schallquelle ist, desto breiter erscheint die Schallquelle und desto schwieriger ist es, die Quelle räumlich aufzulösen.

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN IN AKUSTISCHEN BILDERN



! HERAUSFORDERUNG

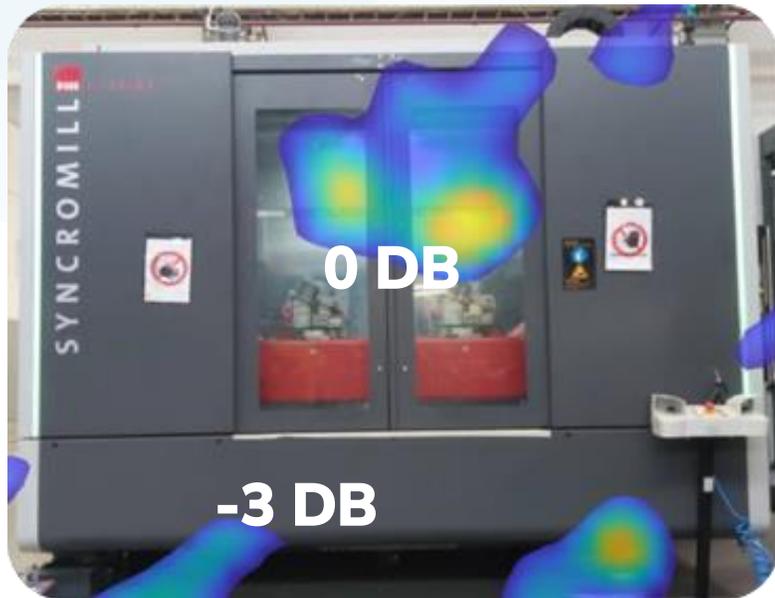
Wenn sich zwei Quellen mit derselben Frequenz einander nähern, werden die einzelnen radial verteilten Quellen addiert.

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

**WARUM
DIE ANZAHL DER VERTEILTEN
MIKROFONE
WICHTIG IST**

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

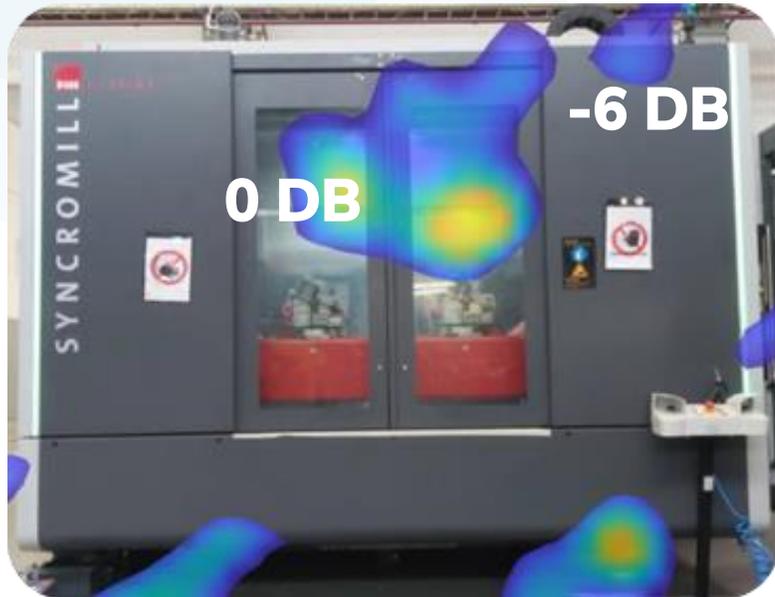
ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN MIT UNTERSCHIEDLICHER STÄRKE



Um Schallquellen mit **geringerer Stärke** in einem akustischen Bild zu erkennen, **erhöhen** wir schrittweise **den Dynamikumfang** (DNR), bis die Quellen sichtbar werden.

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN MIT UNTERSCHIEDLICHER STÄRKE



Der DNR ist die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Schalldruckpegel, der im akustischen Bild angezeigt wird.

-6DB BEDEUTET 50% GERINGERER SCHALLDRUCKPEGEL

QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN MIT UNTERSCHIEDLICHER STÄRKE



Mit der Erhöhung des DNR treten ab einem gewissen Punkt ARTEFAKTE auf, d. h. Störungen im akustischen Bild, die durch eine **Einschränkung in der Hardware oder Software** verursacht werden.

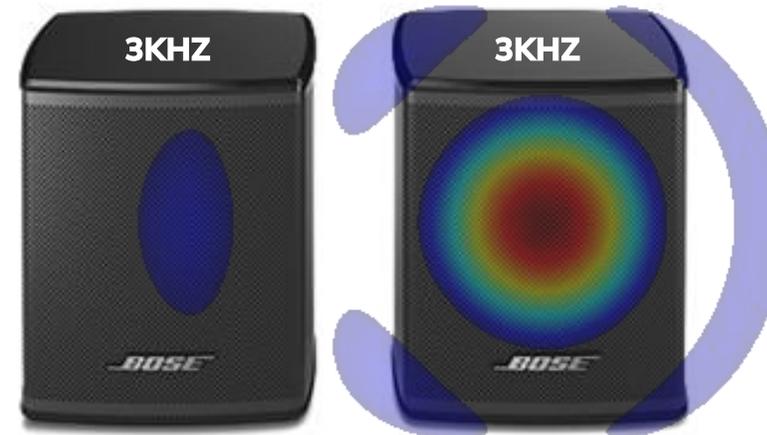
QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

ERSCHEINUNGSBILD VON SCHALLQUELLEN MIT UNTERSCHIEDLICHER STÄRKE

HOHE ANZAHL AN
MIKROFONEN



GERINGE ANZAHL AN
MIKROFONEN



Eine Konfiguration mit einer **NIEDRIGEN** Mikrofondichte scheitert bereits bei geringem Dynamikumfang, die Schallquellen mit **korrekten Lautstärkewerten** darzustellen.

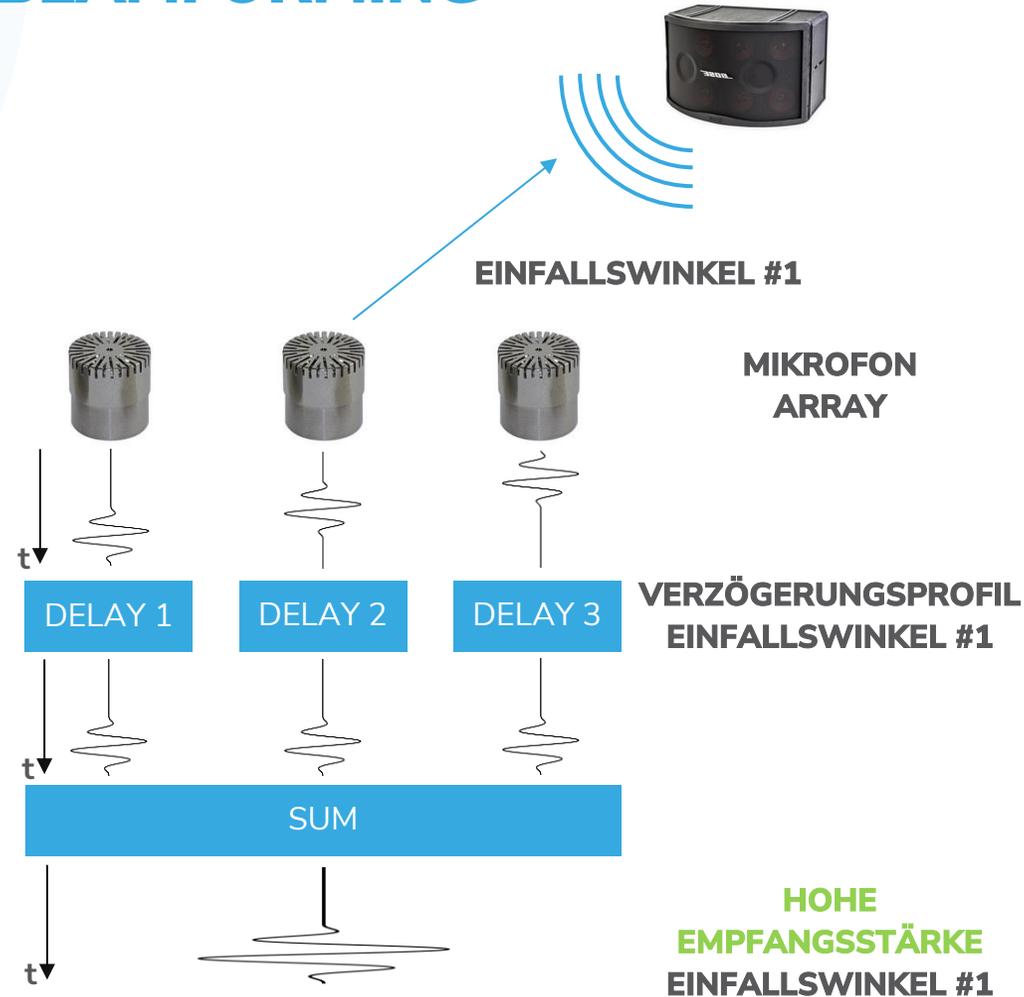
QUALITÄTSASPEKTE DER SCHALLVISUALISIERUNG

BEAMFORMING

FUNKTIONSWEISE

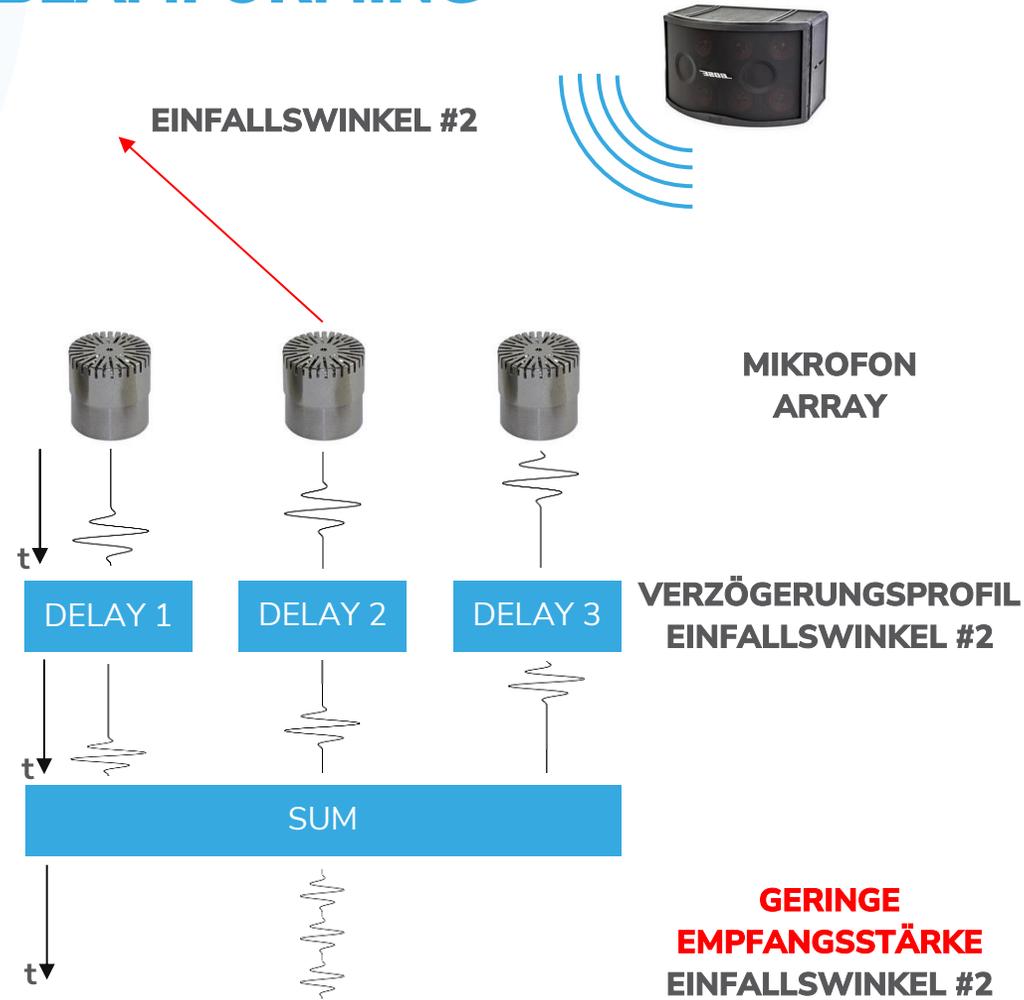


MIKROFON ARRAY BEAMFORMING



BEAMFORMING IST EINE METHODE ZUR RÄUMLICHEN FILTERUNG VON EINFALLENDEN SCHALLWELLEN, INDEM MEHRERE MIKROFONSIGNALE FÜR JEDE GEWÜNSCHTE RICHTUNG VERZÖGERT UND AUFSUMMIERT WERDEN

MIKROFON ARRAY BEAMFORMING



BEAMFORMING IST EINE METHODE ZUR RÄUMLICHEN FILTERUNG VON EINFALLENDEN SCHALLWELLEN, INDEM MEHRERE MIKROFONSIGNALE FÜR JEDE GEWÜNSCHTE RICHTUNG VERZÖGERT UND AUFSUMMIERT WERDEN

SOUND FIELD SCANNING

FUNKTIONSWEISE



SENSOR TECHNOLOGIE

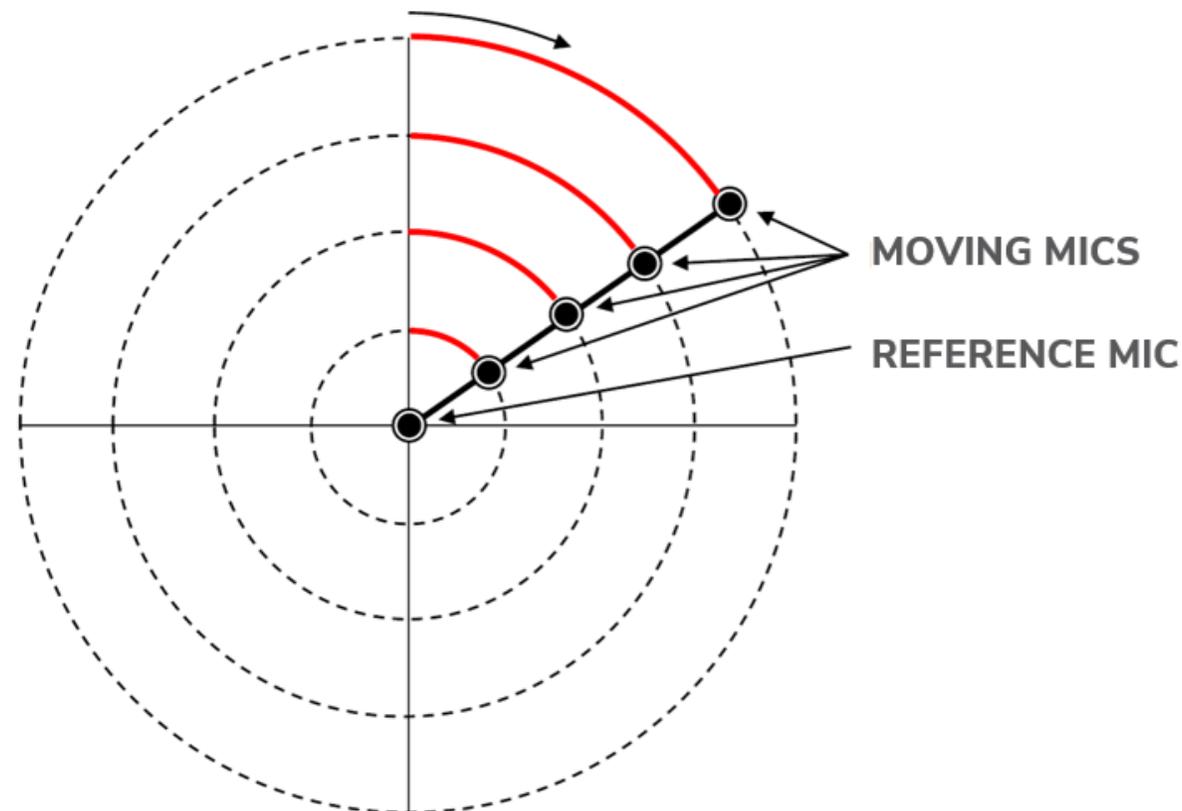
ROTIERENDES LINEAR ARRAY

- 1 Referenzmikrofon
- Bis zu 7 bewegte Mikrofone
- Referenzmikrofon ko-axial ausgerichtet mit Rotationsachse.
- Magnetischer Winkelencoder zur Messung des Drehwinkels.

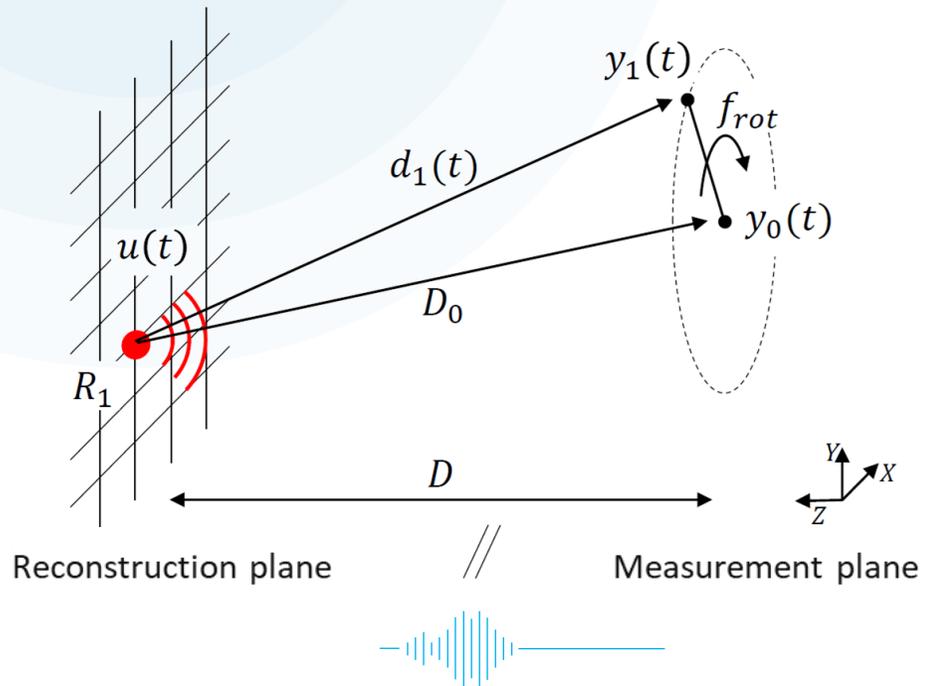


BESONDERHEITEN

- **Doppler Frequenzverschiebung** der bewegten Mikrofone enthält zusätzliche Informationen über das Schallfeld.
- Einfache Implementierung von **kleinen und großen Arrays** zur flexiblen Lokalisierung von Quellen im Ultraschall- und Tief-Frequenzbereich.
- **Ultra-hohe räumliche Abtastung** des Schallfelds für einen hohen Dynamikumfang (bis zu 400 Sektoren).



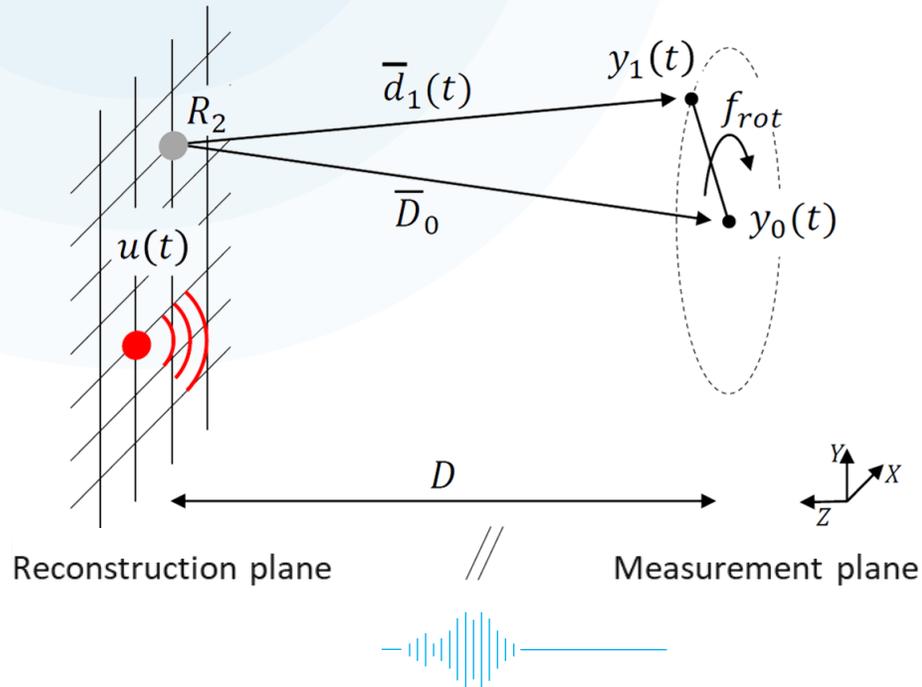
SCHALL-LOKALISIERUNG



- 1 **Zeitverschiebung in die Vergangenheit**
Verschiebung zum Rekonstruktionspunkt des bewegten Mikrofonsignals $y_1(t)$ R_1 .
- 2 **Zeitverschiebung in die Zukunft**
Verschiebung des Signals von R_1 zur Position des stationären Mikrofonsignals $y_0(t)$.
- 3 **Vergleich der Ähnlichkeit des Signalpaars**
→ **perfekte Übereinstimmung**
Berechnung der Kohärenz des transformierten Signals $y_1(t)$ und $y_0(t)$.

- $y_0(t)$ stationäres Mikrofonsignal
- $y_1(t)$ bewegtes Mikrofonsignal
- $u(t)$ Quellsignal
- R_i Rekonstruktionspunkt i
- D Abstand zwischen Mess- und Rekonstruktionsebene
- D_0 Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und stationärem Mikrophon
- $d_1(t)$ Zeitvariierender Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und bewegtem Mikrophon

SCHALL-LOKALISIERUNG



- 1 **Zeitverschiebung in die Vergangenheit**
Verschiebung zum Rekonstruktionspunkt des bewegten Mikrofonsignals $y_1(t)$ R_1 .
- 2 **Zeitverschiebung in die Zukunft**
Verschiebung des Signals von R_1 zur Position des stationären Mikrofonsignals $y_0(t)$.
- 3 **Vergleich der Ähnlichkeit des Signalpaars**
→ **geringe Übereinstimmung**
Berechnung der Kohärenz des transformierten Signals $y_1(t)$ und $y_0(t)$.

$y_0(t)$ stationäres Mikrofonsignal

$y_1(t)$ bewegtes Mikrofonsignal

$u(t)$ Quellsignal

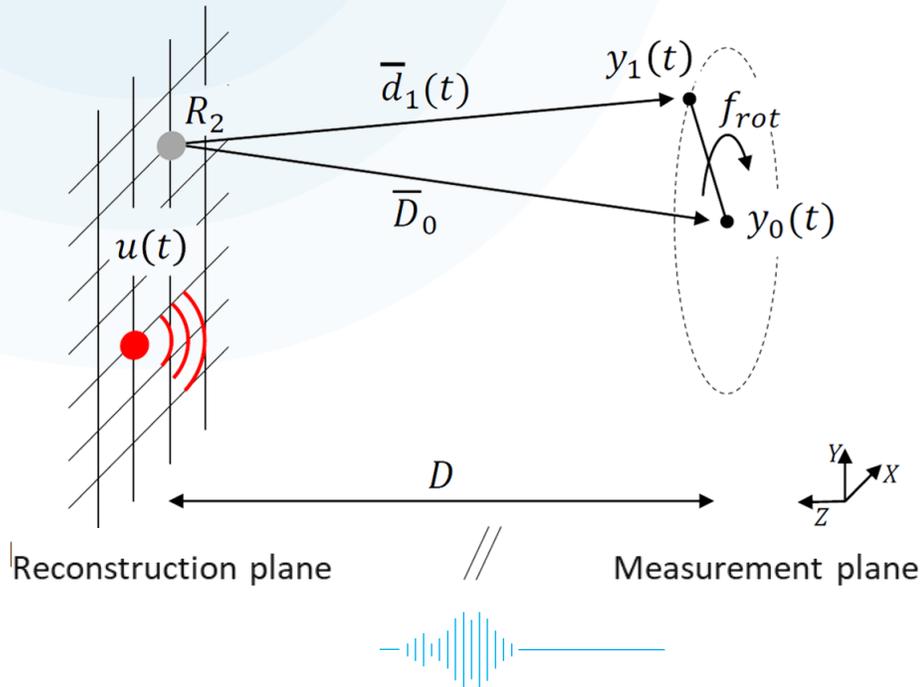
R_i Rekonstruktionspunkt i

D Abstand zwischen Mess- und Rekonstruktionsebene

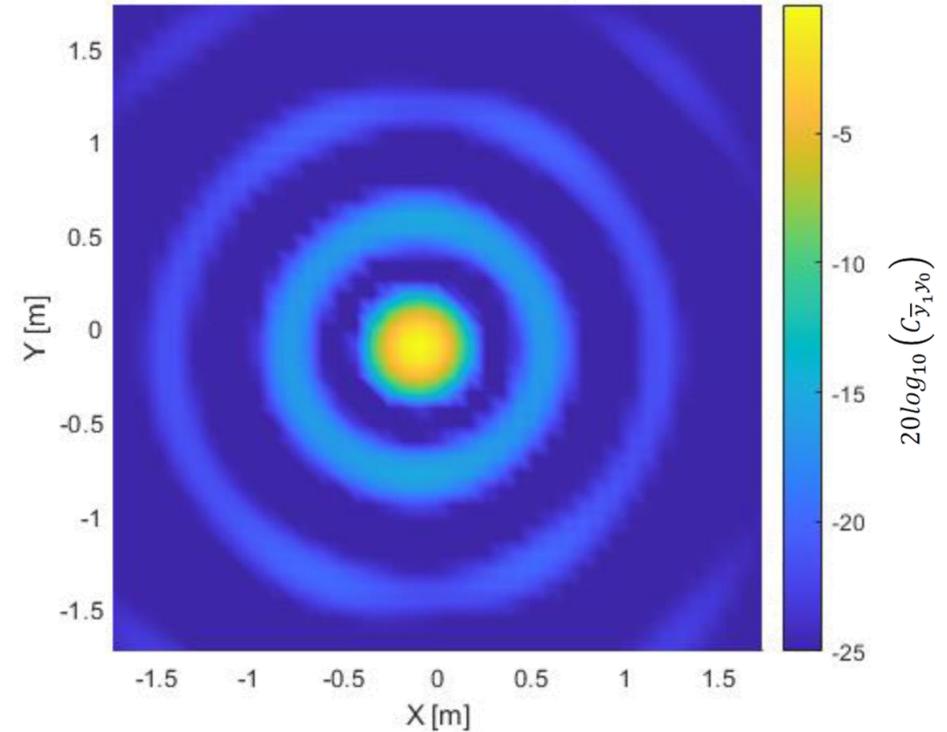
D_0 Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und stationärem Mikrophon

$d_1(t)$ Zeitvariierender Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und bewegtem Mikrophon

SCHALL-LOKALISIERUNG



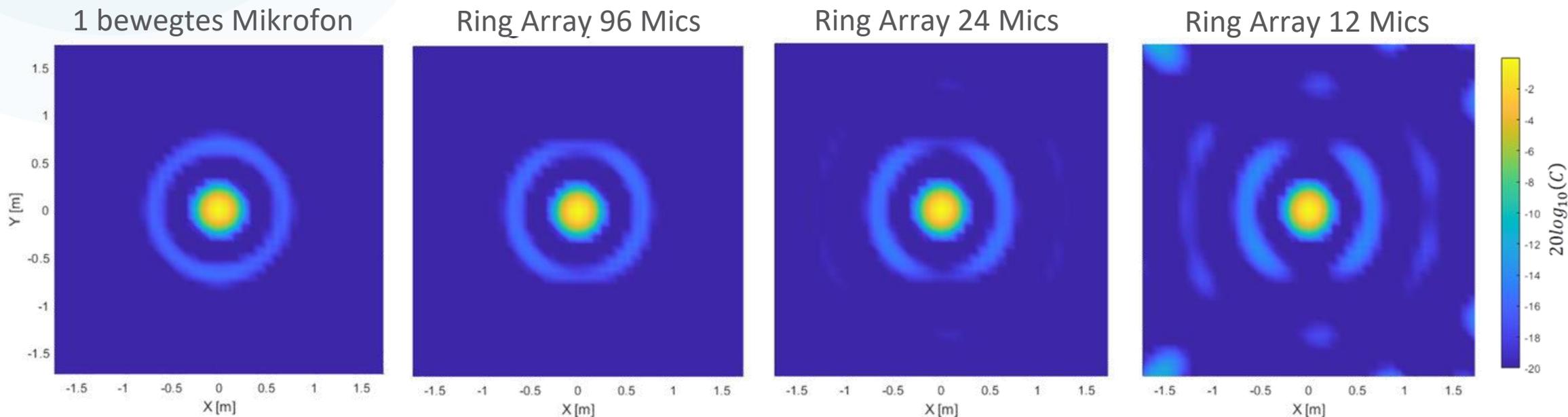
- $y_0(t)$ stationäres Mikrofonsignal
- $y_1(t)$ bewegtes Mikrofonsignal
- $u(t)$ Quellsignal
- R_i Rekonstruktionspunkt i
- D Abstand zwischen Mess- und Rekonstruktionsebene
- D_0 Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und stationärem Mikrofon
- $d_1(t)$ Zeitvariierender Abstand zwischen Rekonstruktionspunkt und bewegtem Mikrofon



Ähnlichkeit des Signalpaars für alle Rekonstruktionspunkte

SCANNING VS STATIONÄRES ABTASTEN

3kHz Punktquelle im Abstand von 3m
Array-Radius: 1m



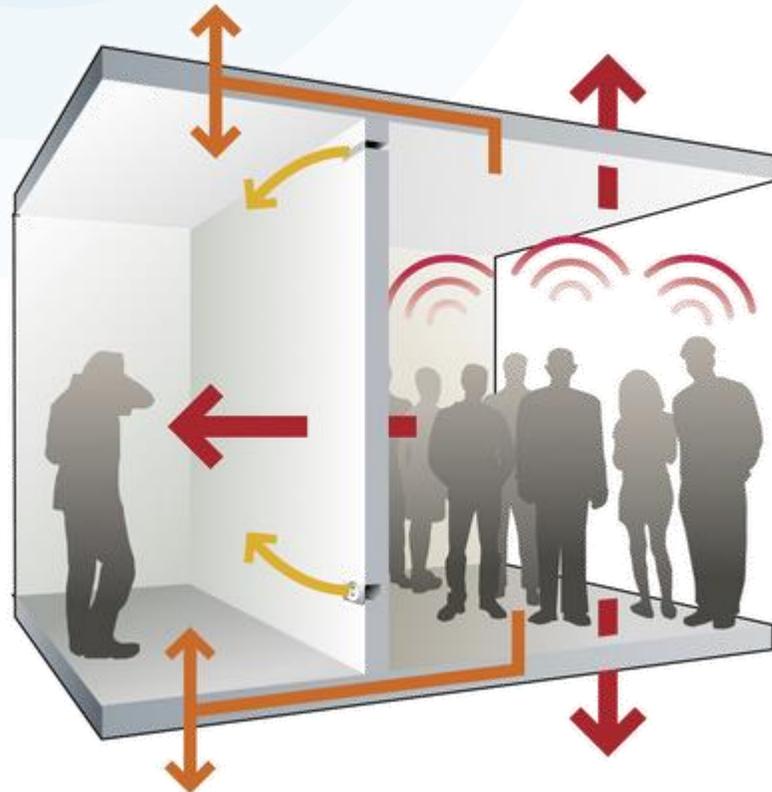
Grating lobes!

**100+ MIKROFONE WERDEN BENÖTIGT, UM DIE LEISTUNG
EINES EINZELNEN BEWEGTEN MIKROFONS ZU ERREICHEN.**

SCHALLTRANSMISSION IN DER BAUAKUSTIK

SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

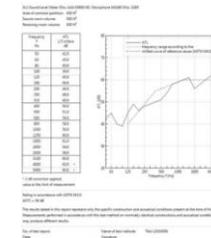
STAND DER TECHNIK



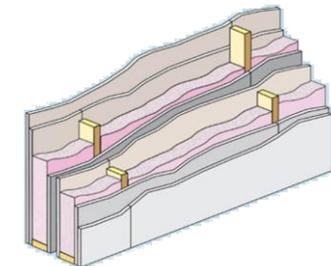
- ✓ Messmittel für die Quantifizierung der Schallübertragung zwischen Räumen.



- ✓ Verfahren für die Beurteilung der Transmissionseigenschaften von Trennwänden.

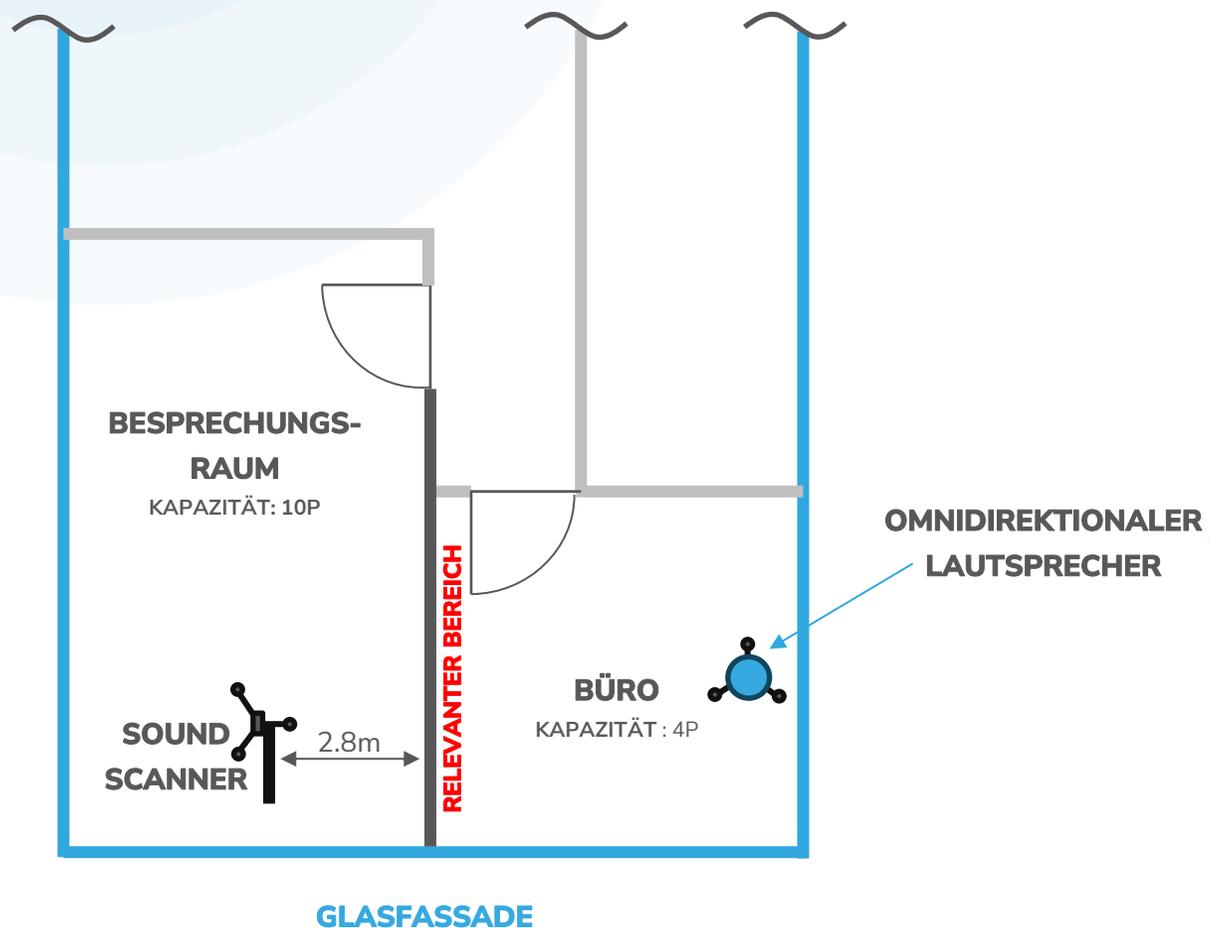


- ✓ Faktoren, die die Schalltransmissionsklasse (STC) beeinflussen ... Masse, Absorption, Dämpfung, Entkopplung, Leakage



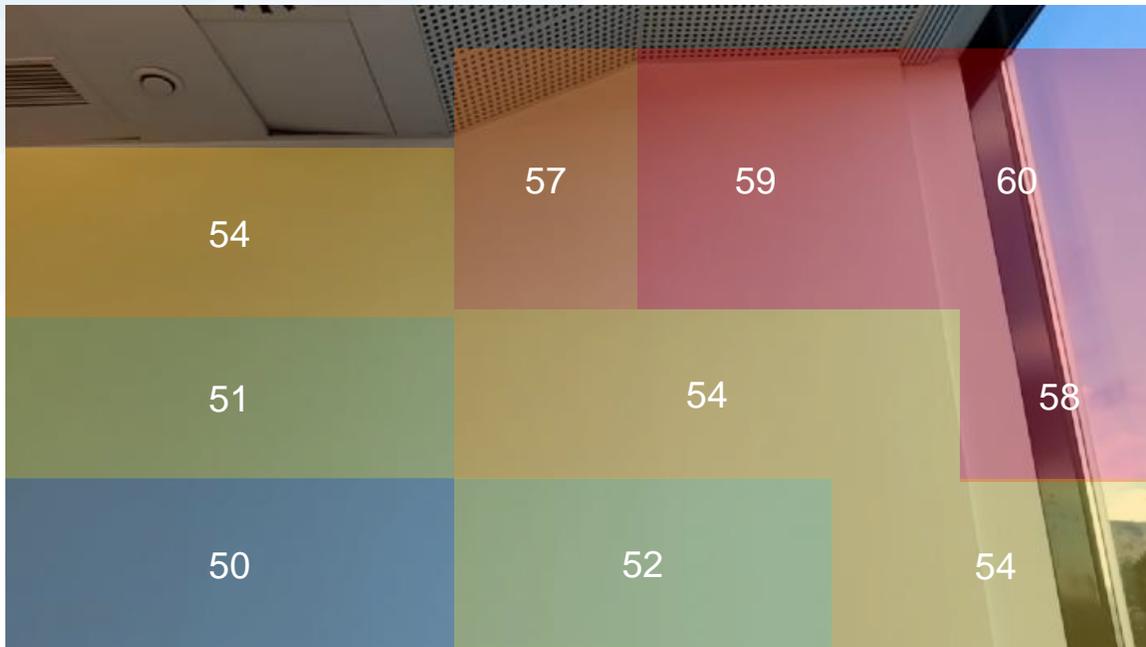
SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

EINE TYPISCHE SITUATION

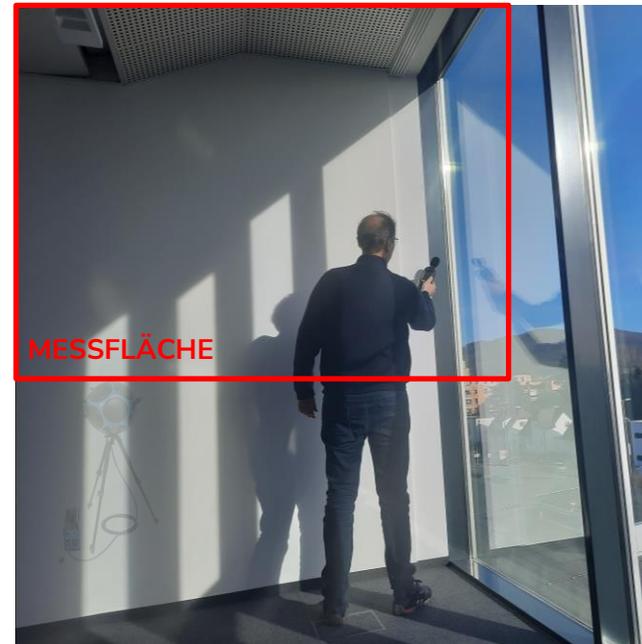


SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

SCHALLDRUCKPEGEL-MESSUNGEN AN OBERFLÄCHE



SPL in dBA, 500Hz – 6kHz

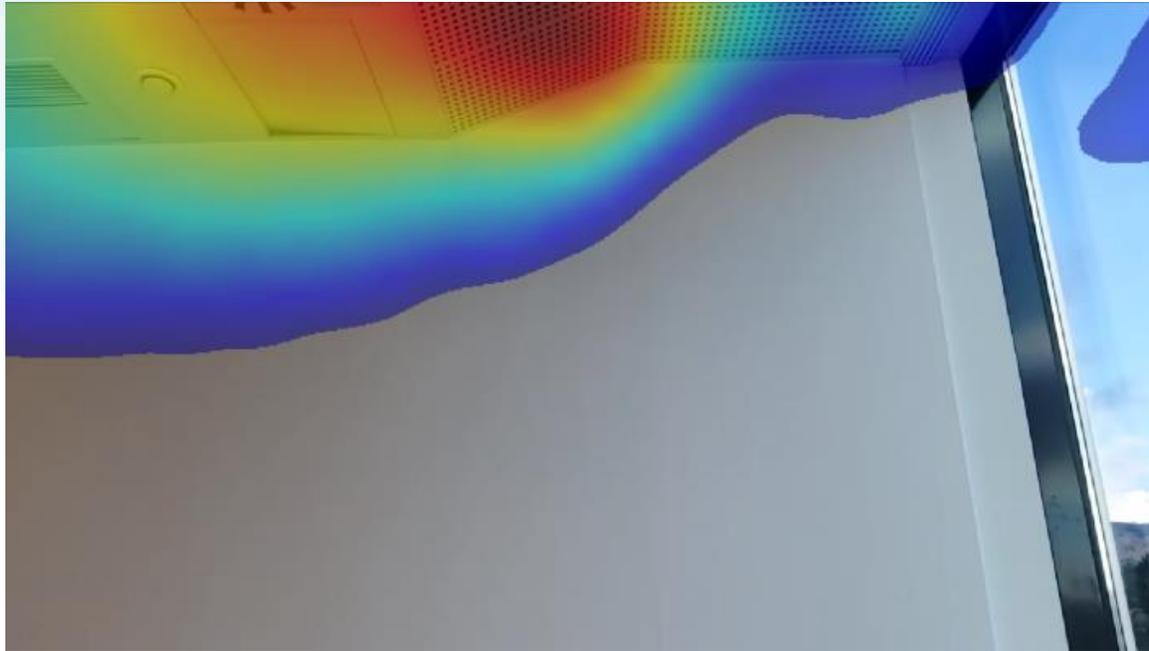


ERKENNTNIS

Erhöhte Schalldruckpegel im Bereich der Akustikdecke und am Anschluss zur Glasfassade.

SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

SOUND SCANNER MESSUNG



500Hz – 6kHz, 3dB DNR

ERKENNTNIS

- Dominante Schallemission linksseitig im Bereich der Akustikdecke.
- Reflexion am Fensterglas (6dB geringer).



SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

DIE URSACHE



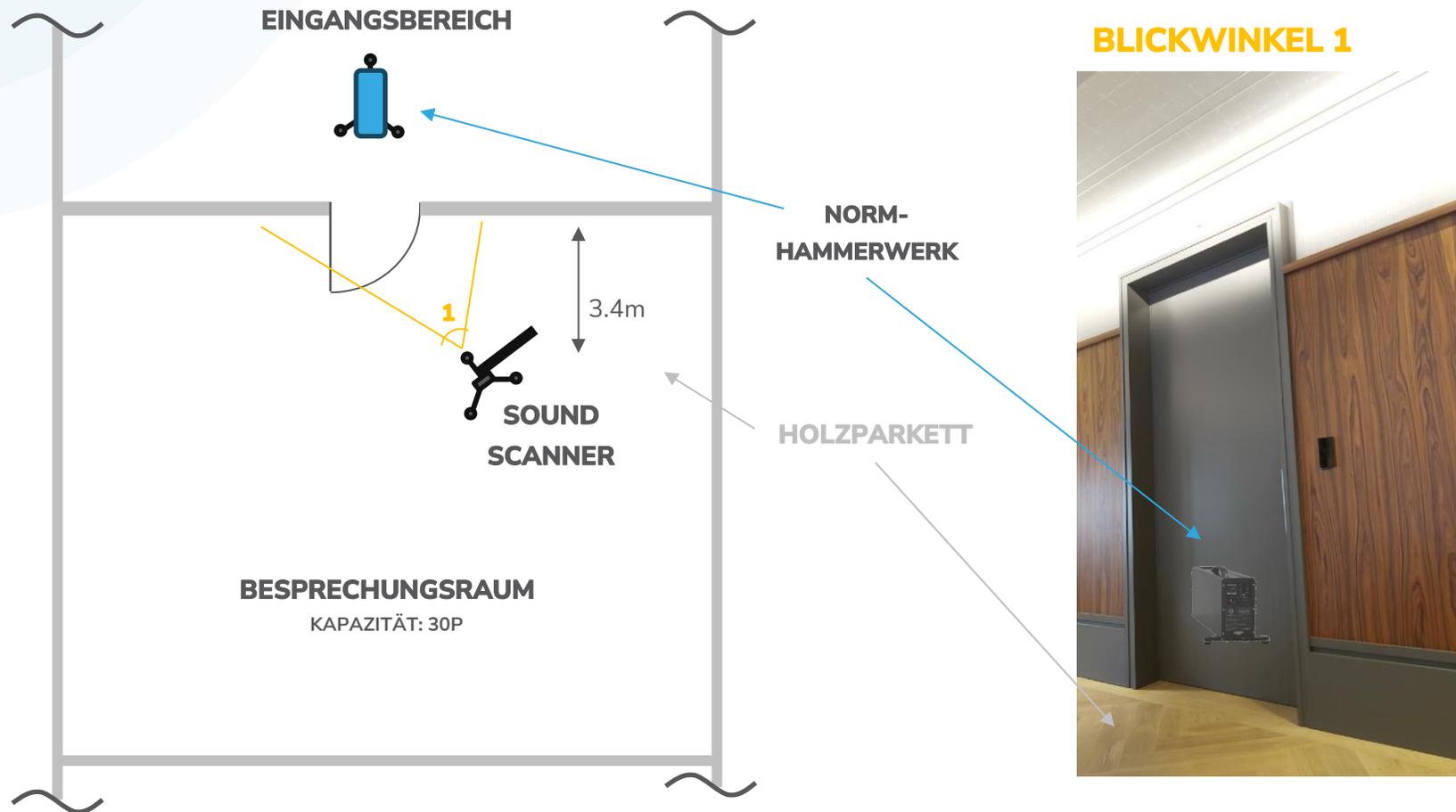
URSACHE

- Kabeldurchführung schlecht isoliert → Leckage.



SCHALLTRANSMISSION ZWISCHEN RÄUMEN

MANGELHAFTER SCHALLDÄMMUNG IM 630HZ UND 800HZ TERZBAND



KÖRPERSCHALLÜBETRAGUNG ZWISCHEN RÄUMEN

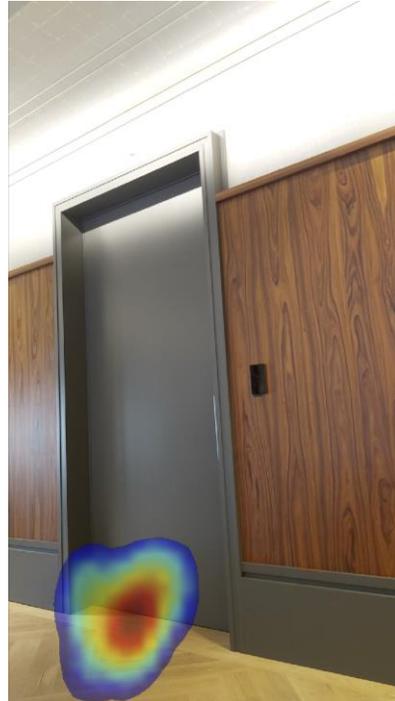
BESPRECHUNGSRAUM



A **SPL 47.2DBA**
TERZBAND 630HZ
DNR 7.8DB

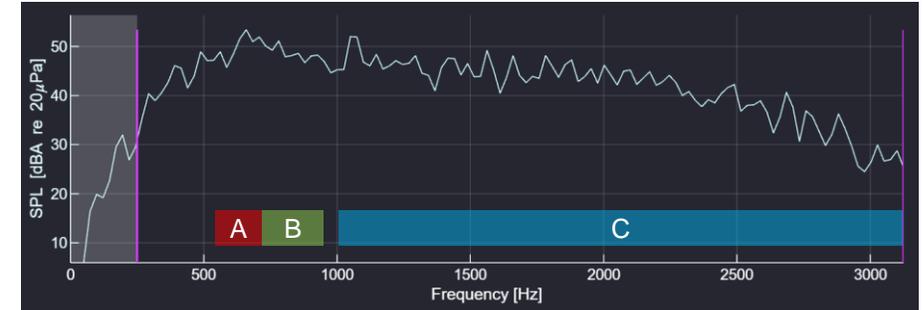


B **SPL 44.2DBA**
TERZBAND 800HZ
DNR 9.2DB



B **SPL 47.9DBA**
FREQ 1.001HZ – 3.125HZ
DNR 2.2DB

FREQUENZSPEKTRUM



ERKENNTNISSE

- Dominante Schallabstrahlung über den Fußboden zufolge Körperschallkopplung in der Trennfuge im 630Hz und 800Hz Terzband.
- Sekundäre Schallabstrahlung über Wand linksseitig im 630Hz Terzband.
- Sekundäre Schallabstrahlung über Wand links- und rechtsseitig im 800Hz Terzband.
- Vorrangig Luftschallübertragung durch Türschlitz über 1kHz.

SCHALLPFADANALYSE

STAND DER TECHNIK

SCHALLPFADANALYSE

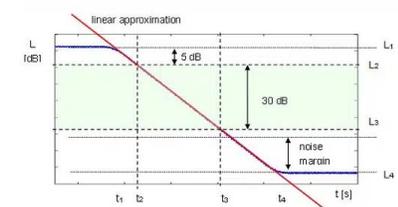
STAND DER TECHNIK



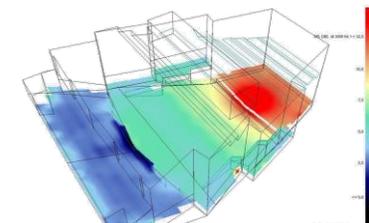
- ✓ Messmittel für raumakustische Messungen



- ✓ Verfahren zur Bestimmung der Nachhallzeit.



- ✓ Verfahren zur Berechnung der geforderten Absorption basierend auf Formeln bzw. raumakustischen Modellen.



SCHALLPFADANALYSE

BÜHNENBEREICH



SCHALLPFADANALYSE

IN-SITU LOKALISIERUNG

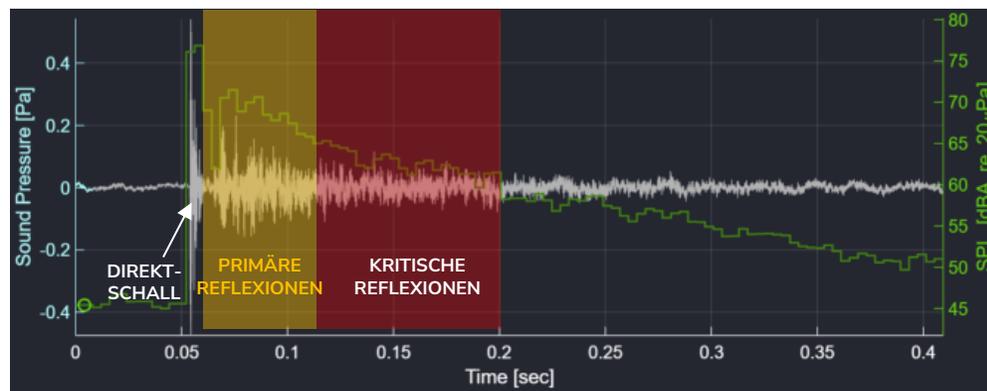


- PROBLEME:**
- Zu hohe Lautstärke
 - Verzögerte Wahrnehmung

MESSMITTEL-ANORDNUNG



NACHHALL-ZEITSIGNAL



SCHALLPFADANALYSE

IN-SITU LOKALISIERUNG

ERKENNTNISSE

- Primäre Reflexionen vorrangig über Diffusorwand.
- Kritische Reflexionen (verantwortlich für wahrgenommene Verzögerung) vorrangig über unbehandelte Wand und Diffusordecke.
- Behandlung des Wandbereichs zwischen Diffusorwand und –decke empfohlen.

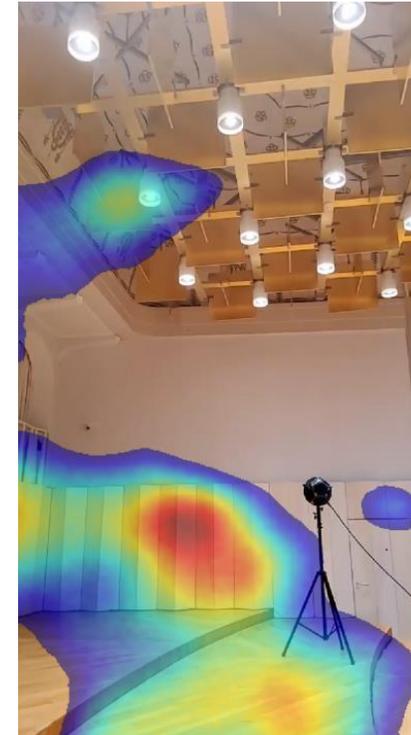
DIREKTSCHALL

0-5ms



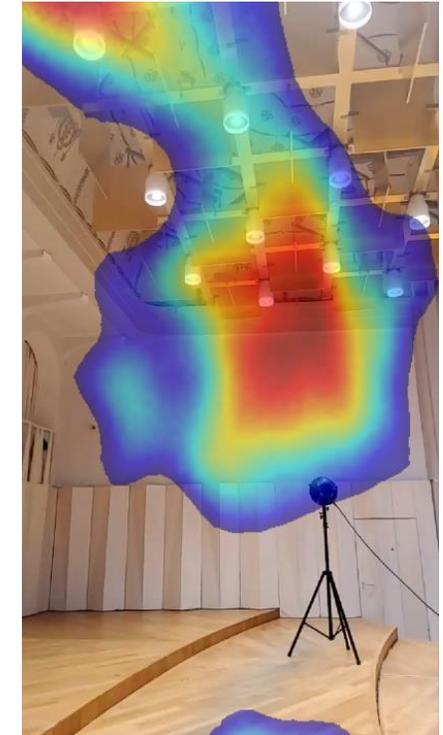
PRIMÄRE REFLEXIONEN

20-50ms



KRITISCHE REFLEXIONEN

50-150ms



FREQUENZBAND 250Hz – 3.1kHz

DYNAMIK 1DB

KONTAKT



SEVEN BEL GMBH

Hafenstraße 47-51

A-4020 Linz

DR. THOMAS RITTENSCHOBER

CEO | CTO

Mobil: +43 664 382 24 58

Email: thomas.rittenschober@seven-bel.com

Web: www.sevenbel.com