

# **Raumakustische Simulationen**

## **Methoden und Anwendungen**

**Tom Graf & Armin Taghipour**  
**Hochschule Luzern – T&A**

Hintergrund: Simulations-Mesh des Physikhörsaals E528

# Akust. Gestaltung in der Planung

Akustischer Komfort ist eine wichtige Komponente des Wohlbefindens. In der Bauplanungsphase, sowie in der Interventionsplanung gibt es mehrere Möglichkeiten der akustischen Untersuchung.

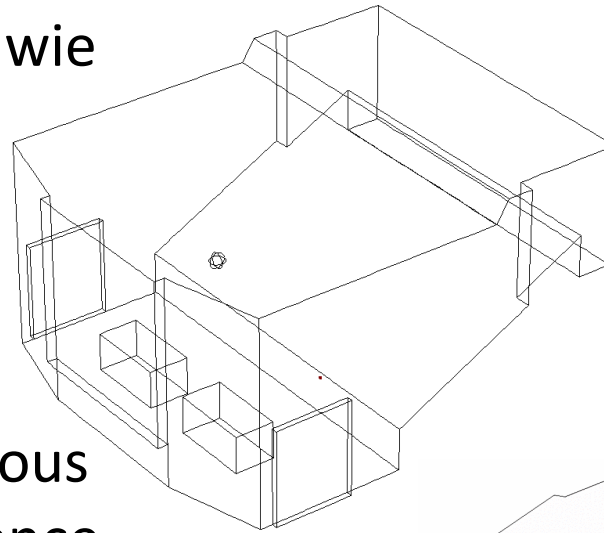
- 1. Abschätzungen**, z.B. mit Hilfe der Formel von Sabine für die Absorption.  
→ Fehleinschätzungen verursachen in der Folge hohe Kosten.
- 2. Bauen von Prototypen** (Mockup, Musterraum)  
→ kostet viel Zeit und Geld.
- 3. Numerische Simulation**  
→ Änderungen schnell und kostengünstig ausprobieren & Varianten durchspielen.

# Verschiedene Sim.-Methoden

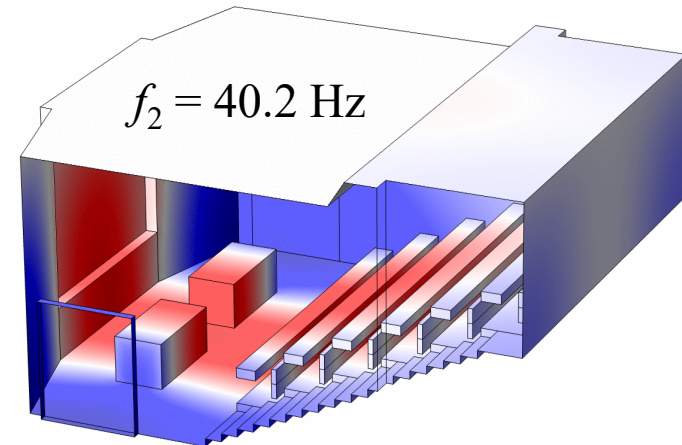
**1. Diffusion** der akustischen Energiedichte (energy finite element method)  
→ Lärmdiffusion. Verteilung des Schalldruckpegels im Raum.

**2. Geometrische Schallausbreitung** wie Lichtstrahlen (**raytracing** method)  
→ Impulsantwort, Auralisation

**3. Schallwellen-Ausbreitung** (finite element method (FEM), boundary element method (BEM), discontinuous Galerkin (DG) method, finite difference time domain (FDTD) method, ...)  
→ Beugung an Hindernissen, Überlagerung von Signalen (stehende Wellen)



Raytracing-Analyse  
des T&A Physik-  
hörsaals E528



(FEM): Eigenmoden-  
Analyse des T&A  
Physikhörsaals E528

# Sechs Projekte

Wir nutzen numerische Simulationen immer in Verbindung mit experimenteller oder analytischer Validierung. Beispiele:

- 1. Simulation akustischer Vorhänge** → Neues Produkt,  $R_w$ -Berechnungsapp
- 2. Lärmpegel in Mensa T&A** → Mängelliste, Verbesserungen vorgeschlagen
- 3. Akustik in Innenhöfen** → Akustisches Wohlbefinden, Lärmlästigkeit
- 4. Deckengestaltung in Spital** → Musterdecke eingebaut, Tests laufen
- 5. Akustische Dämmung von Wetterschutzgittern** → Design rules
- 6. Trittschall in Doppel/Hohlböden** → Machbarkeit demonstriert, Patent

# Akustische Vorhänge (AV)

**Auftrag:** Entwicklung transluzenter Vorhangsysteme als akustische Abgrenzung - Wie erreicht man Privacy im Grossraumbüro ?

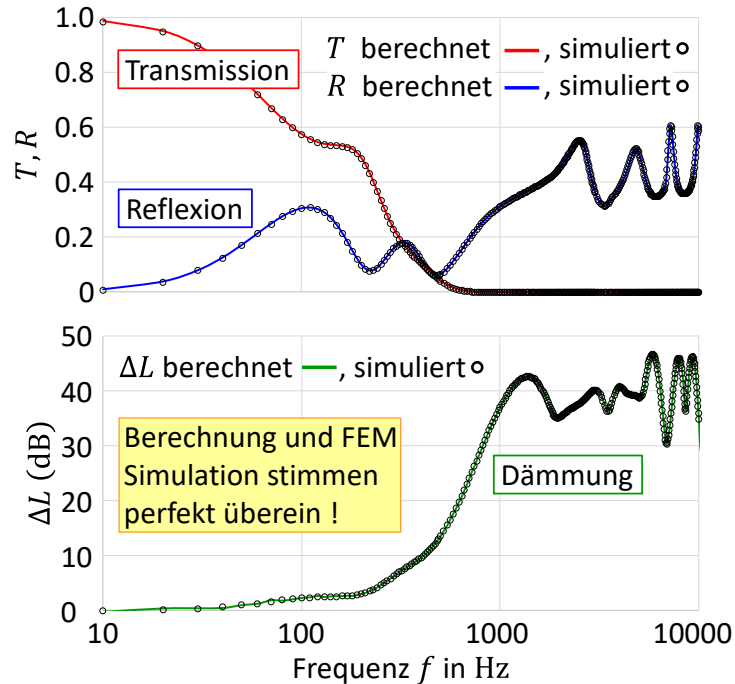
## Resultate:

1. Neue, mehrlagige, transluzente akustische Vorhänge sind im Sortiment der Firma.
2. Befragungen bestätigen die akustische Verbesserung.
3. Eine App zur Berechnung des Schalldämmmasses  $R_w$  für mehrlagige Vorhänge wurde entwickelt.



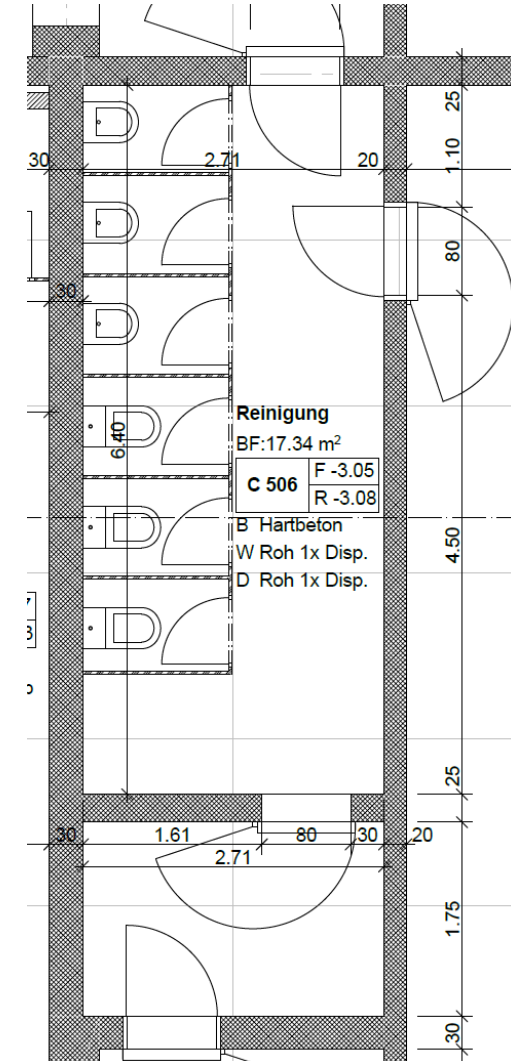


# (AV) Simulation und Validierung



↑ Berechnung und 1D-Simulation eines 5-Lagen Vorhangsystems als Funktion der Frequenz  $f$ . → App

Prüfstand für mehrere Vorhanglagen hintereinander, mit unterschiedlichem Abstand und einzeln abgedichtet. →

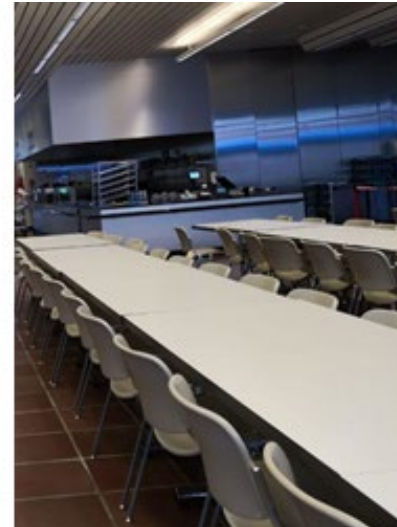


# Mensa T&A – Lärmanalyse (LM)

**Frage:** Warum ist die Mensa der T&A so laut?  
Welche Massnahmen?

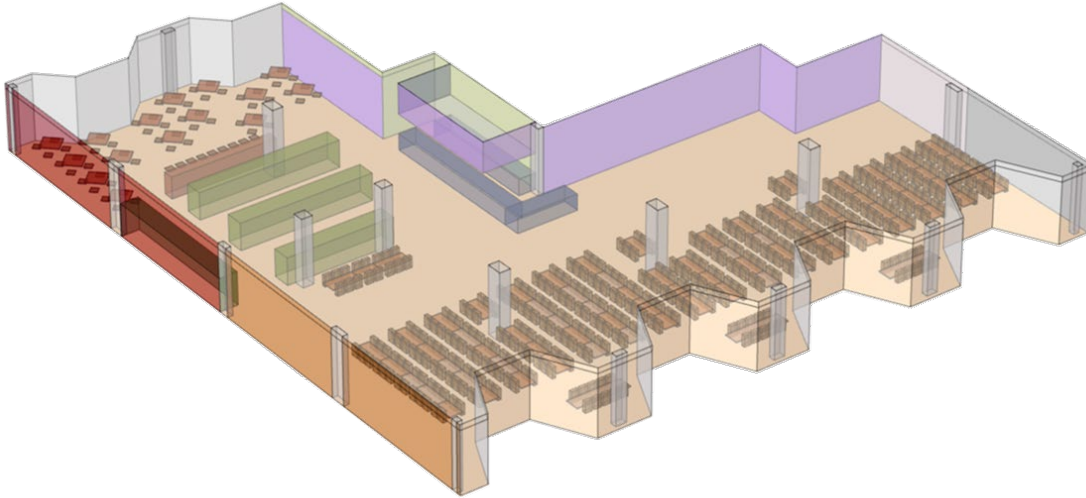
**Resultate:**  
Messungen und Simulationen zeigen akustische Mängel:  
RT60, Pegelabnahme mit Entfernung, zu viele Gäste.

**Mögliche Massnahmen:**  
Absorber (Wände, Vorhänge, ev. Decke, ...)





# (LM) Simulation

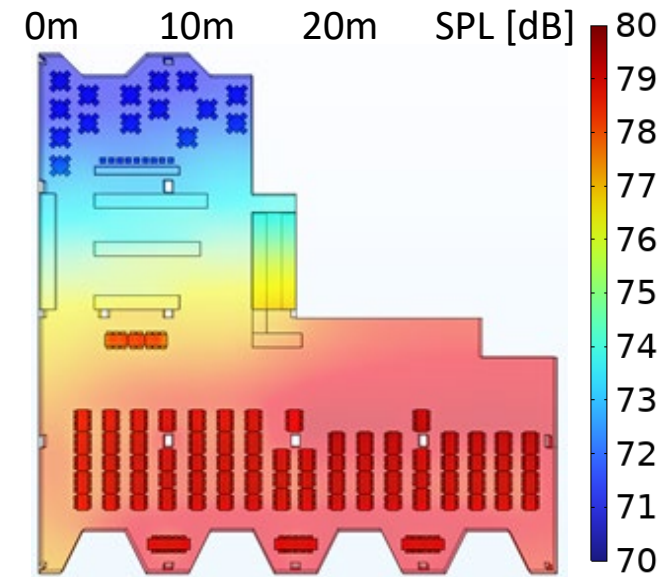
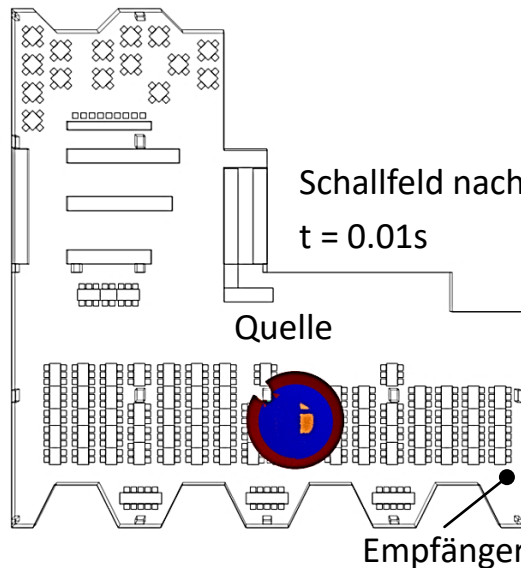
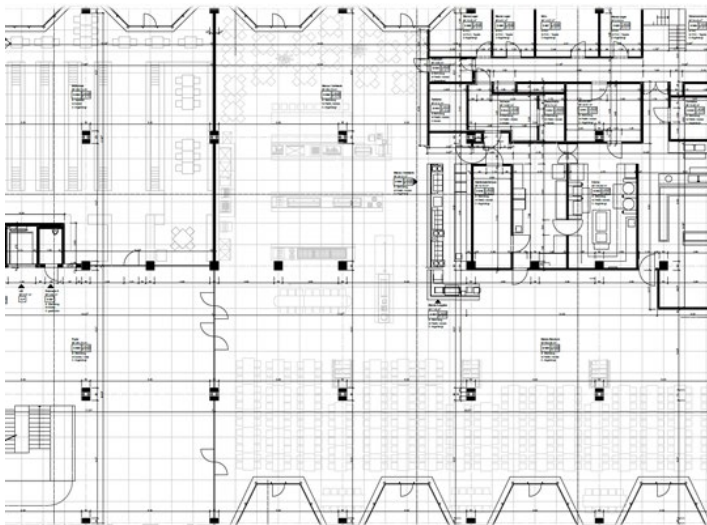


## Berechnung der Nachhallzeit RT60:

- Abschätzung: **Sabine**'sche Formel
- **Raytracing** Simulation → kanonische Gl. für Position  $q$  und Wellenzahl  $k$ :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}}, \frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial q}, \omega = c|\mathbf{k}|$$

- Simulation der **Diffusion** der Schallenergiedichte  $w$ :  $\nabla(D_t \nabla w) + cm_a w = q(x)$ ,  
mit  $m_a$  = Volumen-Absorptions-Koeffizient



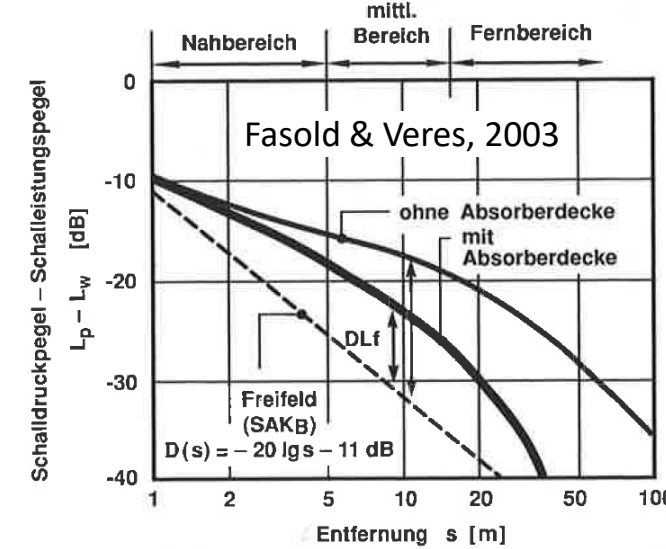
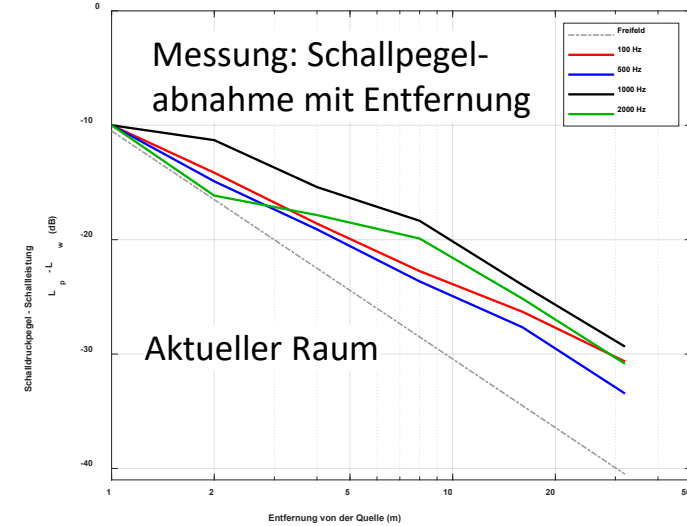
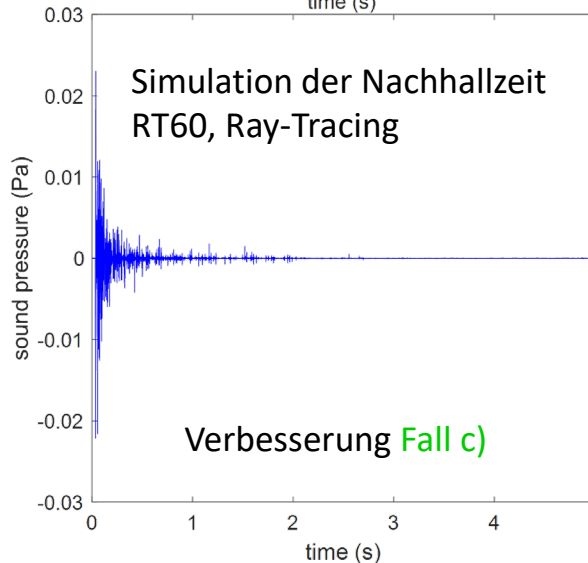
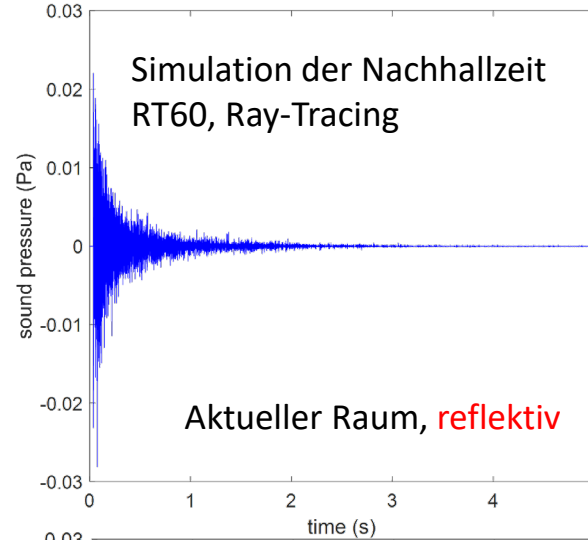


# (LM) Resultate

## Verschiedene Verbesserungsvarianten, simuliert:

- a) Decke: Filzfelt Akustika
- b) Decke: Filzfelt Akustika;  
Boden: Flotex
- c) Decke: Filzfelt Akustika;  
Boden: Flotex;  
Wand: Filzfelt Scale;  
Fenster: Filzfelt ARO\_Block

Situation, Szenario	RT (s) Sabine	RT (s) Ray
reflektiv	2.59	1.7
a)	0.54	0.2
b)	0.497	0.2
c)	0.48	0.2



# Innenhof-Akustik (IA)

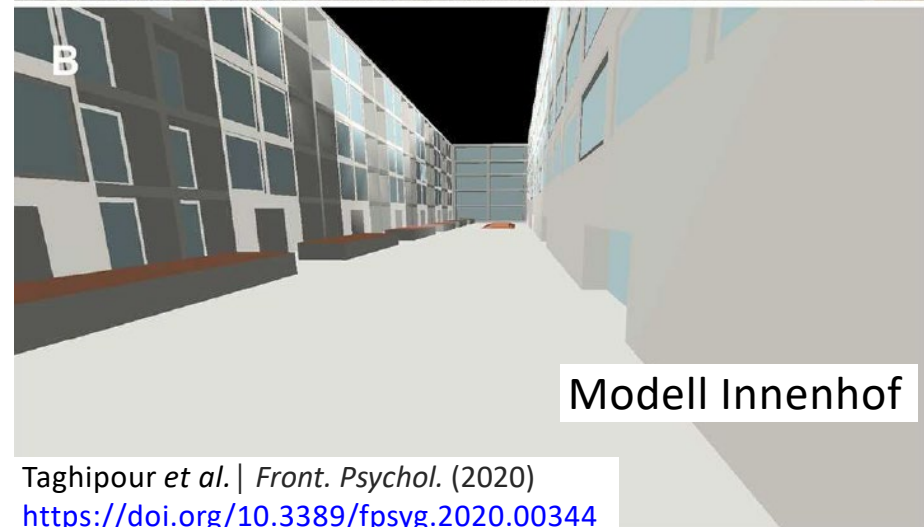
**Auftrag:** Verbesserung des akustischen Komforts in Innenhöfen.

## Simulationsszenarien:

Schallabsorbierende vs. -reflektierende Fassaden, Balkonuntersicht, Hof

## Resultate:

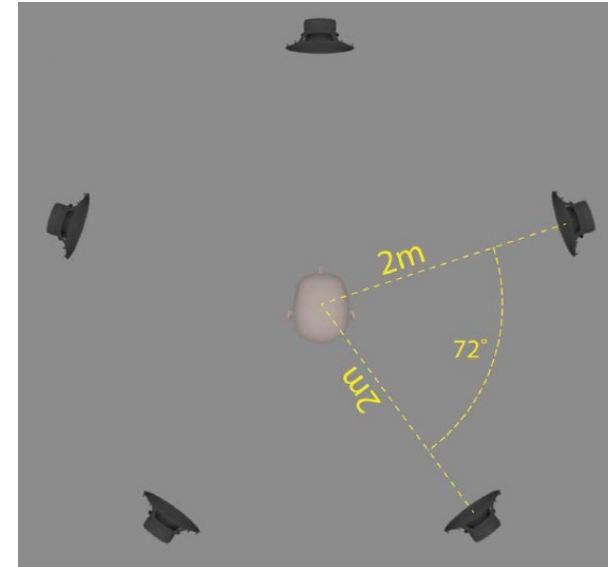
1. Impulsantwort eines virtuellen Innenhofs wurde simuliert. → Auralisation.
2. Psychoakustische Experimente.
3. Moderate Fassadenabsorption verbessert akustischen Komfort.



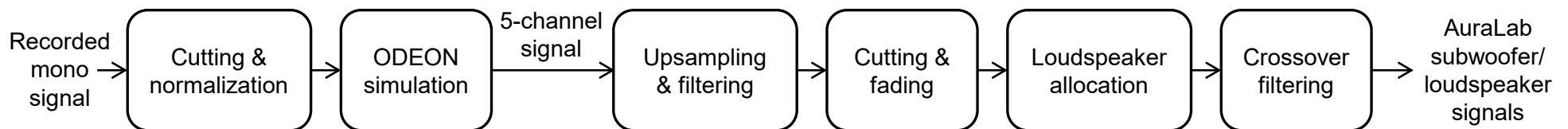
Taghipour et al. | *Front. Psychol.* (2020)  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344>

# (IA) Psychoakust. Experimente

Playback für psychoakustische Experimente im AuraLab der Empa. Die Testperson sitzt im Zentrum von 5 kreisförmig angeordneten Lautsprechern.



Blockschaltbild der Signalverarbeitung von der Aufnahme bis zur Auralisation

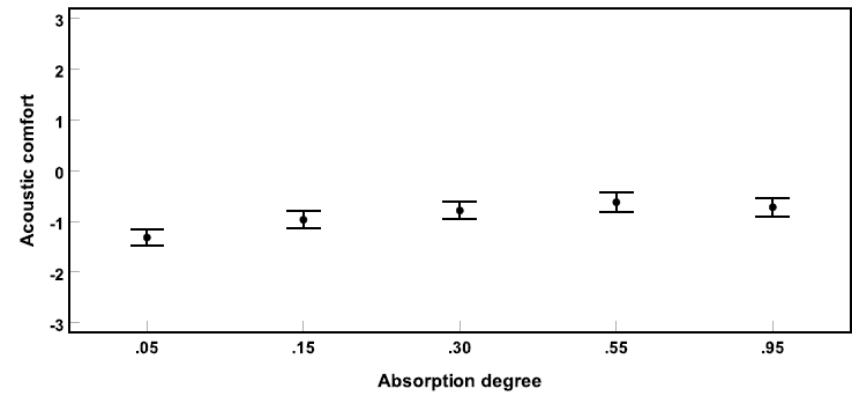
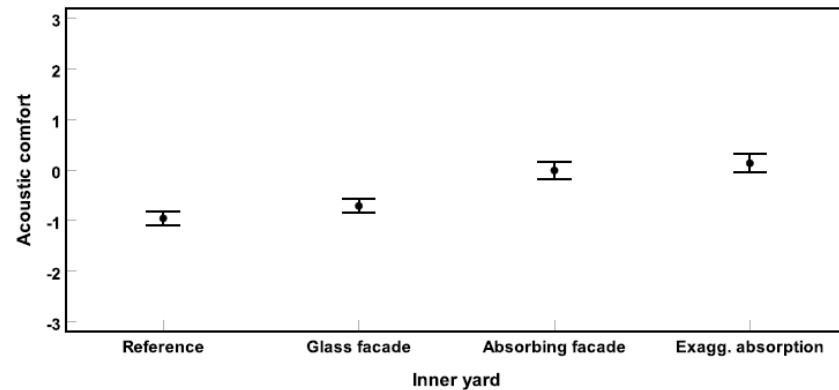


Taghipour et al. | *Int. J. Environ. Res. Public Health* (2019) <https://doi.org/10.3390/ijerph16020249>

Taghipour et al. | *Front. Psychol.* (2020) <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344>

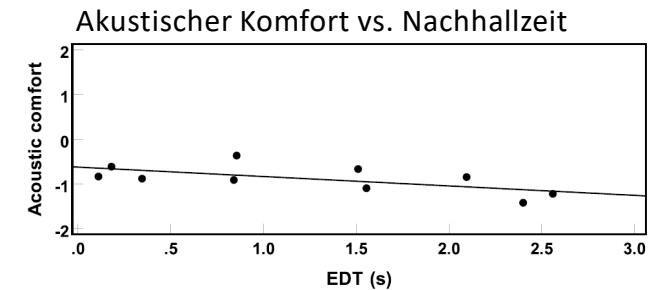
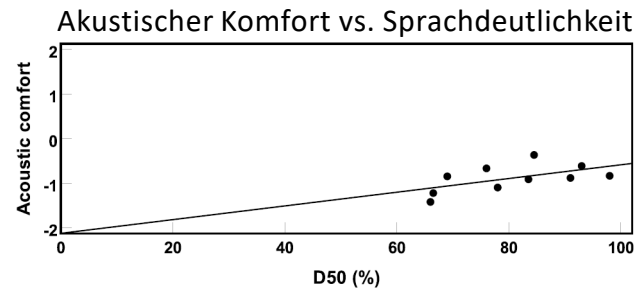
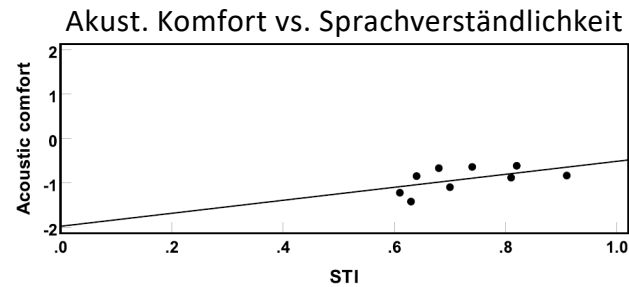
# (IA) Ergebnisse

Moderate Fassadenabsorption führte zum besten akustischen Komfort bei Nachbarschaftslärm.



Beispielresultate aus Taghipour *et al.* | *Int. J. Environ. Res. Public Health* (2019) <https://doi.org/10.3390/ijerph16020249>

Raumakustische Parameter korrelieren mit akustischem Komfort.



Beispiele aus Taghipour *et al.* | *Front. Psychol.* (2020) <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344>

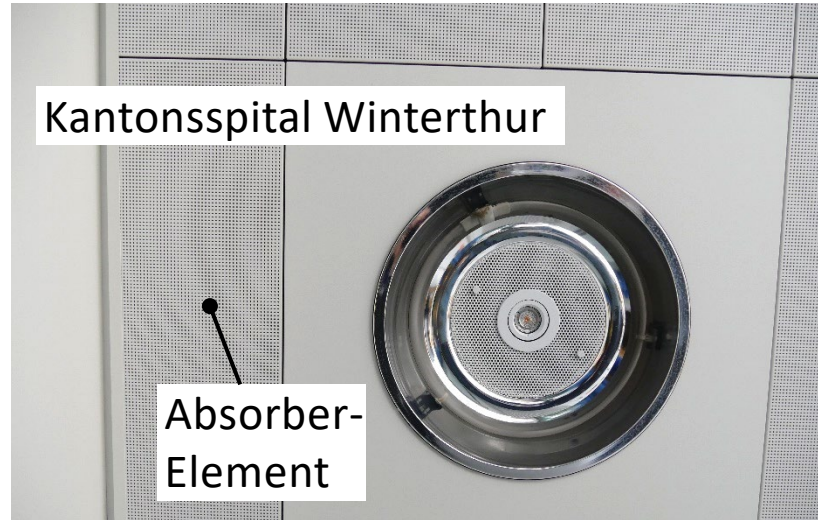


# Therapeutische Systemdecke (TD)

**CeilHeal:** Entwicklung therapeutischer Systemdecken unter Berücksichtigung der Akustik und Hygiene.

## Resultate:

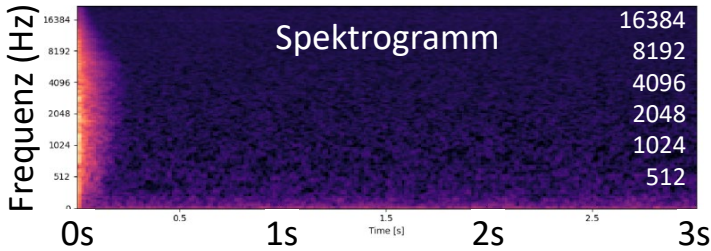
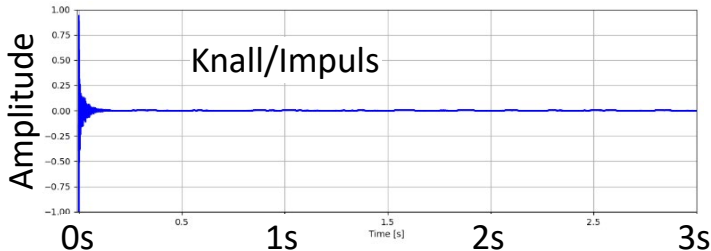
1. Impulsantwort verschiedener Räume wurde gemessen.
2. Raummoden berechnet.
3. Musterdecke im Spital eingebaut.



← CeilHeal Decke ↑

# (TD) Situation Privatklinik Bethanien

Impulsquelle = Klappe/Knackfrosch

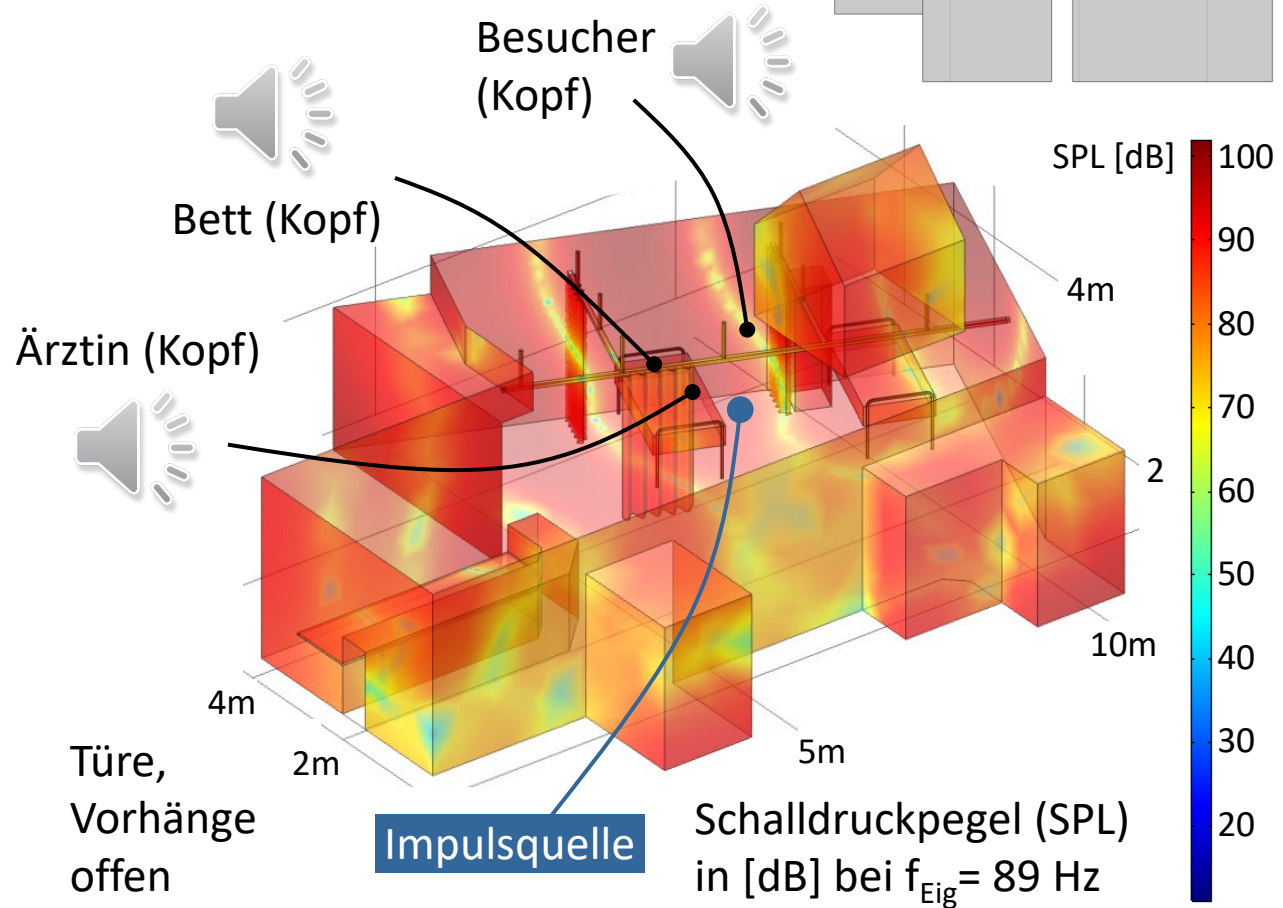
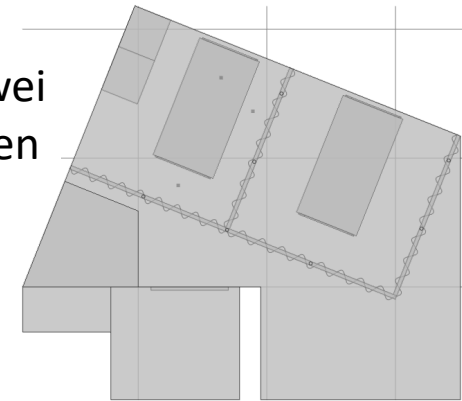


Hörbeispiel:



## Abteilung Überwachung

Grundriss zwei  
Zimmer, Kojen





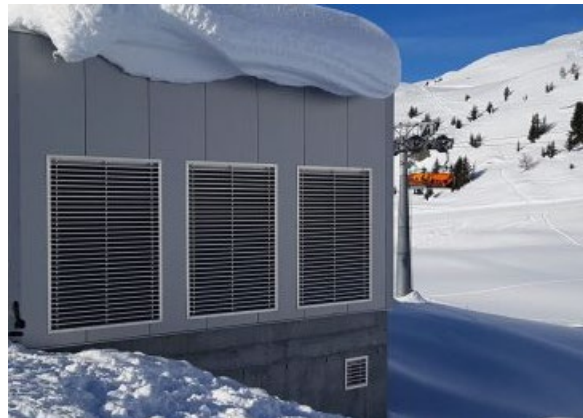
# Dämmung bei Wetterschutzgitter

**Auftrag:** Möglichkeiten zur Erhöhung des Dämmmasses bei Wetterschutzgittern.

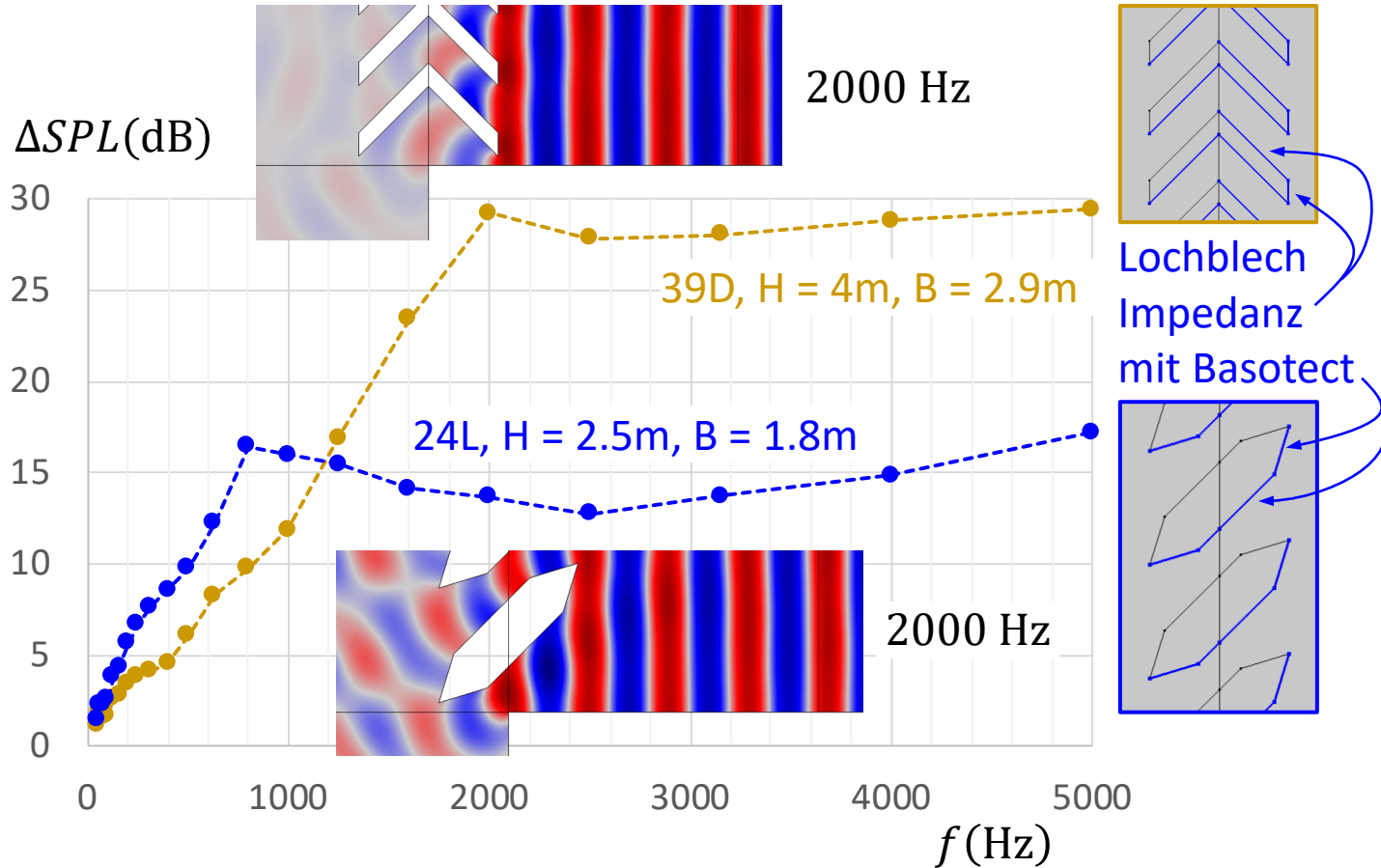
## Resultate:

1. Entwurfsregeln → Möglichkeiten für Verbesserung durch:

- A) Form der Lamellen
- B) Innenauskleidung mit Absorber.

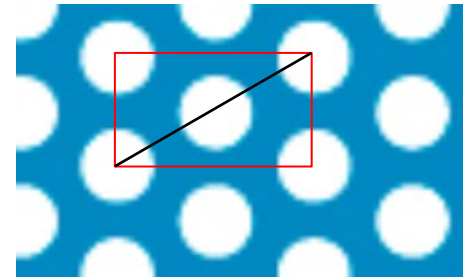


# Simulation und Berechnungen



Lochblech Impedanz  $Z$   
mit Basotect-Füllung

Einheitszelle (EZ)



$$Z = \left( \frac{\sigma}{Z_L} + \frac{(1 - \sigma)}{Z_B} \right)^{-1}$$

Lochimpedanz  $Z_L(f)$

Blechimpedanz  $Z_B \cong \infty$

In Parameterstudien wurden Form, Anstellwinkel, Abstand & Abmessungen der Lamellen untersucht. → Design rules !

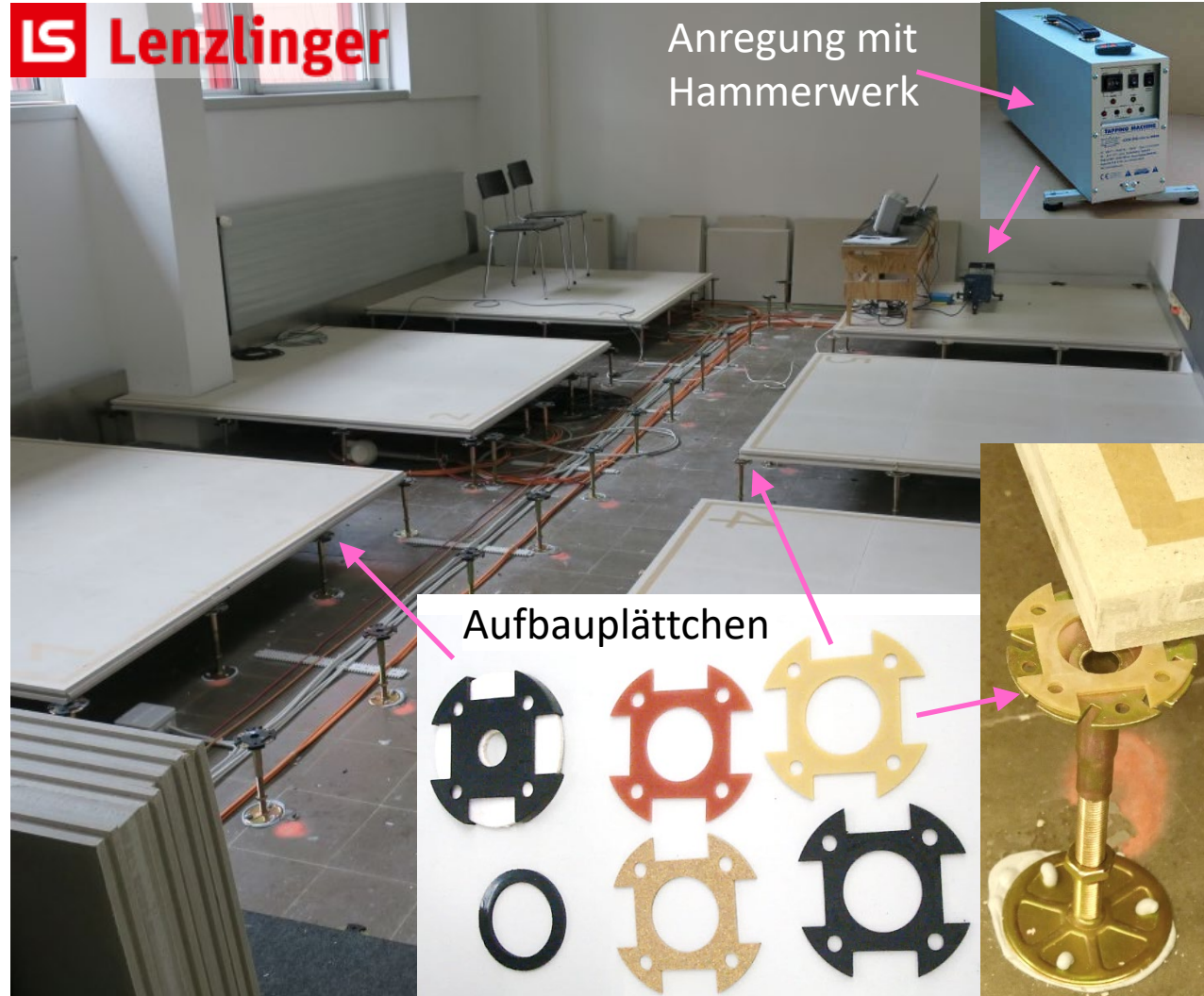


# Trittschall bei Systemböden (TB)

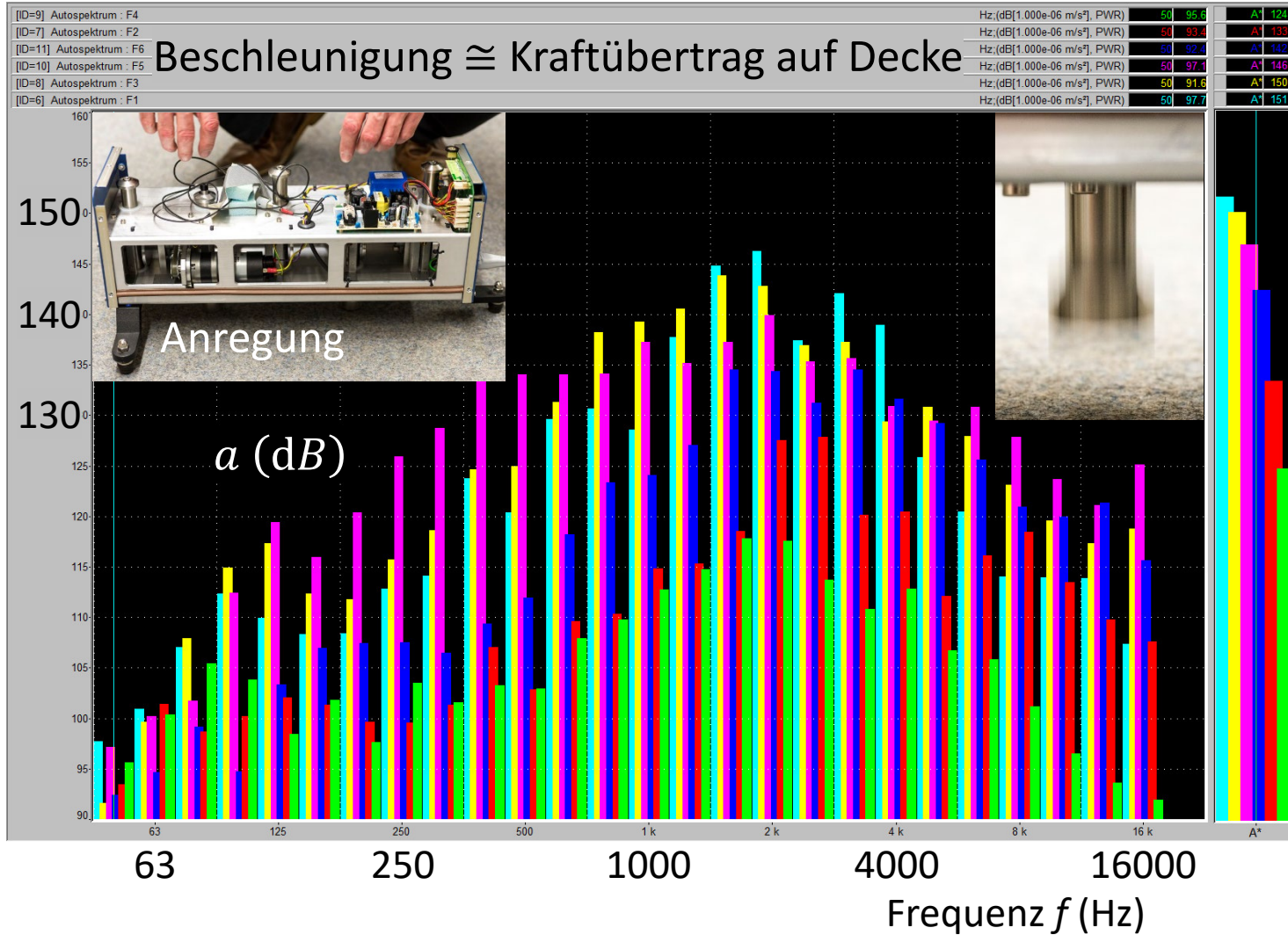
**Auftrag:** Machbarkeit von flexiblen Systemböden für Wohn- und Hybridgebäude; wirtschaftliche, statische und akustische Aspekte.

## Resultate:

1. Die Machbarkeit konnte nachgewiesen werden.
2. Das entscheidende Element sind die Aufbauplättchen.
3. Eine Partnerfirma hat ein Patent eingereicht.



# (TB) Messung/Validierung



A- Bewertungen

Original 152 dB

NBR schw 150 dB

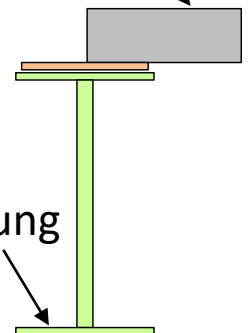
NBR Ring 147 dB

Kork 142 dB

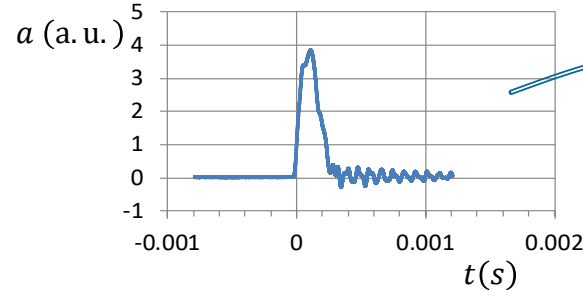
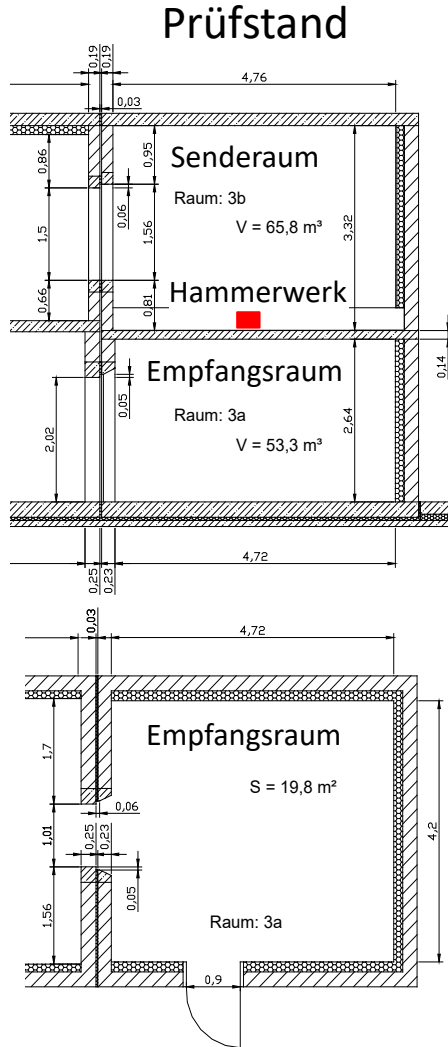
Multi PGR 133 dB

Natur Gu. 125 dB

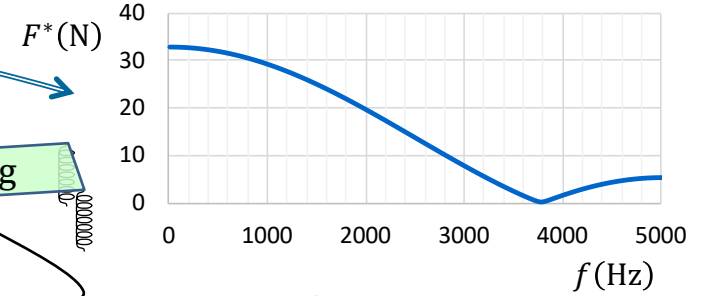
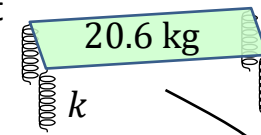
Anregung



# (TB) Simulation nach ISO 10140-3



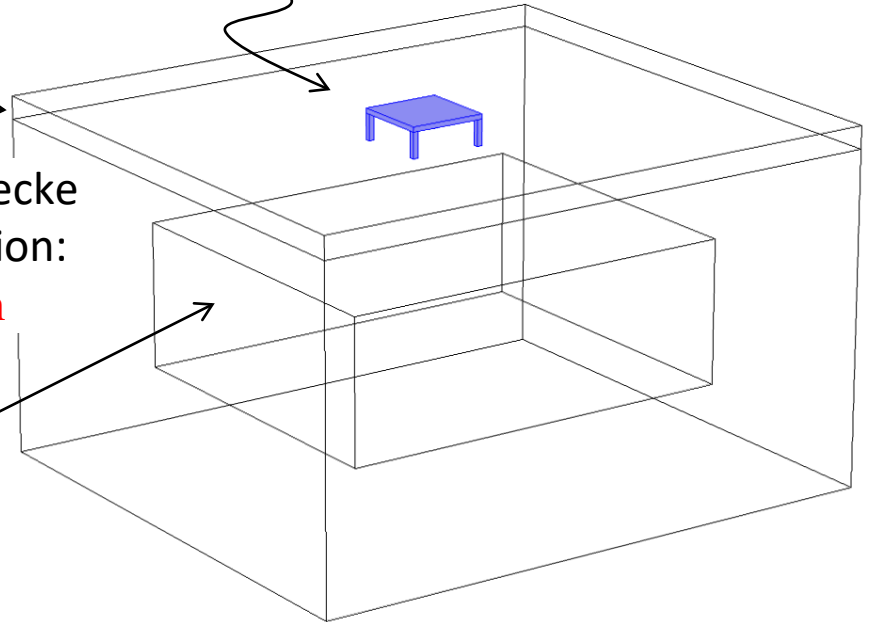
10 Hz  
Takt



Stuttgart  
140 mm

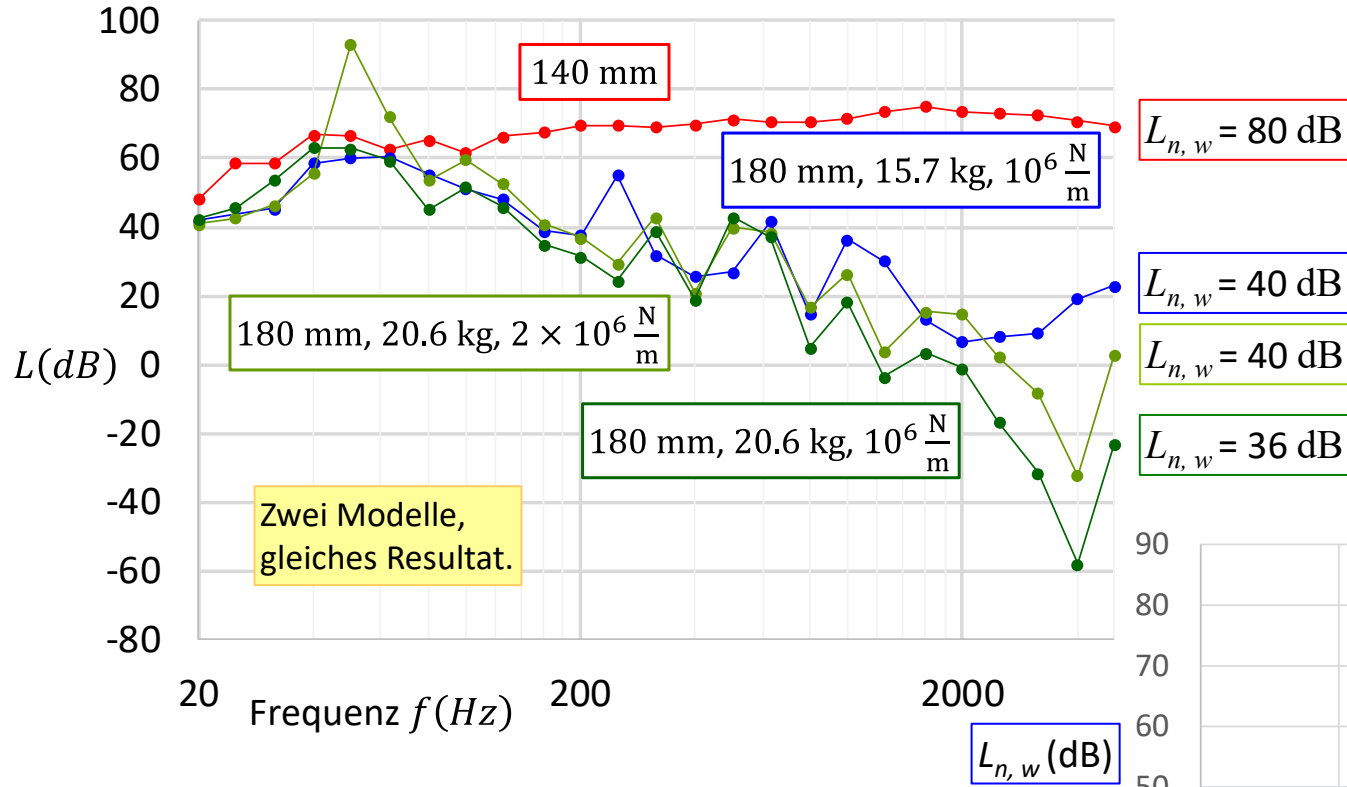
Betondecke  
Simulation:  
180 mm

Volumenmittelung  
der Schalleistung



Raum:  $4.72 \times 4.2 \times 2.64 \text{ m}^3$ , mit effektiver Absorptionsfläche  $10 \text{ m}^2$  (Norm)  $\rightarrow \alpha = S_{ref}/S_{eff} = 0.149$

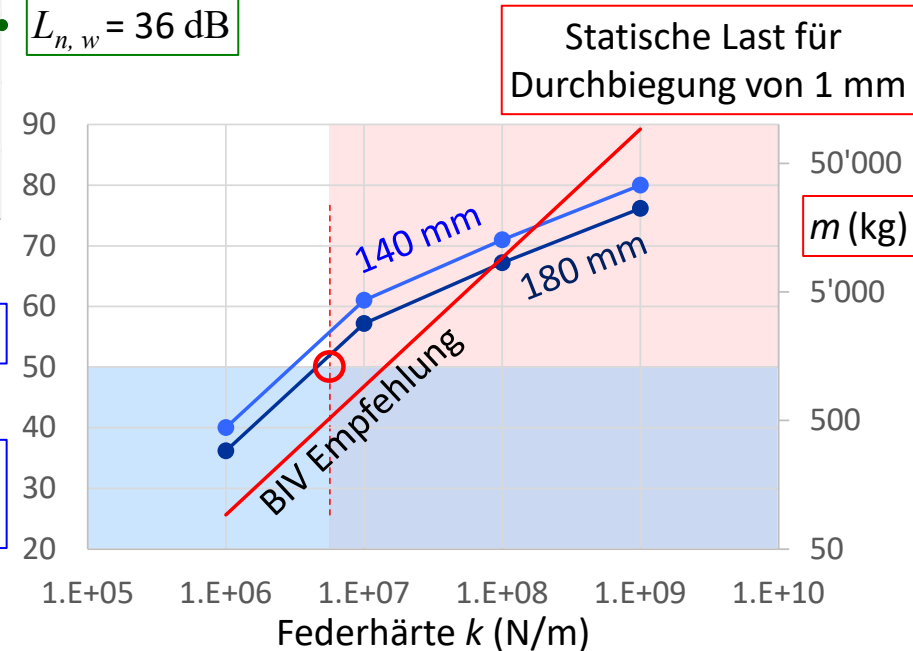
# (TB) Simulation



**Ziel:**  $L_w < 50 \text{ dB}$  und gleichzeitig Steifigkeit.

**Lösung:** Durch geeignete Geometrie der Aufbauplättchen.

Norm-Trittschallpegel nach ISO 10140-3

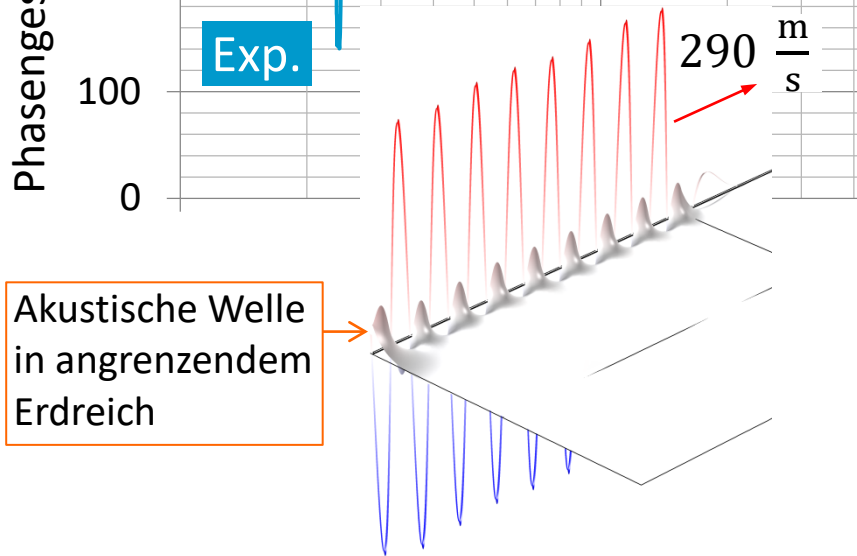
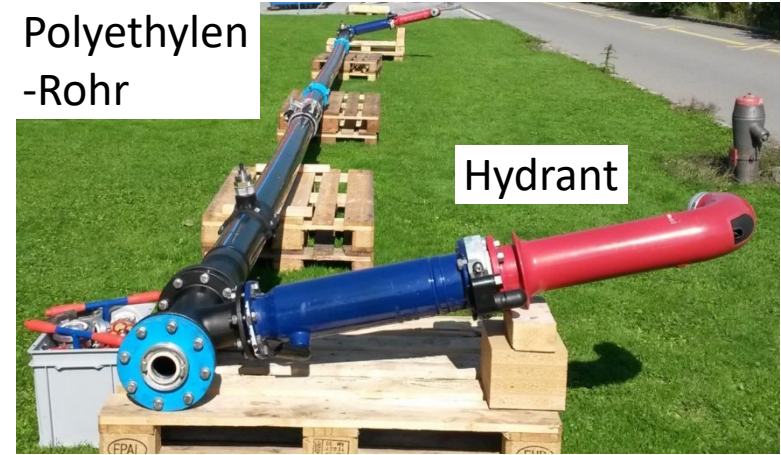
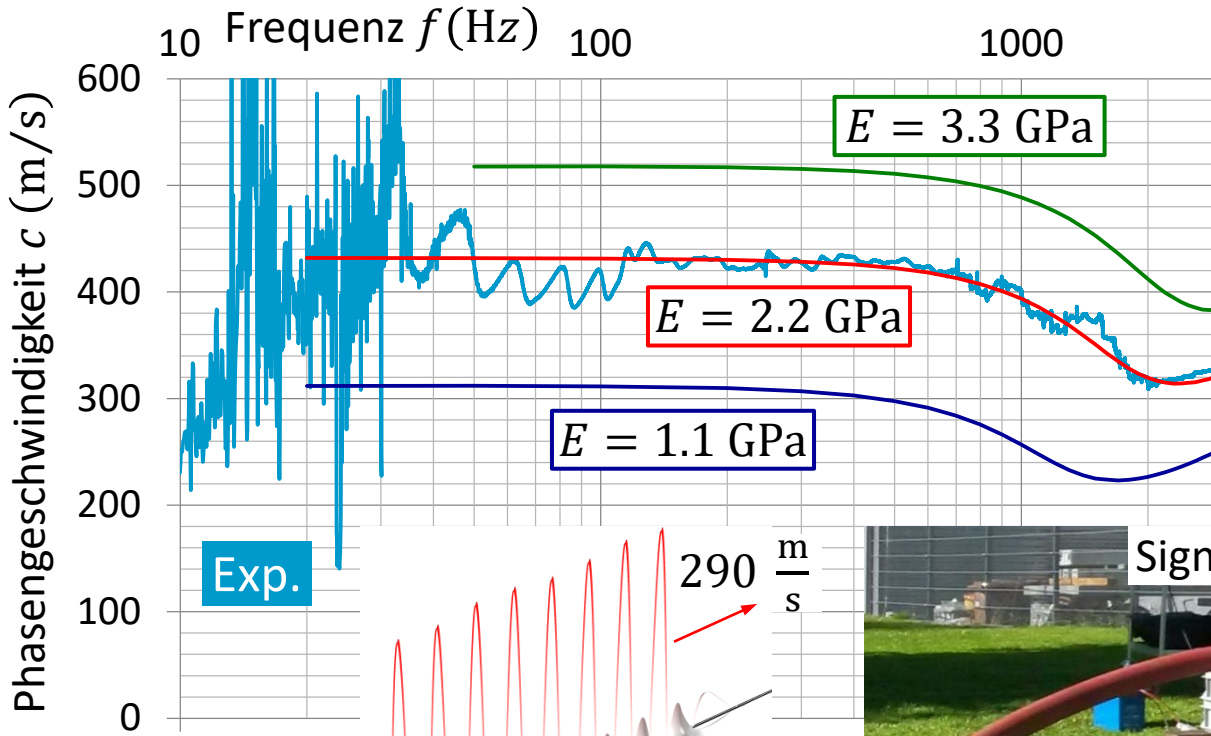




# Zusammenfassung

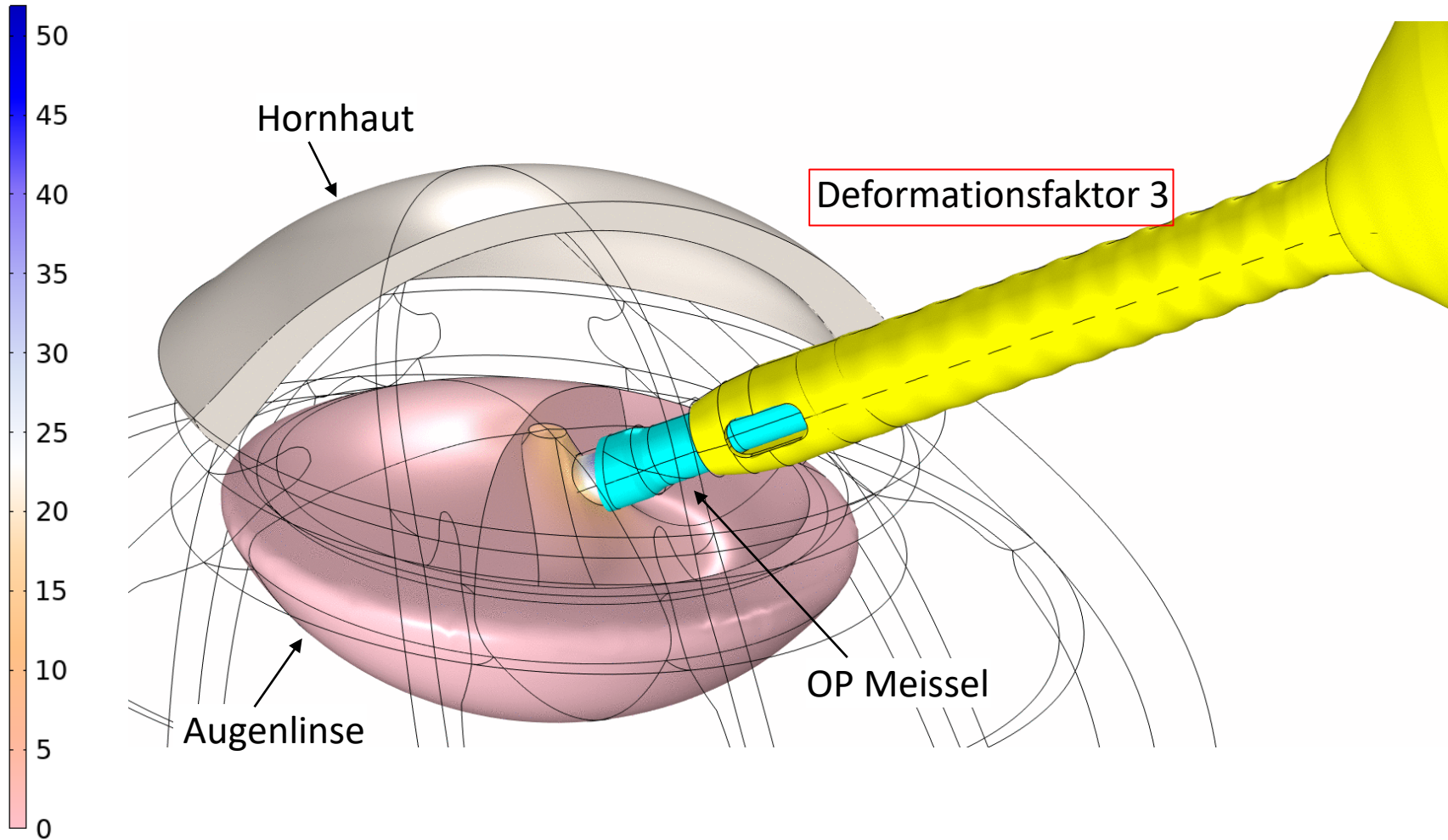
- Numerische Simulation von Innen-/Aussenräumen lohnt sich. Akustische Probleme können erkannt und angegangen, verschiedene Verbesserungen bereits in der Planungsphase virtuell ausprobiert werden.
- Numerische Simulation ermöglicht Auralisierung mit anschliessenden Hörtests in virtuellen Räumen.
- Wir verfolgen einen multidisziplinären Ansatz: Simulation, pragmatische Validierung, Befragungen und ständiges Weiterlernen.
- Das Programm Comsol Multiphysics® kann auch zur Simulation von Quellen, zur Lösung elektromagnetischer und thermischer Probleme, sowie zur Behandlung von Feuchtigkeitstransports verwendet werden.

# Leckmeldung in Wasserleitungen



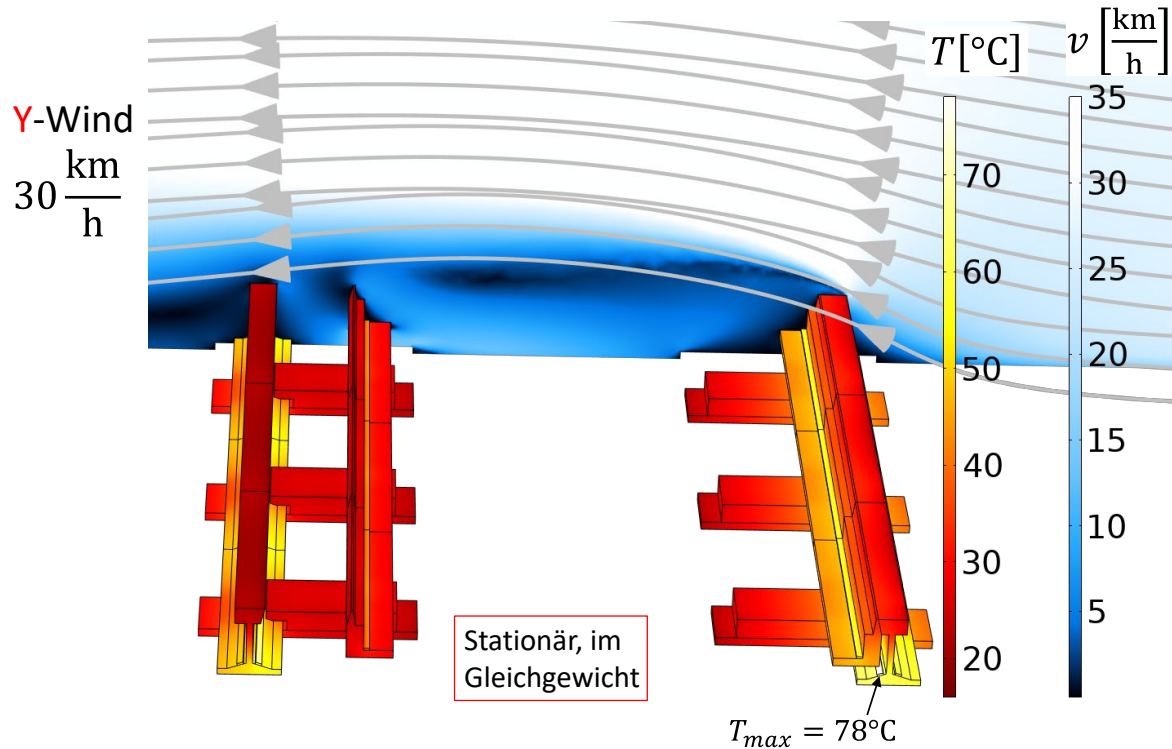
# US in medizinischer Anwendung

Auslenkung [ $\mu\text{m}$ ]



# Weitere Sim. Anwendungen

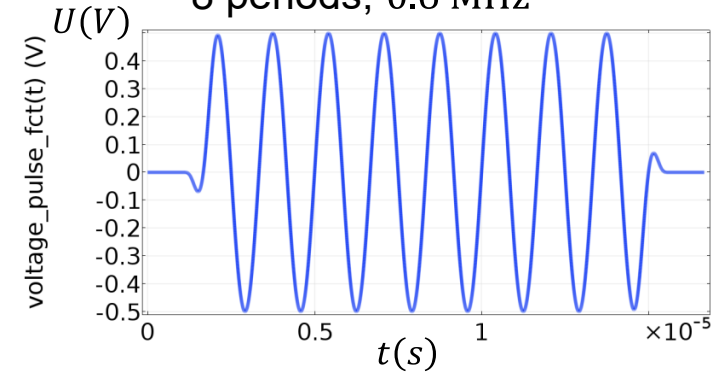
Num. Simulation einer Weichenheizung ↓ ...



... von Ultraschallwellen ↓

Elektrisches Signal auf Piezo

8 periods, 0.6 MHz



Ultraschallwellen-  
Einkopplung in Wasser

