

Anwendungsorientierte Auralisation

Michael Vorländer

Institut für Hörtechnik und Akustik

RWTH Aachen

Wozu Auralisation?

Allgemein: Für bessere Kommunikation zu akustischen Sachverhalten

- Vergessen wir das Dezibel oder andere Metriken.
- „Schall“ sollten wir nicht in Farbkarten oder in Tabellen anschauen, sondern anhören!
- Dadurch werden Unklarheiten vermieden.
- Und es macht Spaß!

Wozu Auralisation?

In der Architektur

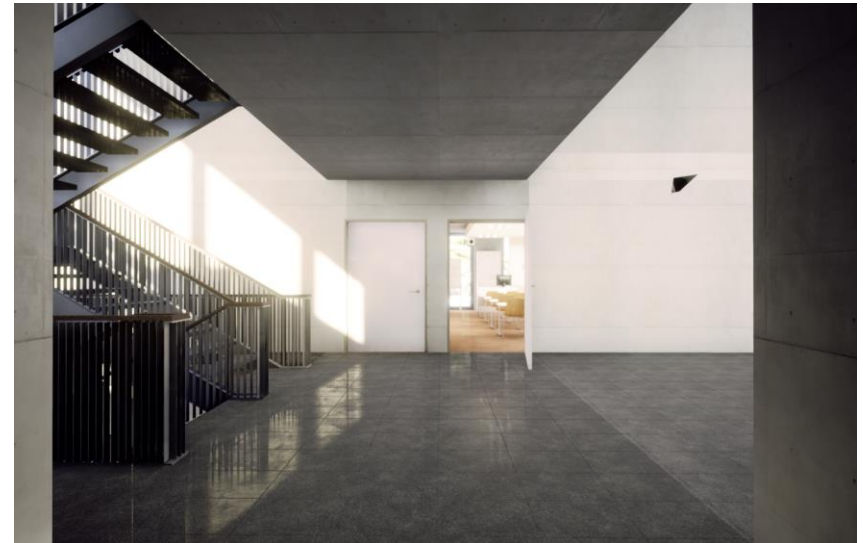
- Entwurfsprozess mit unmittelbarer Rückmeldung.
- Ergänzung des Entwurfsprozesses durch andere als die rein visuelle Informationen.
- Schalldaten nicht anschauen, sondern anhören!
- Dadurch Unklarheiten vermeiden.
- Berücksichtigung der komplexen Situation durch Ausnutzen der menschlichen Hörwahrnehmung.

- Spaß haben!

... für Innenräume



Dr. Josep Llorca-Bofi (Unreal Engine)



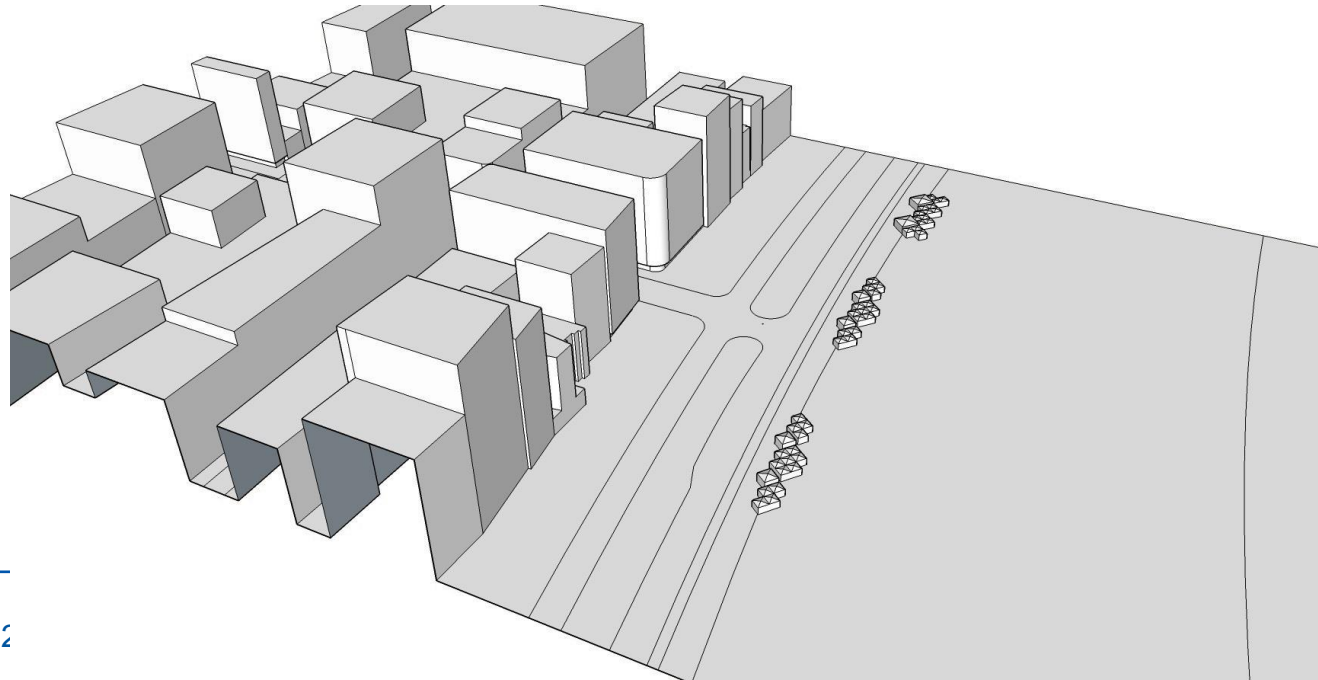
Dr. Josep Llorca-Bofi (Unreal Engine)

Wozu Auralisation?

... auch für die Stadtplanung



Copacabana, Rio de Janeiro

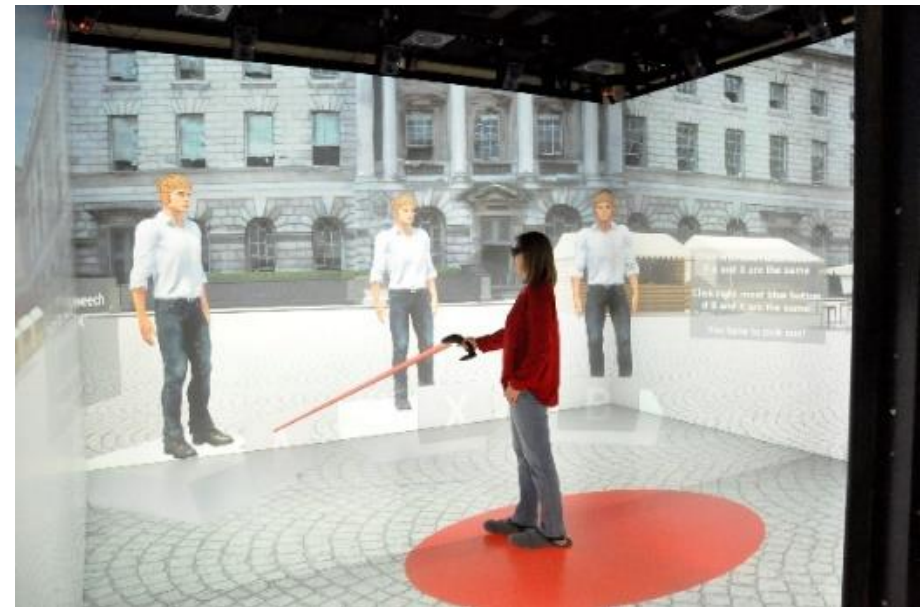


Wozu Auralisation?

für die Hörforschung

- Realistischere Stimuli!
- Berücksichtigung von komplexeren Situationen und der menschlichen Hörwahrnehmung.
- Spaß haben!

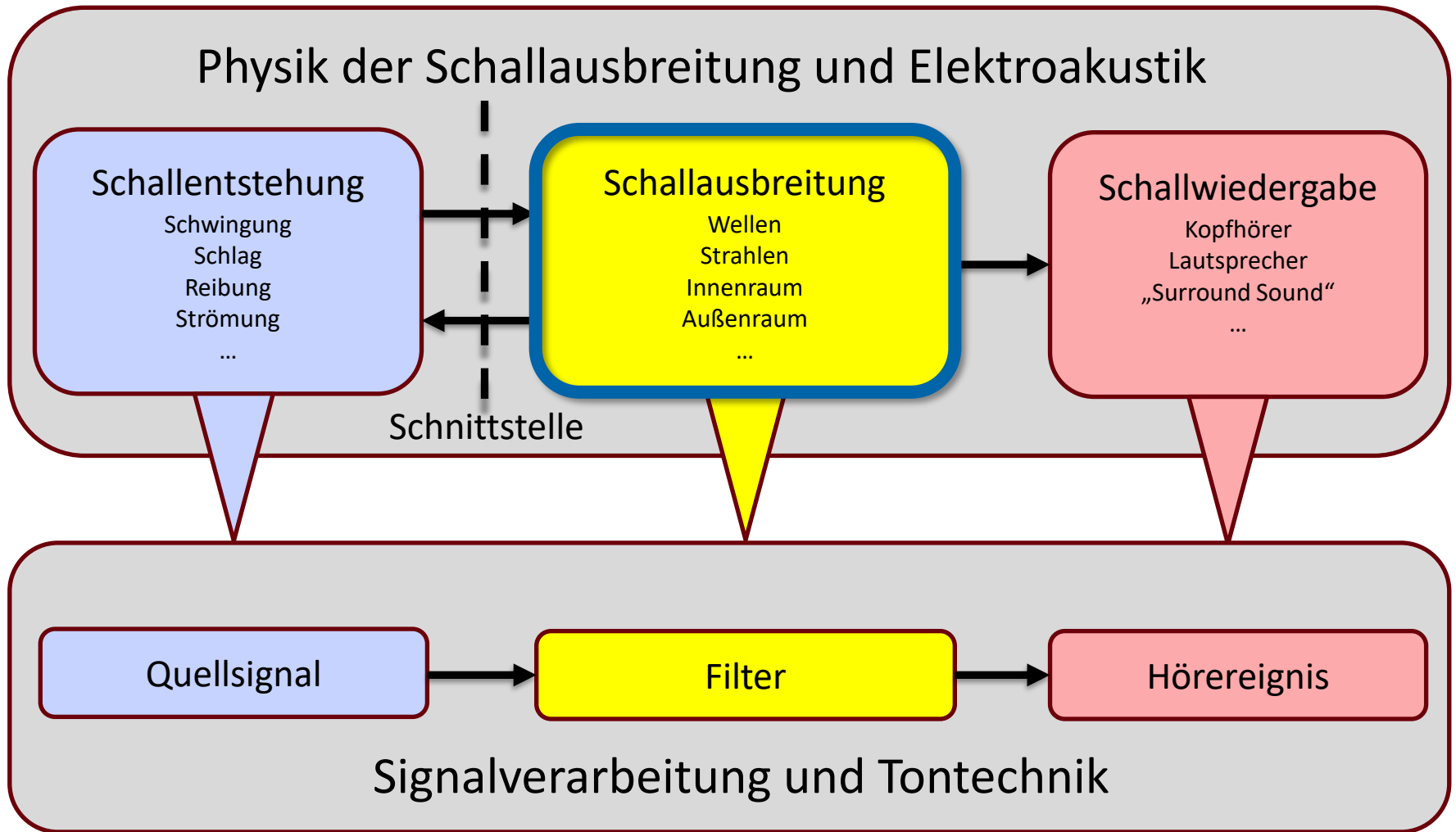
... Hörexperimente



Übersicht

- Einleitung
- Simulationsalgorithmen: Quellen und Ausbreitung
- Signalverarbeitung im Quelle-Filter-Modell
- Virtuelle Akustik
- Beispiele: Auralisation von Innenräumen und Außenräumen
- Schlussfolgerungen und Ausblick

Auralisation - von Daten zum Schall



Stand der Technik der Schallausbreitungsberechnung

- „Exakte“ Lösung der Wellengleichung
 - Helmholtz-Gleichung + Randbedingungen
 - Numerische Methoden
 - Frequenzbereich \rightarrow IFFT \rightarrow Zeitbereich
 - oder direkt im Zeitbereich BE/FE or FDTD
- Geometrische Akustik (Näherungen)
 - Spiegelschallquellen, Beugung
 - Strahlverfolgung
 - Radiosity
 - Diffusionsgleichung



Schallausbreitungsberechnung

Raumakustik

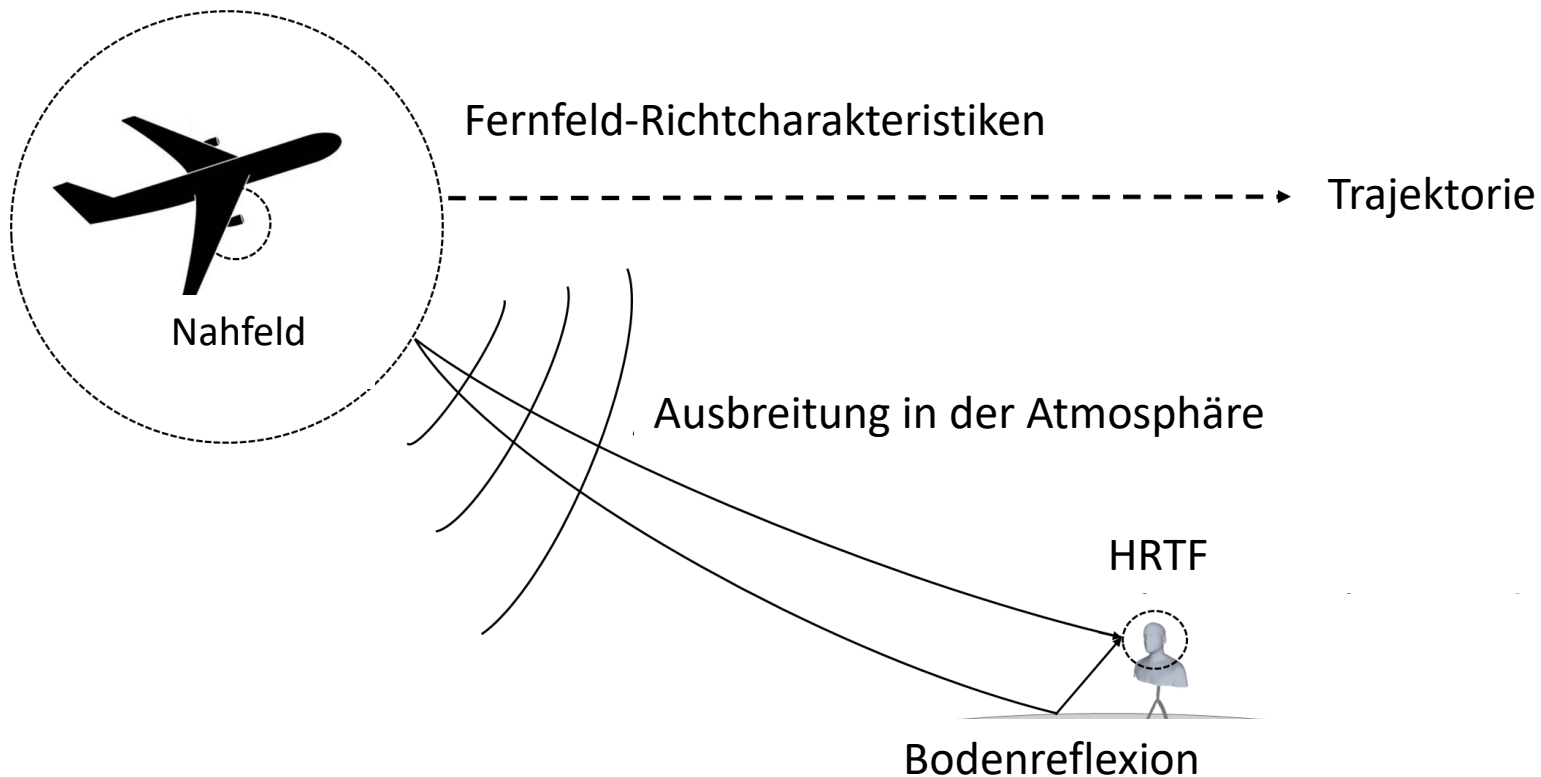
✓ (falls man gute Materialdaten hat)

Schallausbreitung im Freien

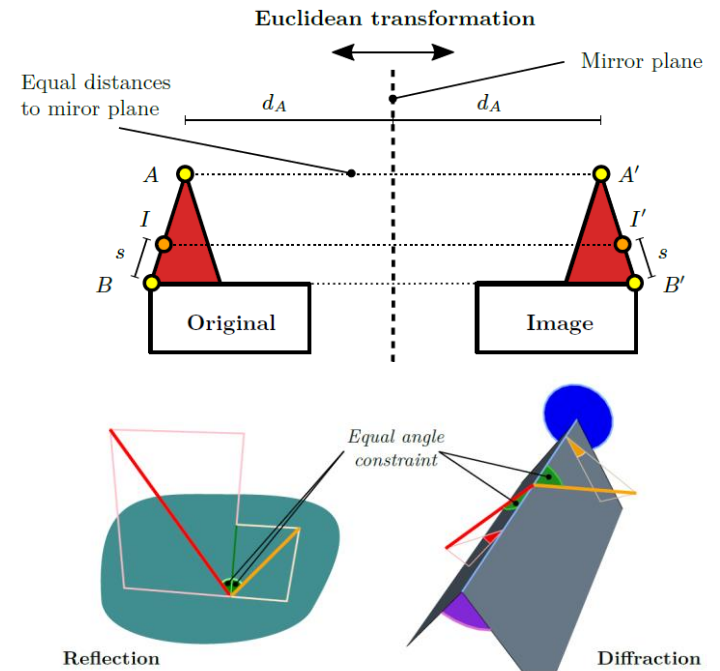
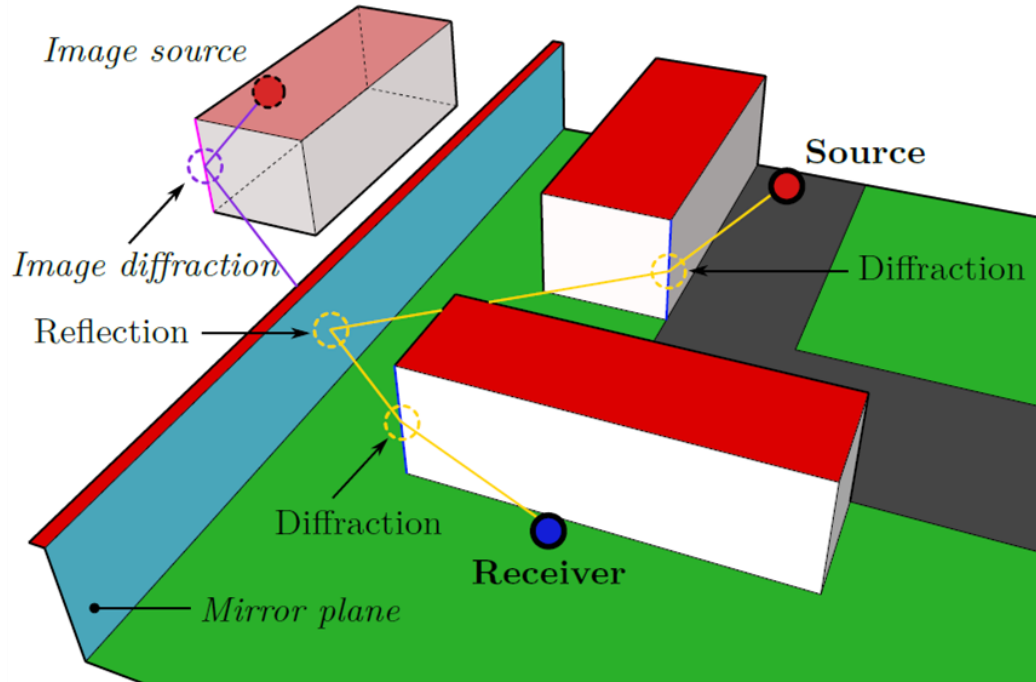
?

Schallausbreitung für bewegte Quellen in der Atmosphäre

- Rendering akustischer Szenen basierend auf numerischen Daten (simuliert, gemessen, synthetisiert)
- Variablen der Ausbreitung: Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Wind



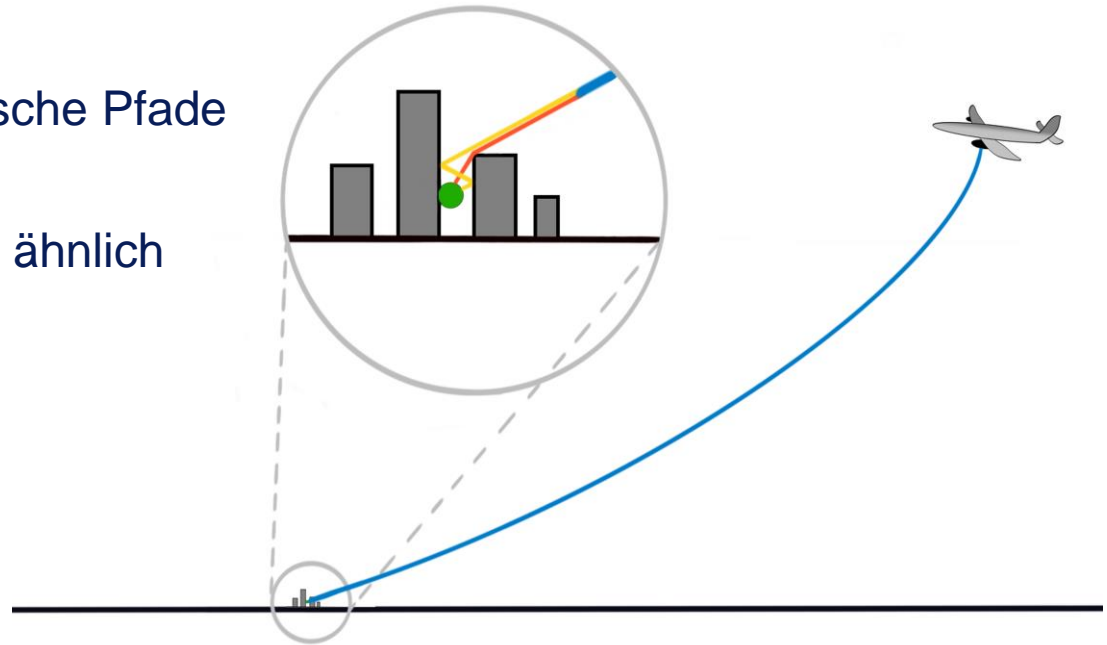
Schallausbreitung in urbanen Gebieten



aus: Erraj et al., The image edge model. Acta Acustica united with Acustica, 2021

Kombination von Atmosphärenmodell und urbanem Modell

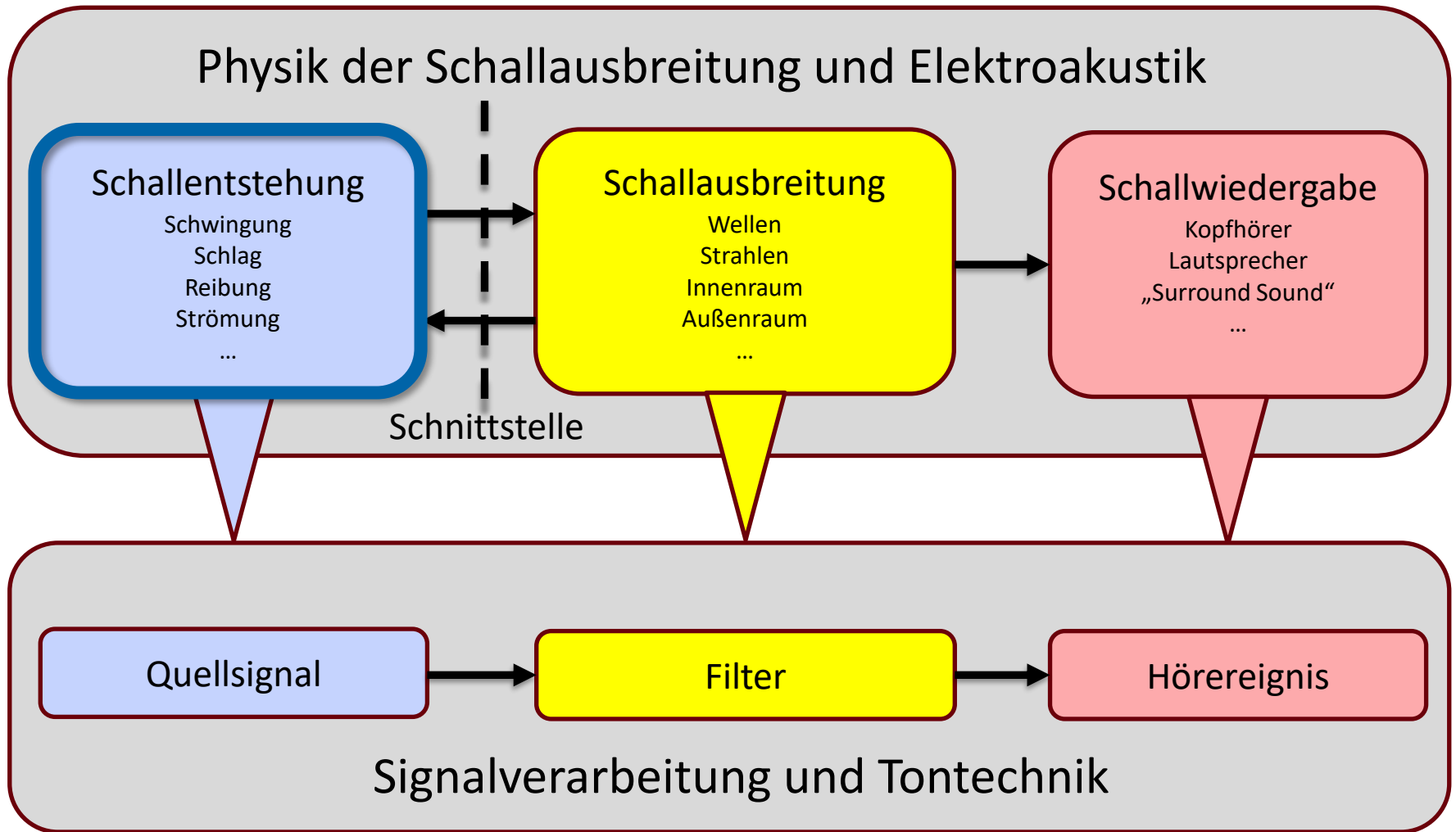
- Abstand Flugzeug-Stadt » Gebäudeabmessungen
- Urbane Pfade « atmosphärische Pfade
- Atmosphärische Effekte sind ähnlich für alle Pfade
- Effekte im urbanen Raum
 - Reflexion
 - Streuung
 - Beugung



Hörbeispiel folgt...

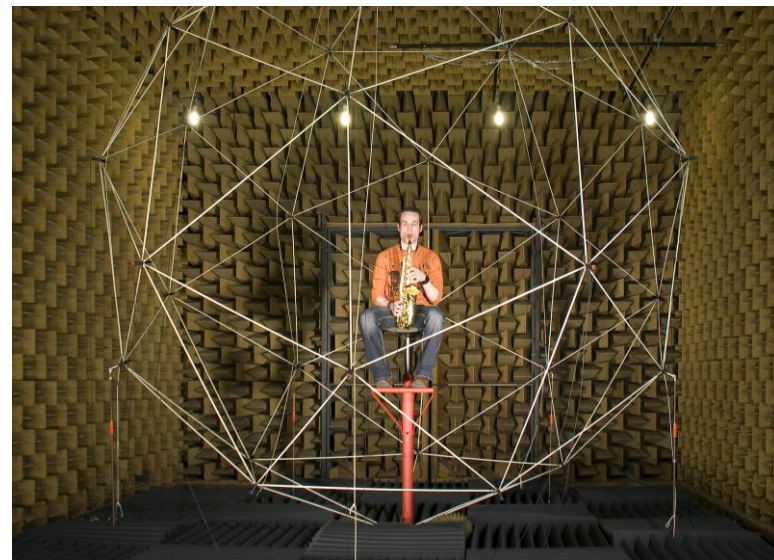
Aus: Schäfer et al., Linking atmospheric and urban auralization model. Acta Acustica united with Acustica, 2022

Auralisation - von Daten zum Schall



Messung / Aufnahme- in 3D!

- Meyer
- Weinreich
- Zotter
- Rindel&Otondo
- Lokki
- Behler, Weinzierl
- Leishman



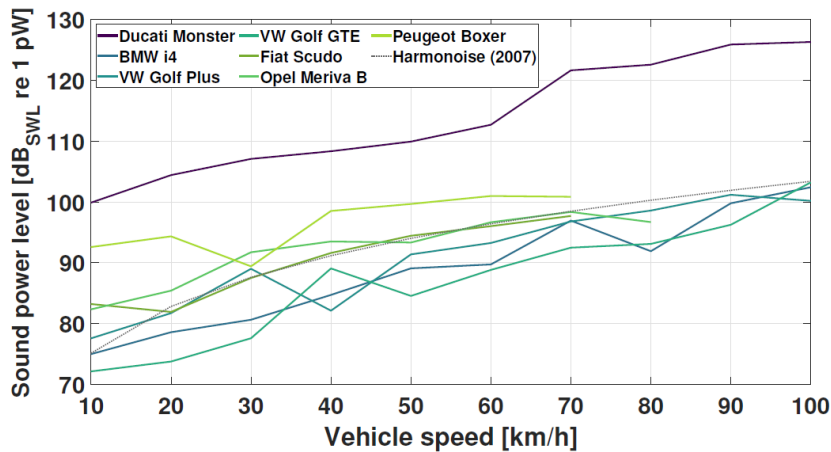
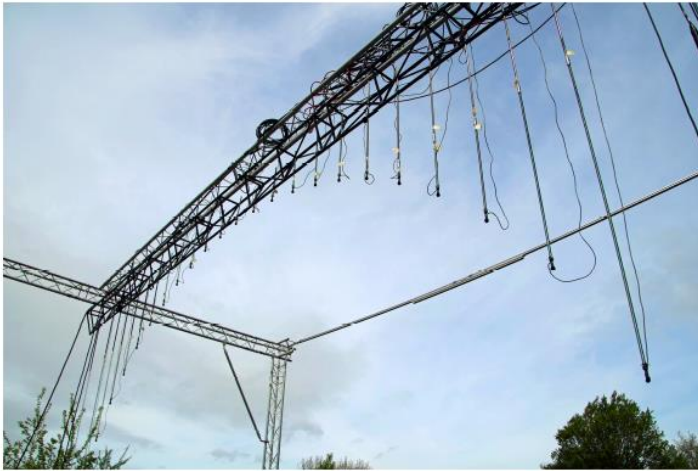
Quellcharakterisierung

- Schallquellen im Außenraum:
 - Autos, Motorräder, Lastwagen, Züge, Flugzeuge, Transformatoren, Lüfter, Kompressoren, Windräder, ????

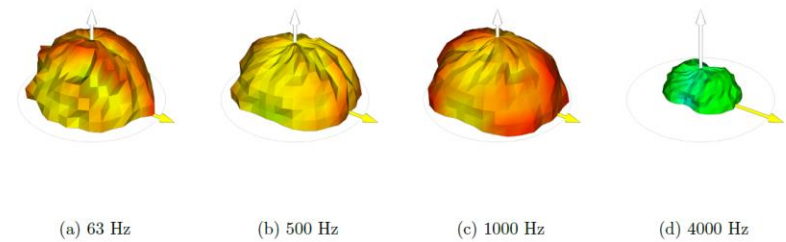
→ Probleme: Nahfeld / Fernfeld / Schwingungen.
- Vibroakustische Quellen:
 - Trittschall, Gehschall, Maschinen, Installationsgeräusche, Körperschallquellen an leichten Strukturen, ????

→ Probleme: Impedanzkopplung, Freiheitsgrade.

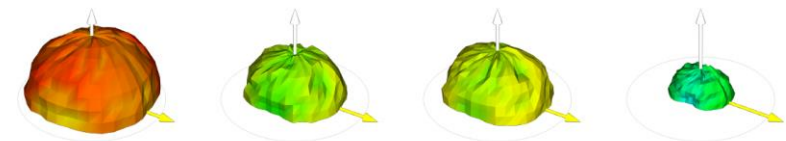
Straßenfahrzeuge (nur 1 Beispiel)



Electric drivetrain at speed of 50 km/h



ICE drivetrain at speed of 50 km/h



Dreier, C. et al. (2025) Speed-dependent directivity patterns of road-traffic vehicles. JASA (in review)

Bahn (nur 1 Beispiel)

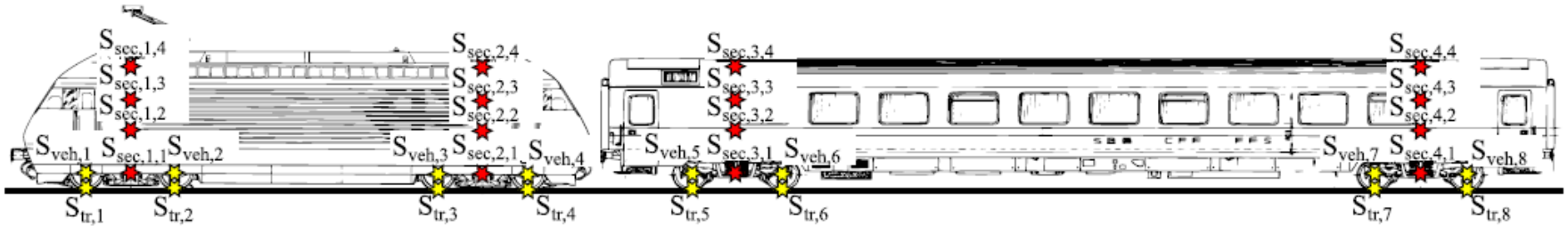


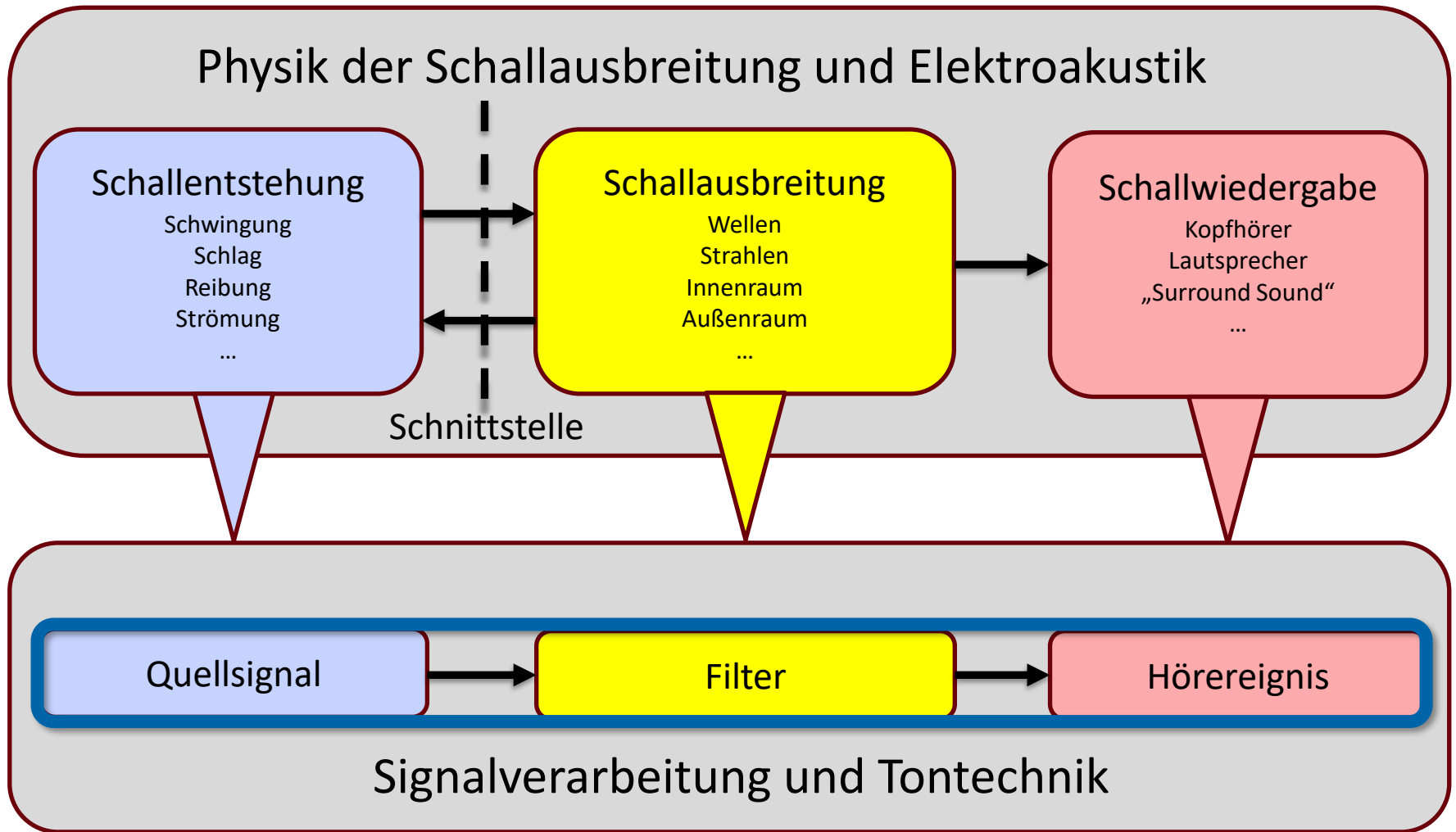
Figure 5.1: Example of equivalent point source locations marked by colored stars along two Swiss rail vehicles of type SBB Re 460 and Bpm RIC.

Pieren, R. (2018) Auralization of Environmental Acoustics Sceneries - Synthesis of road traffic, railway and wind turbine noise. PhD dissertation, TU Delft, NL

→ Charakterisierung von technischen Schallquellen der Umweltakustik

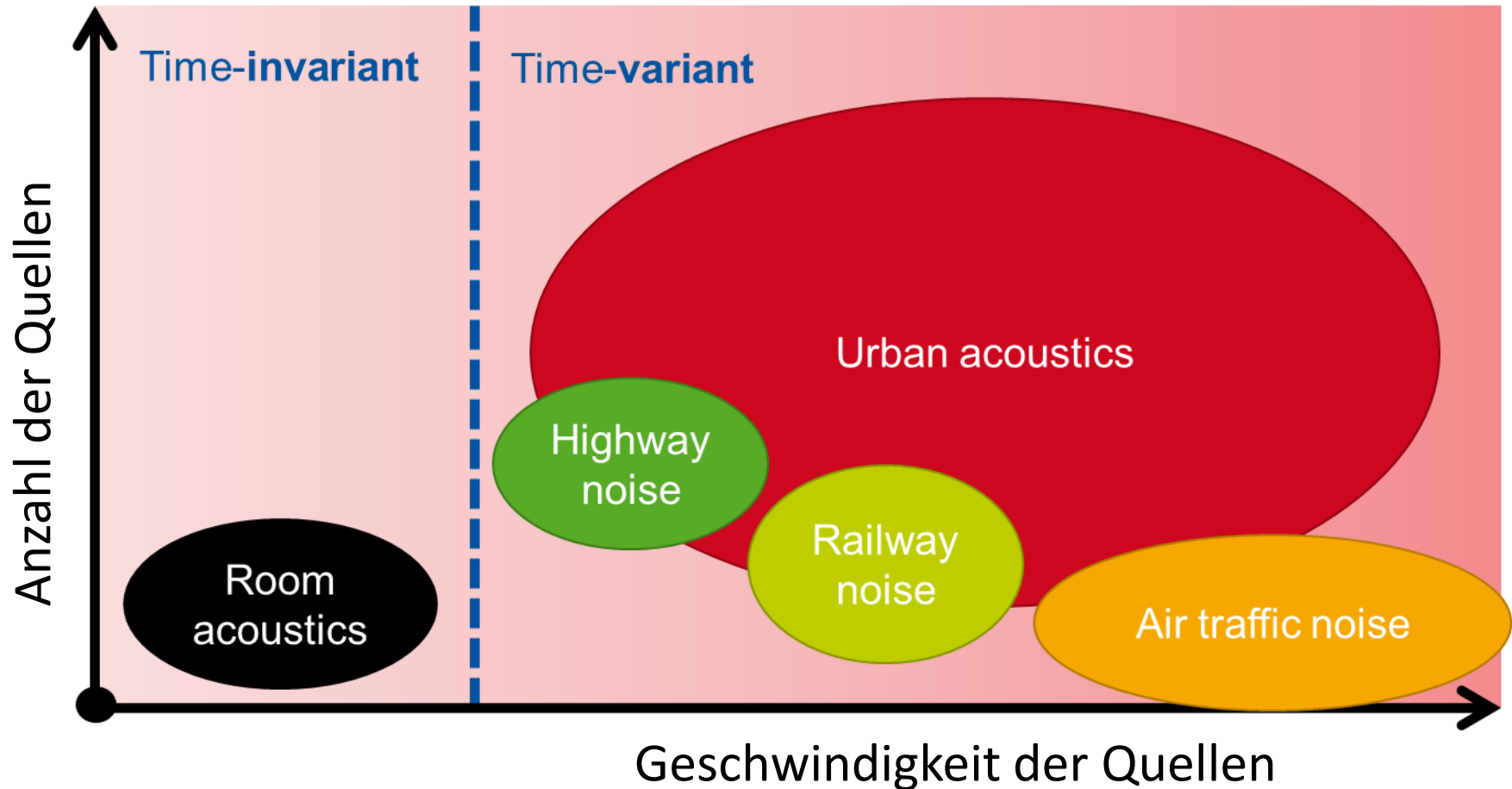
<https://www.empa.ch/web/s509/sound-generation-of-environmental-noise-sources>

Auralisation - von Daten zum Schall



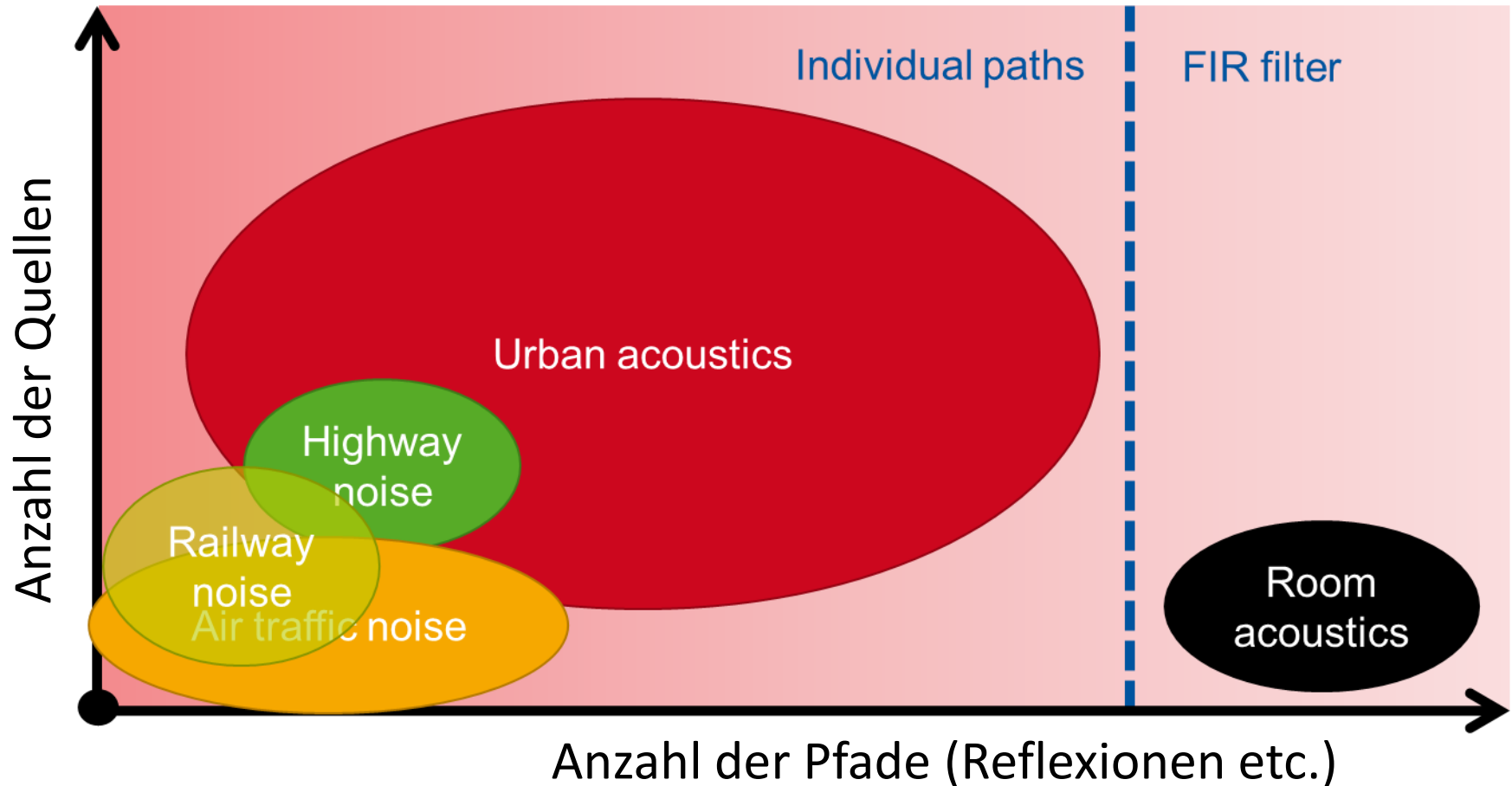
Auralisation - Filterentwurf für Innen- und Außenräume

Kategorien der Auralisation



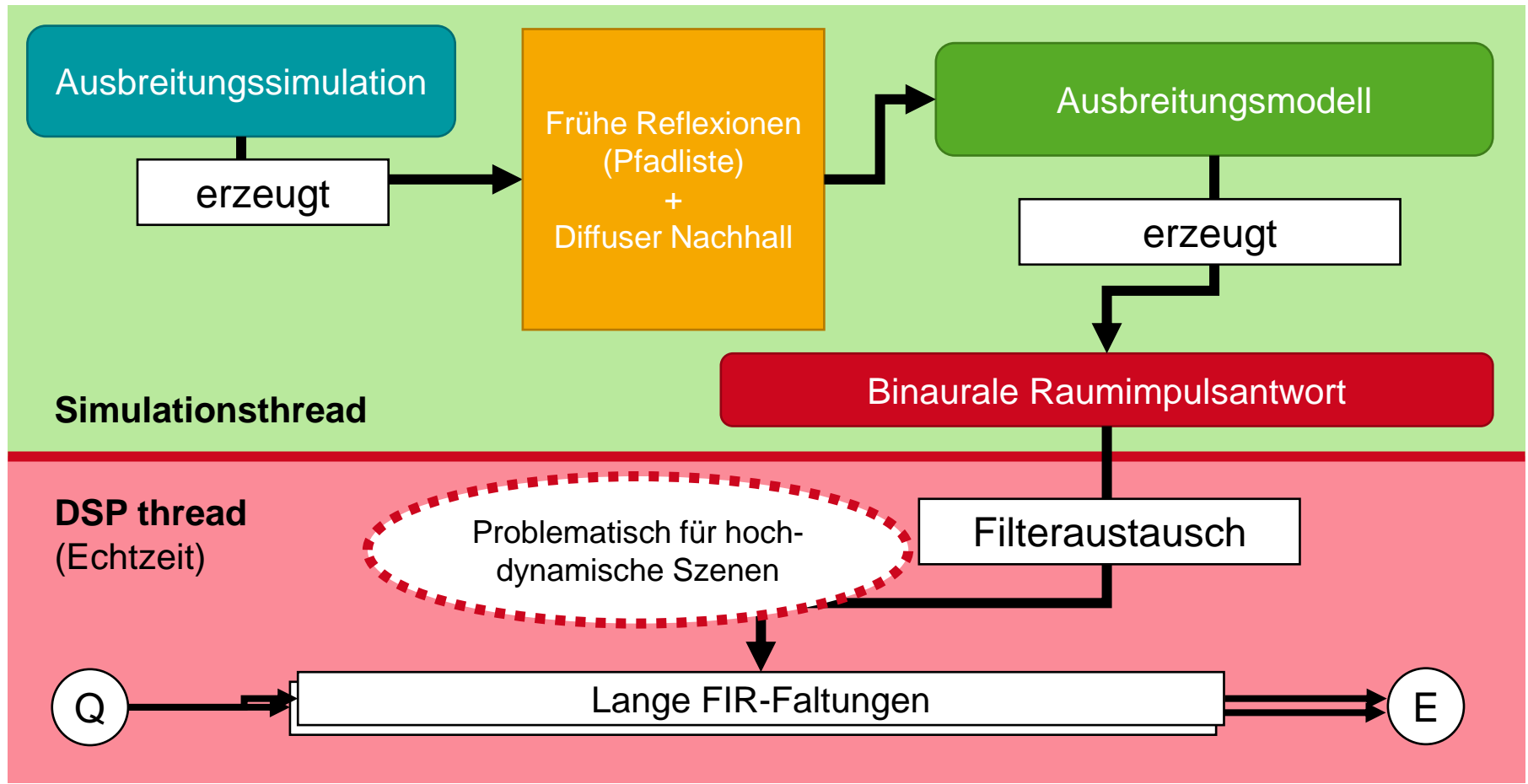
Auralisation - Filterentwurf für Innen- und Außenräume

Kategorien der Auralisation



Digitale Signalverarbeitung

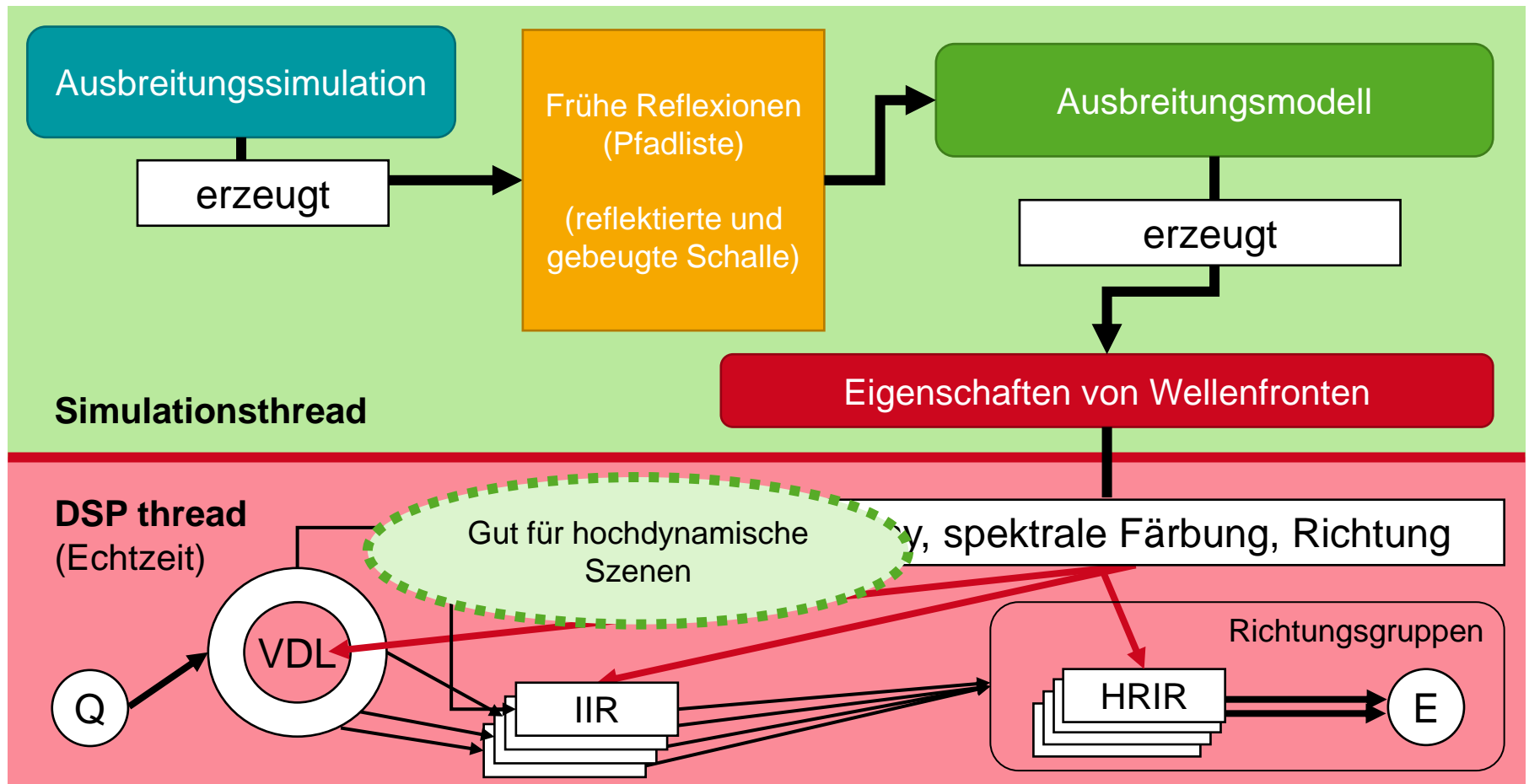
Kontext: Binaurale Raumakustik



FIR = Finite Impulse Response

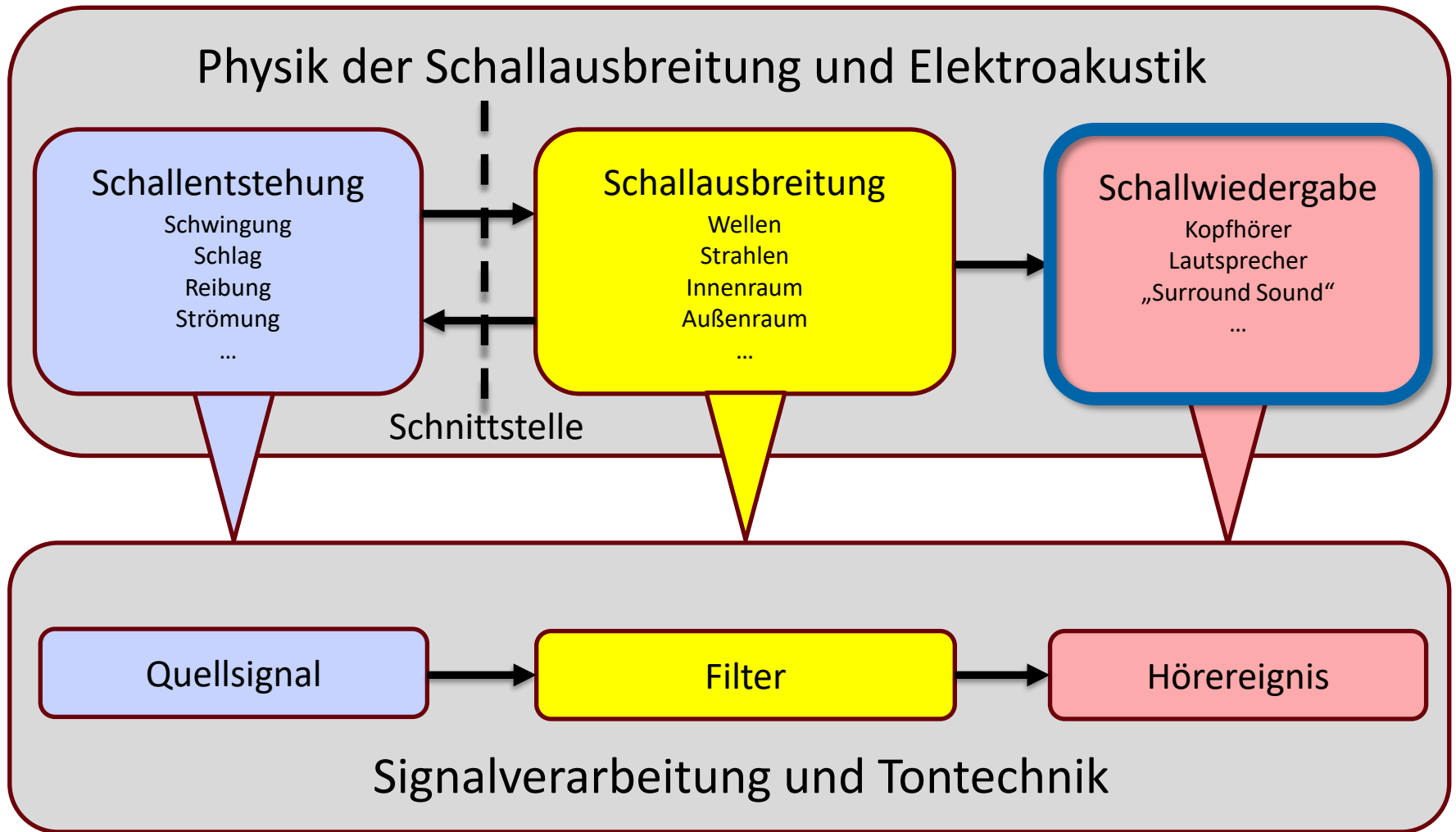
Digital signal processing

Kontext: Binaurale Stadtakustik

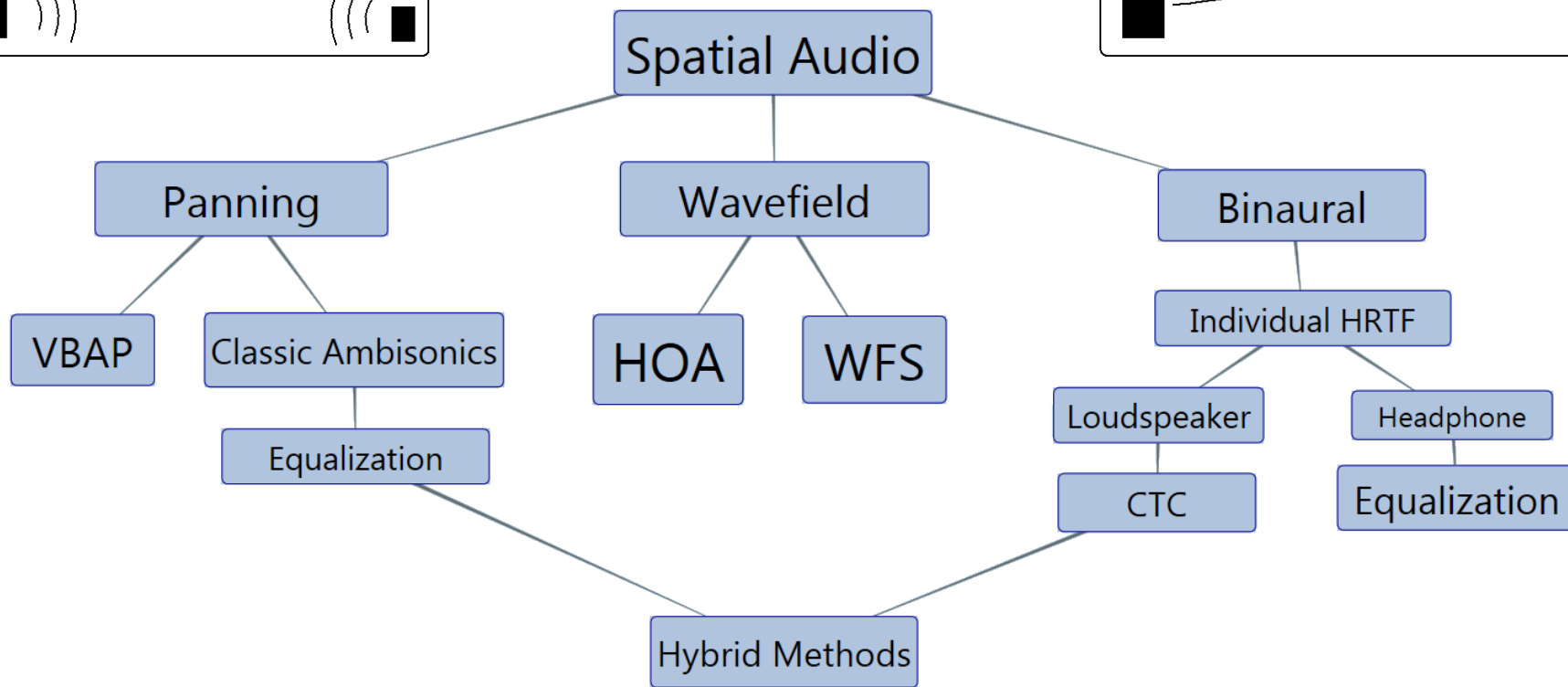
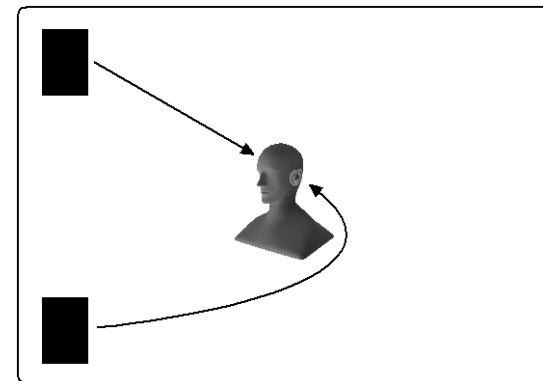
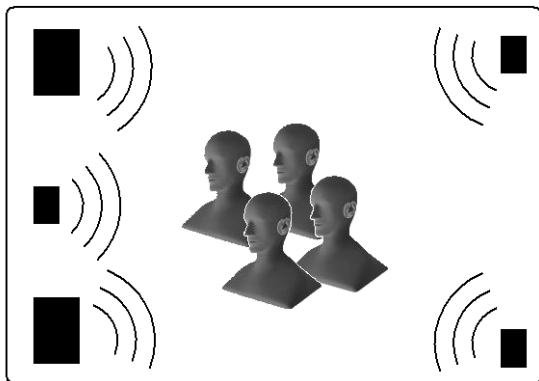


IIR = Infinite Impulse Response
VDL = Variable Delay Line

Auralisation - von Daten zum Schall

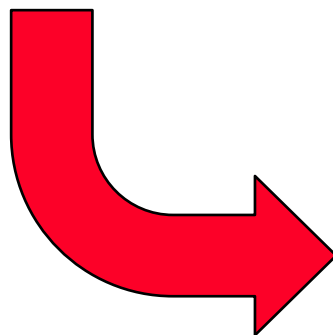


Wiedergabetechniken (3D)



Alles integrieren - und sehr schnell laufen lassen

Quellen
Akustische Simulation
Signalverarbeitung
3D-Wiedergabe



Akustische Virtuelle Realität

Echtzeit
Multimodalität
Interaktion

Was ist „Virtuelle Realität“?

Intuitive, **dreidimensionale** Schnittstelle, Immersion



**Virtuelle
Umgebung**

Multimodale Interaktion:

- visuell
- **akustisch**
- haptisch/taktil

Interaktion in **Echtzeit**:

- Navigation
- Manipulation
- Typisch: max. 50 ms Latenz

Was ist „Echtzeit“?

- Welche Dynamik/Interaktion ist überhaupt erforderlich?
- Steuern die Benutzer die Quellen in der Szene oder sind die Quellen „vorprogrammiert“?
- Verändern die Benutzer die Szene?
- Bewegen sich die Benutzer? Wie?

→ Auf all diese Eingriffe in die Auralisation muss das System in Echtzeit reagieren.

- „Echtzeit“: Typischerweise mit Latenzen von maximal 50 ms

Anwendungsbeispiele

- **Raumakustik**

(stationäre Quelle, sehr viele Reflexionen (spezifisch relevant), Empfänger kann den Kopf drehen) → FIR-Filter, HOA oder binaural adaptiv

- **Soundscapes**

(bewegte Quellen, wenige Reflexionen, Empfänger kann sich bewegen) → VDL-Filter, Szenenmanagement notwendig (z.B. “Game Engine”)

- **Schalldämmung**

(stationäre Quelle, relative glatte Dämmungskurve (spezifisch relevant), Diffusschall nur pauschal relevant, Empfänger kann den Kopf drehen) → FIR-Filter, binaural adaptiv

- **Fahr- und Flugsimulator**

(bewegte Quellen, Nutzer steuert die Quelle, relative glatte Übertragungsfunktionen (spezifisch relevant), Diffusschall nur pauschal relevant, Empfänger kann den Kopf drehen)

- **Hörforschung**

(variable Bedingungen je nach Fragestellung)

Kirchenakustik - Cluny



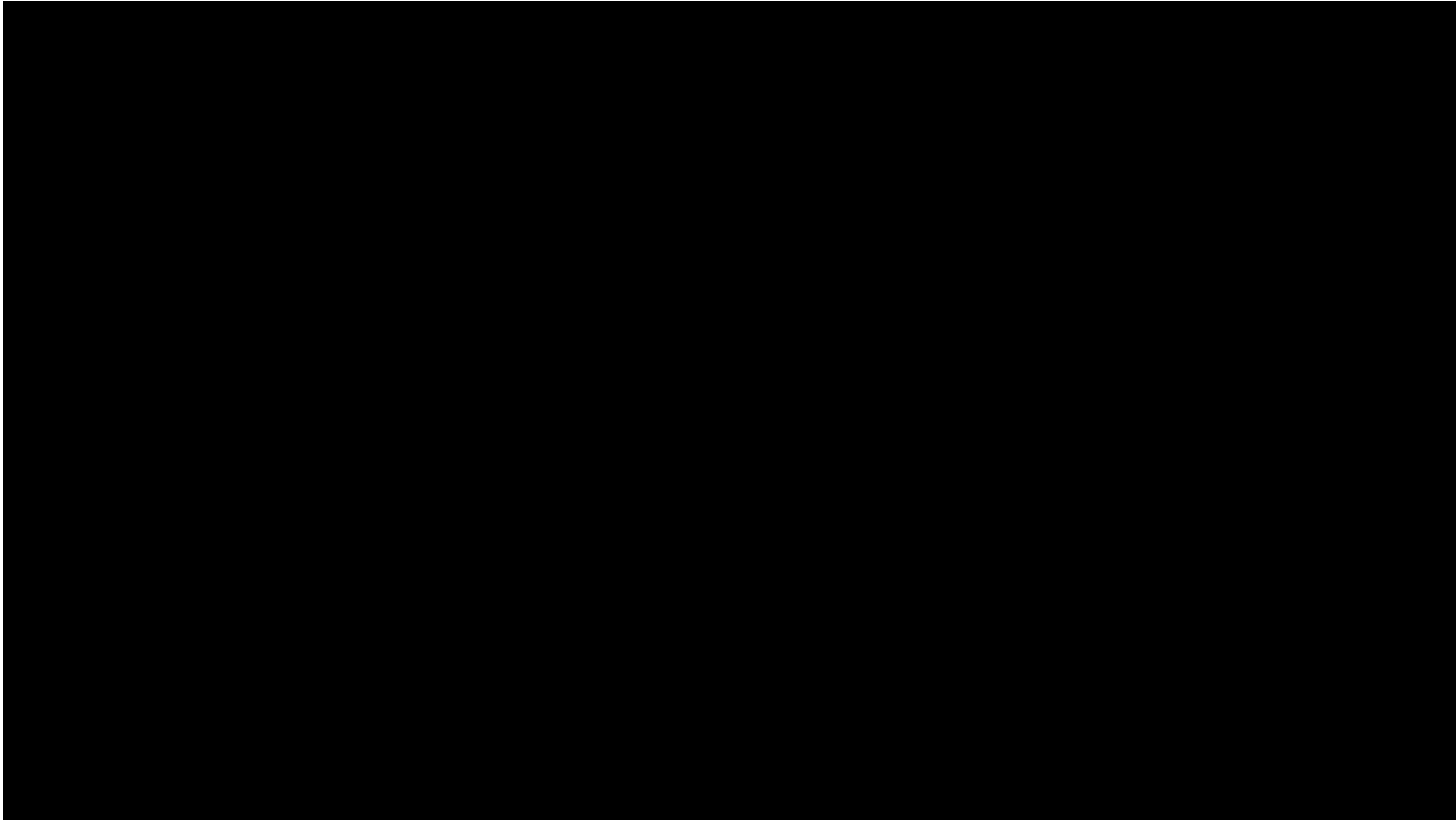
Dokumentation ARD

→ Mediathek
„SWR Cluny“

Klassenraumakustik (Sprachverstehen in Lärmumgebungen)

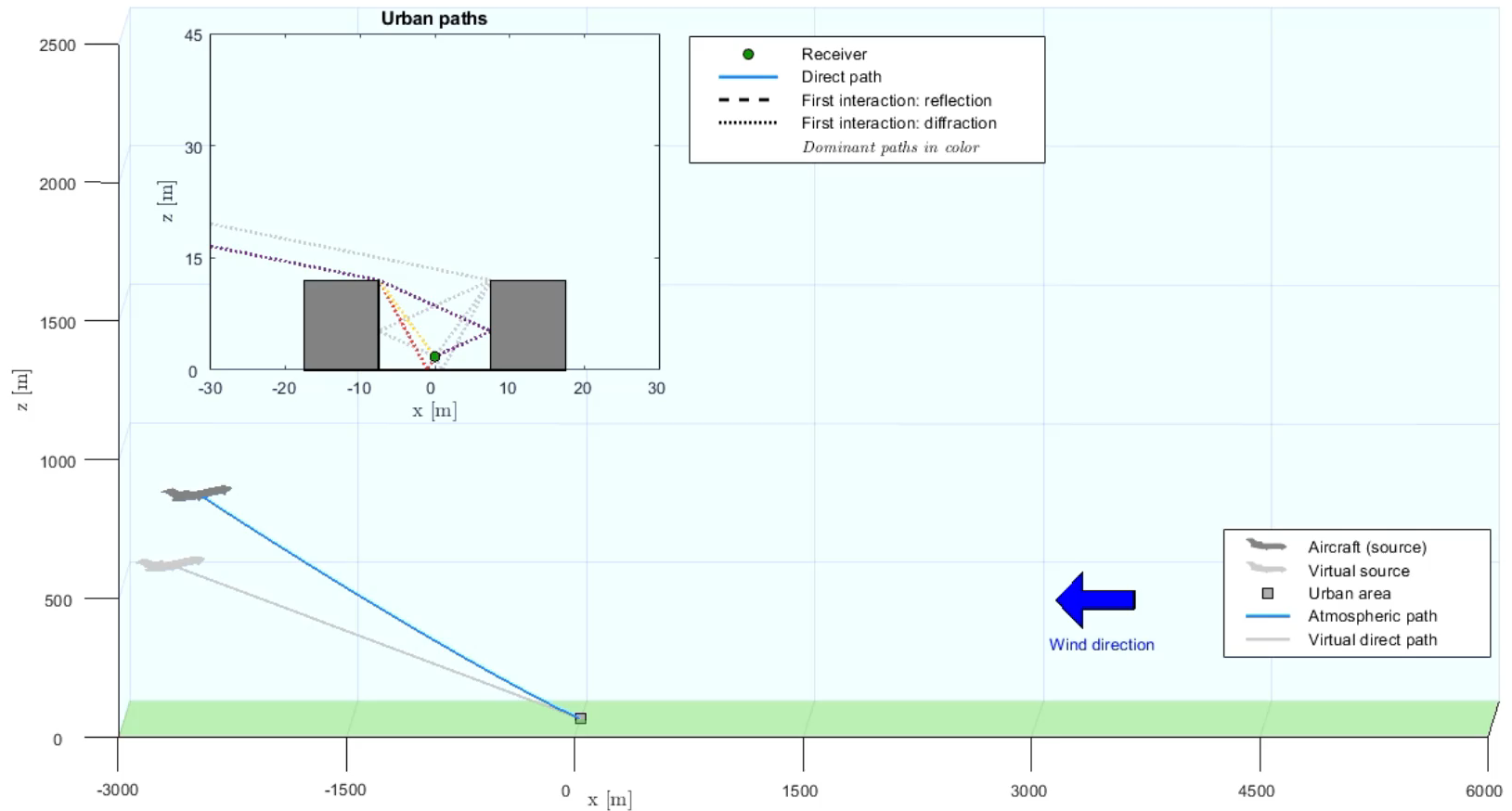


Soundscapes „IHTA-Park“



<https://youtu.be/rudxfV94UwA>

Flugzeugüberflug in einer Stadt



Ausblick: Anwendungen in Forschung und Praxis

- Arbeitsgang: CAD-Modell, Quellen, Ausbreitungsmodelle, Implementierung (falls audiovisuell: über Unity, Unreal, ect.), 3D-Audioschnittstelle.
- All das ist vorhanden. Aber leider nicht in Standardformaten.
- Herausforderungen:
 - Wir brauchen Standardformate für (akustische) Modelldaten
 - genauere Simulationen (auch Wellenmodelle)
 - Besseres 3D-Audio (Interaktion, Tracking, Echtzeit, ...)
 - Programmierung: Effizientere Integration von Simulation und Signalverarbeitung → komplexere Szenarien

ANWENDUNGSORIENTIERTE AURALISATION

Herzlichen Dank an:

Lukas Aspöck, Christian Dreier, Jonas Heck, Anne Heimes, Josep Llorca-Bofi, Pascal Palenda, Philipp Schäfer



mvo@akustik.rwth-aachen.de

Mehr Information/Demos:
www.akustik.rwth-aachen.de



Open Source: www.virtualacoustics.org
Open Access: RAVEN