

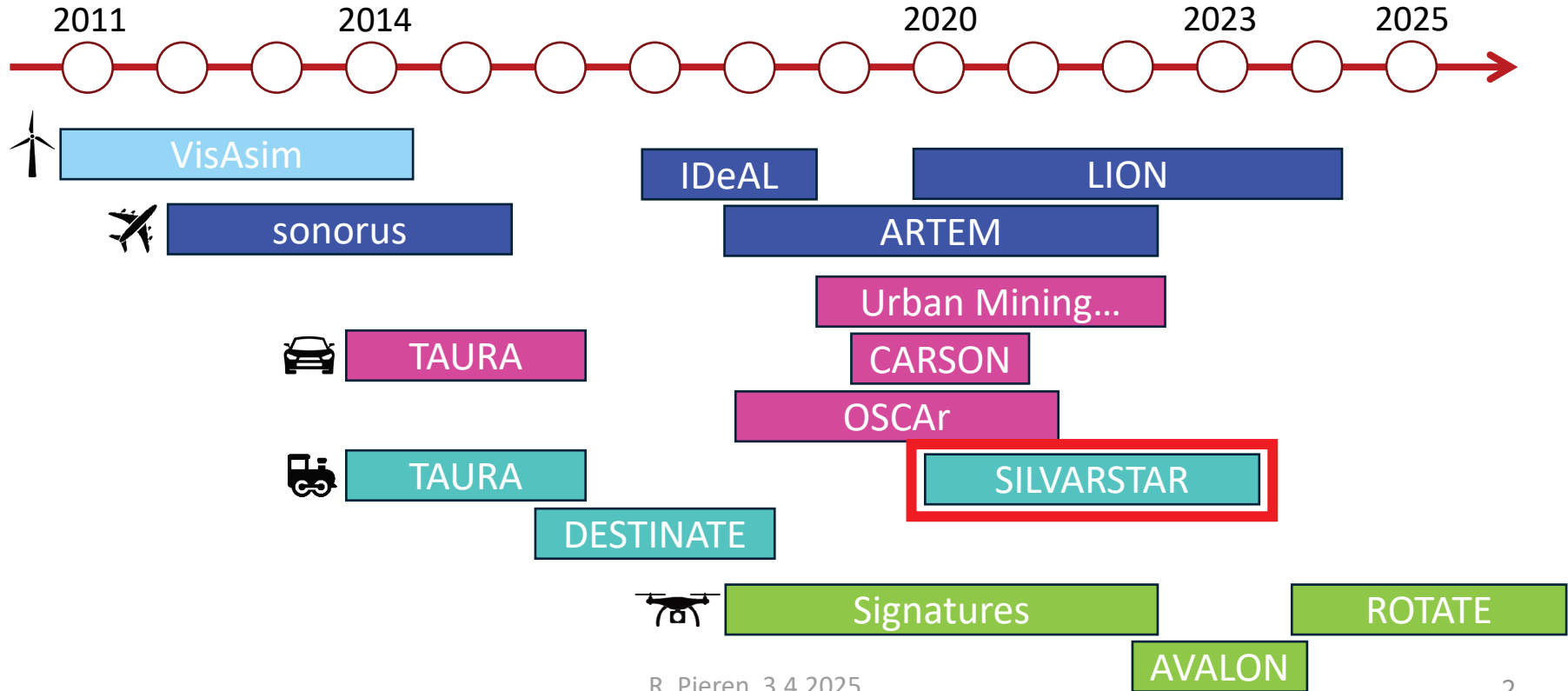


Physikbasierte Auralisierung von kombinierten Lärmschutzmassnahmen bei Bahnlärm

Reto Pieren

3. April 2025 – SGA-Tagung, Yverdon-les-Bains

Entwicklung von Auralisierungsmodellen der Umweltakustik an der Empa



Das SILVARSTAR-Forschungsprojekt



- **Ziel:** Entwicklung von Prognosewerkzeugen für den Bahnsektor
 - Workstream 1: Erschütterungen
 - Workstream 2: **Auralisierung** (Leitung Empa)

Soil Vibration and Auralisation Software Tools for Application in Railway (SILVARSTAR)

- Dauer: 2020-2022
- 6 Institutionen aus 5 Ländern
- Finanzierung: Shift2Rail / EU Horizon2020, 1 M€



Hauptmerkmale der neuen Auralisierungswerkzeuge



- immersive, interaktive, intuitive Bahnlärm-Demonstration
- Direktvergleich von Szenarien
- Simulation von kombinierten Lärmschutzmassnahmen
- Physik-basierte Synthese (keine Aufnahmen)
- benutzerfreundlich und verfügbar





Synthese von Zugsvorbeifahrten

Akustische Charakteristiken einer Zugvorbeifahrt



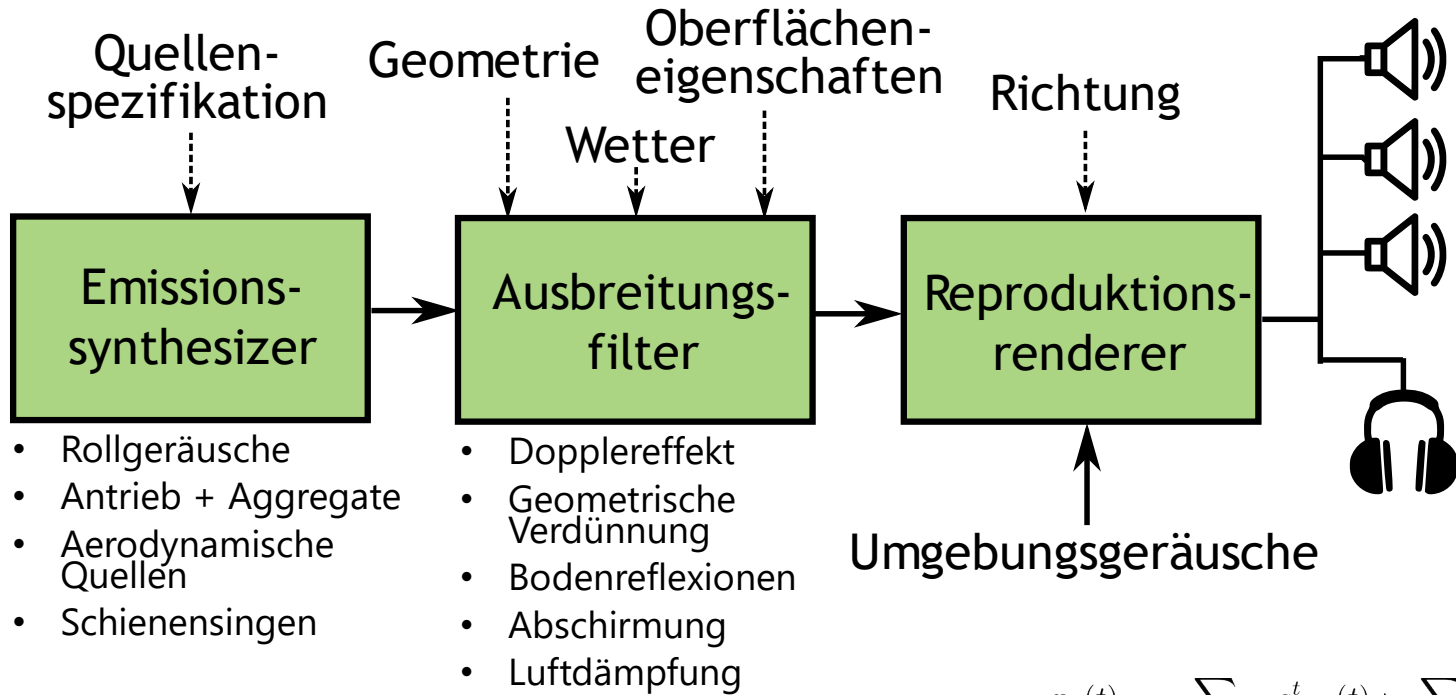
- Vielzahl unterschiedlicher Quellen
- ausgedehnte Quelle: lateral und vertikal
- spezielle Geräuschcharakteristiken (Rattern, metallischer Klang,...)
- wichtigste Quellen: Rollgeräusche abgestrahlt von Rädern und Schienen

Herausforderungen



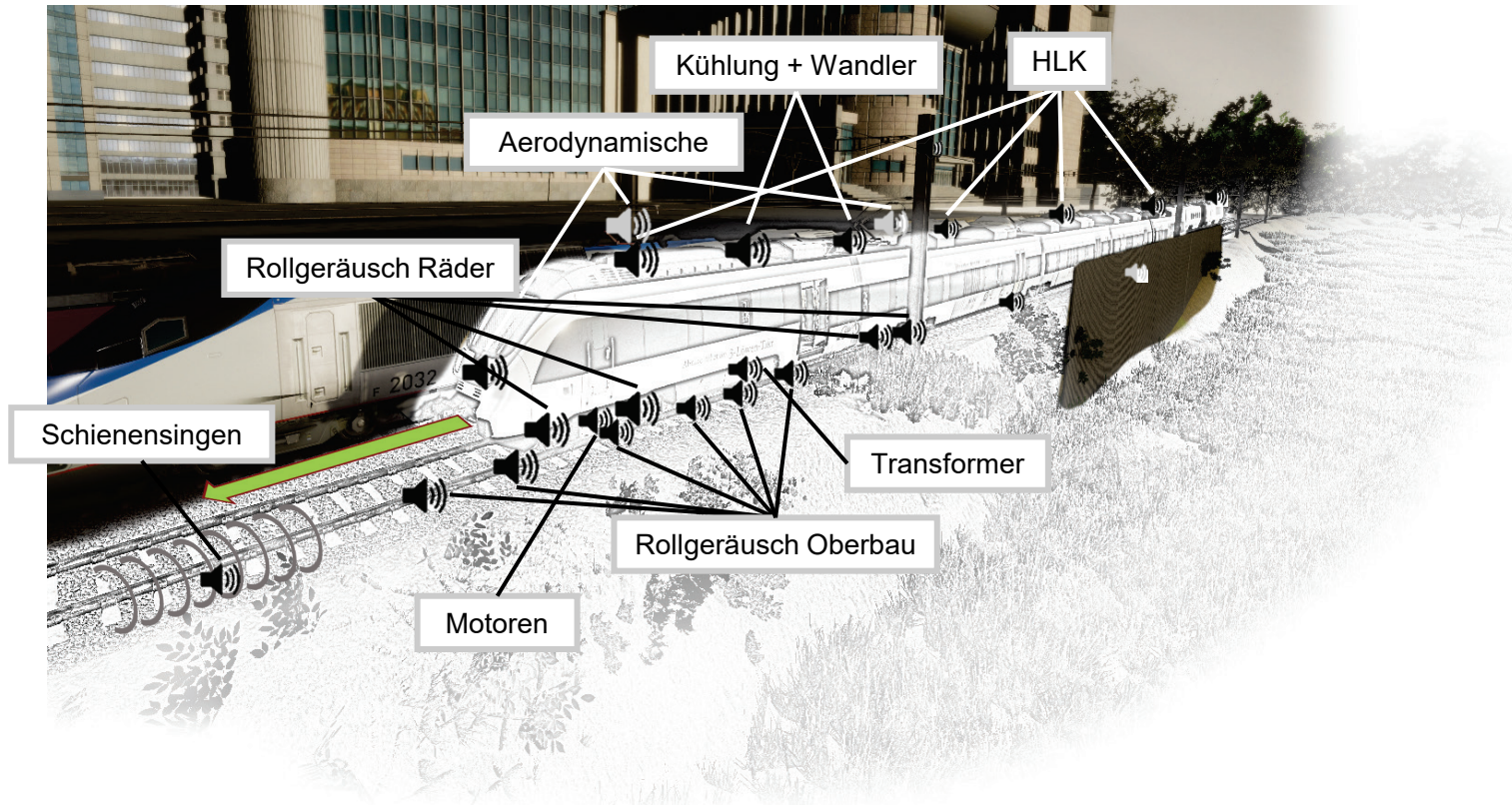
- physikbasierte Simulation: Zusammenspiel der Massnahmen nicht trivial
- Synthese von realistischen Geräuschen
- effiziente Berechnung: rechenintensiv, da viele Quellen

Auralisierungsmodell

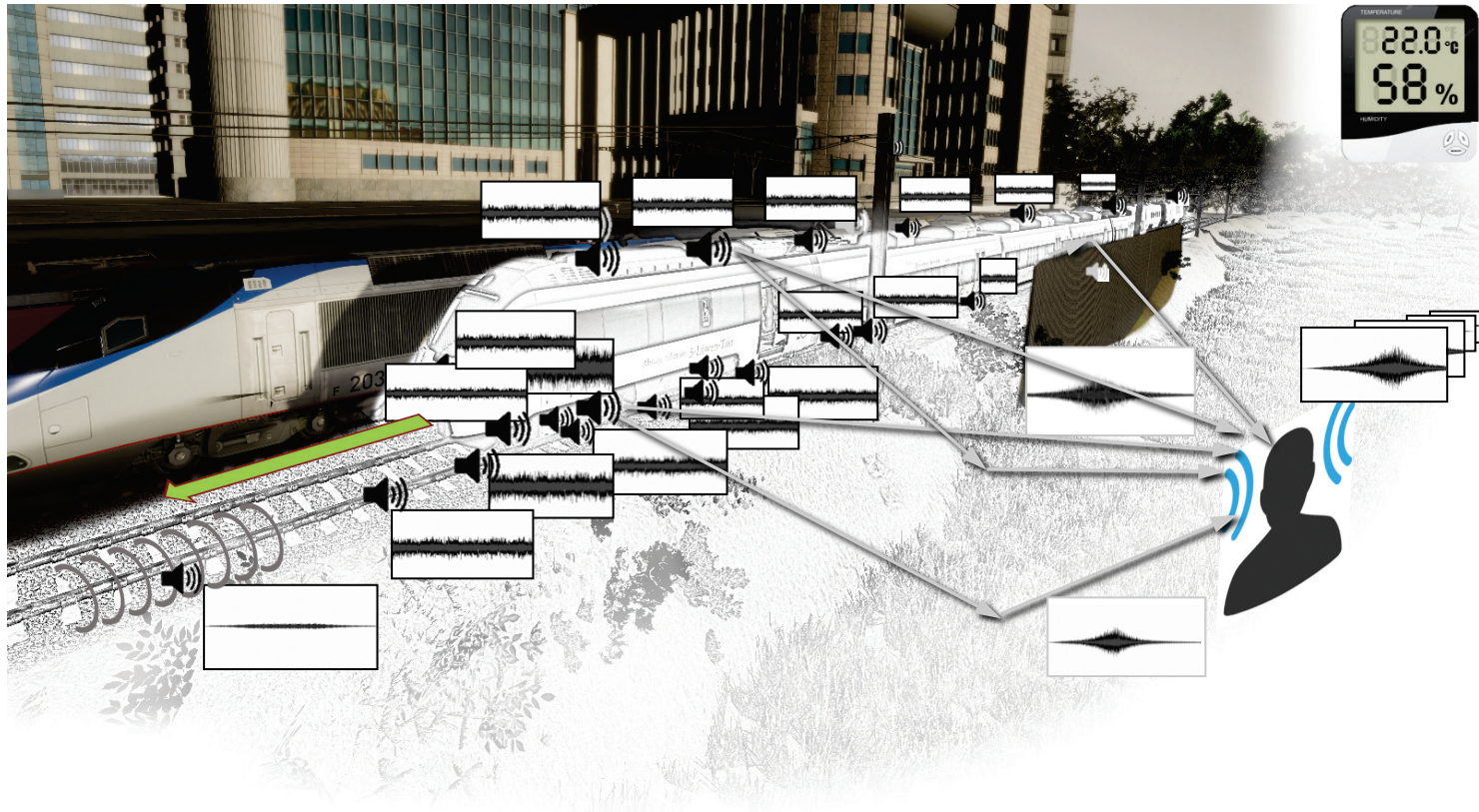


$$p_u(t) = \sum_{m \text{ Quellen}} g_{u,m}^t(t) * \sum_{n \text{ Pfade}} s_m(t) * h_{m,n}^t(t)$$

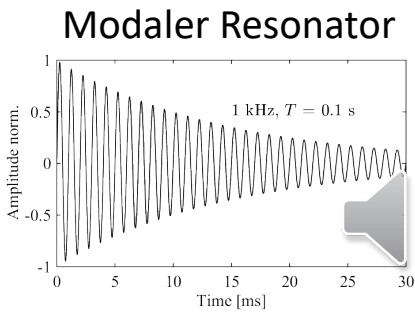
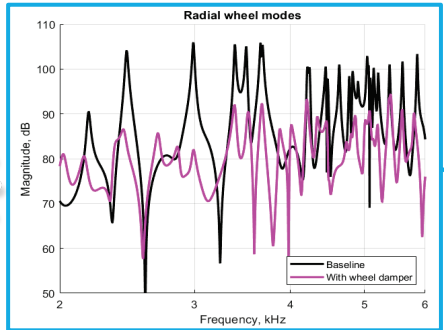
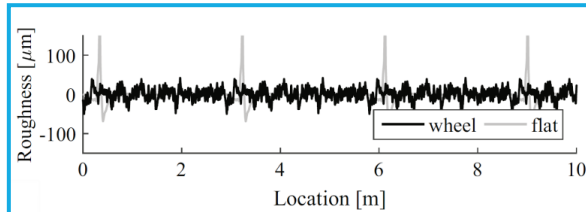
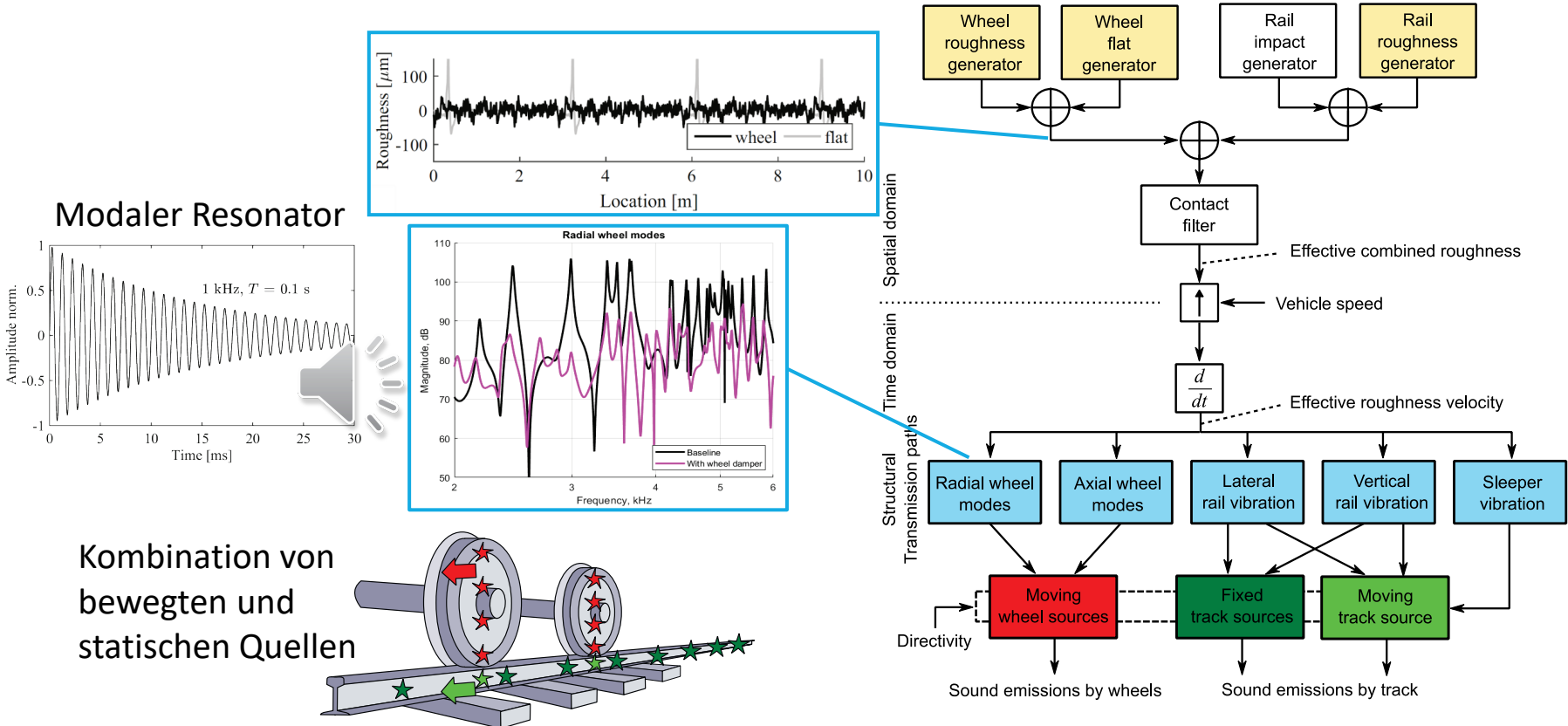
Auralisierungsmodell



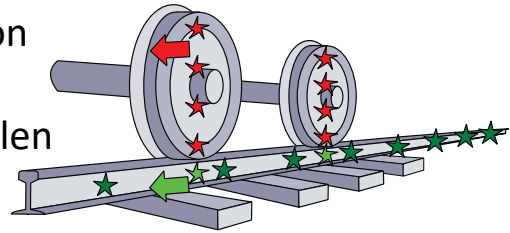
Auralisierungsmodell



Physik-basierte Synthese der Rollgeräusche



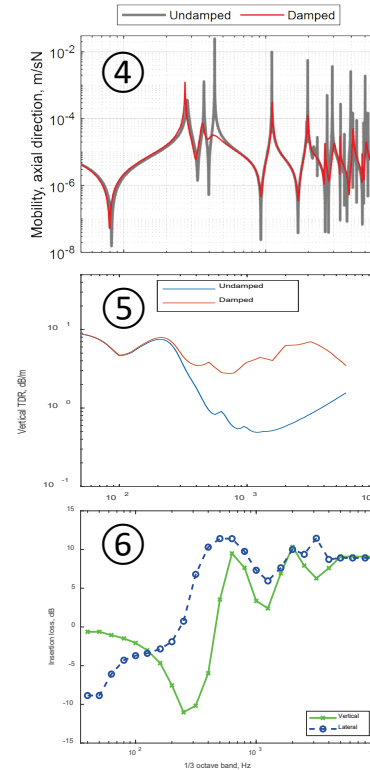
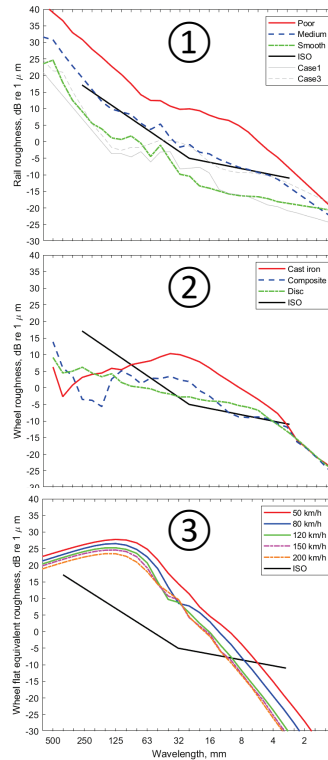
Kombination von bewegten und statischen Quellen



Simulation von Lärmschutzmassnahmen



- ① Schienenschleifen
- ② K-Bremsen
- ③ Vermeidung von Flachstellen
- ④ Raddämpfer
- ⑤ Schienendämpfer
- ⑥ Schienenschirme
- ⑦ Mini LSW
- ⑧ Lärmschutzwände (LSW)
- ⑨ Reduktion Sekundärquellen



Hörbeispiele: Einzelner Radsatz mit kombinierten Massnahmen



- ① Schienenschleifen
- ② K-Bremsen
- ③ Vermeidung von Flachstellen
- ④ Raddämpfer
- ⑤ Schienendämpfer
- ⑥ Schienenschirme
- ⑦ Mini LSW
- ⑧ Lärmschutzwände (LSW)
- ⑨ Reduktion Sekundärquellen

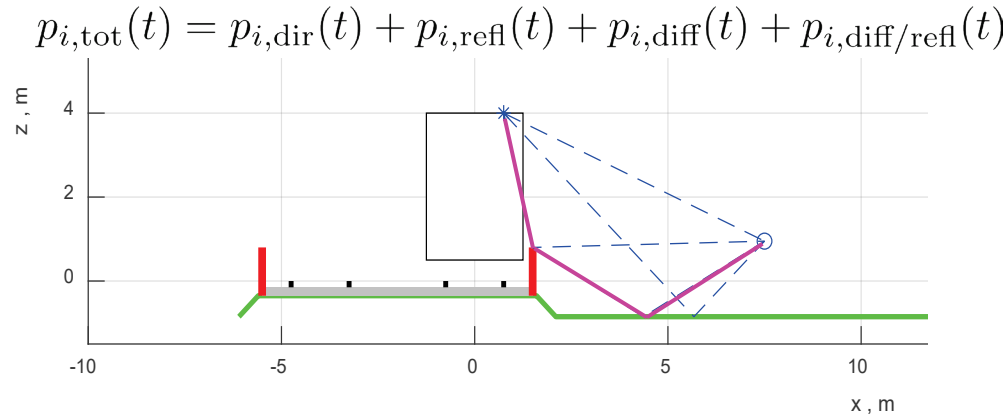
Referenz	
①	
① + ④	
① + ④ + ⑤	
Referenz - ③	

Radsatz mit Scheibenbremsen
120 km/h
Monoblock, harte Pads
10 m Distanz

Aspekte der Ausbreitungssimulation



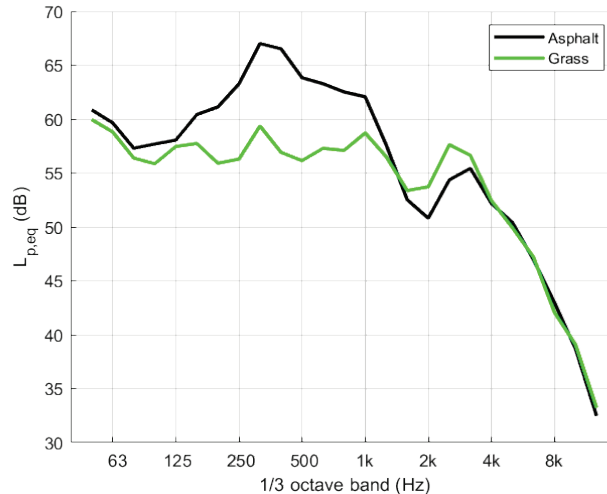
- Gleis in Dammlage → Einfluss auf Bodeneffekt
- Mini-Lärmschutzwände → partielle Abschirmung der Räder
- Kohärente Überlagerung von gebeugten, bodenreflektierten und kombinierten Schalldruckanteilen



Aspekte der Ausbreitungssimulation



- Berücksichtigung der Bodeneigenschaften (Oberflächenimpedanz)
 - Beispiel einer ganzen Zugs vorbeifahrt: schallhart vs. Gras



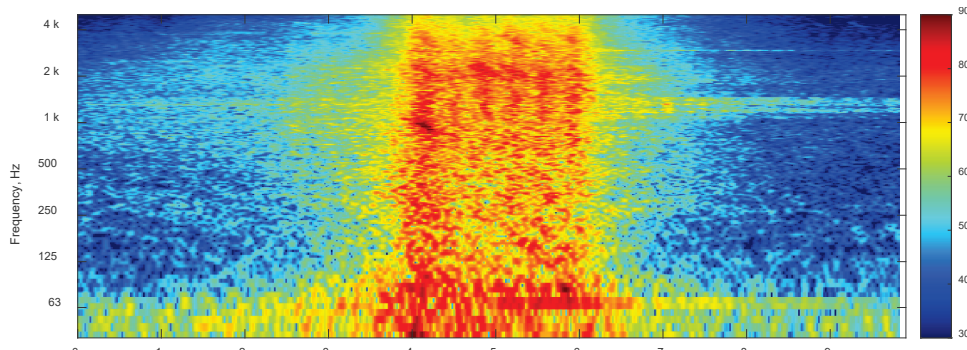
flacher Boden
Empfänger auf 1.65 m in 34 m Distanz

Validierung: Vergleich mit Aufnahmen

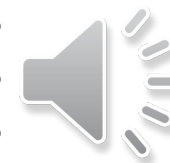
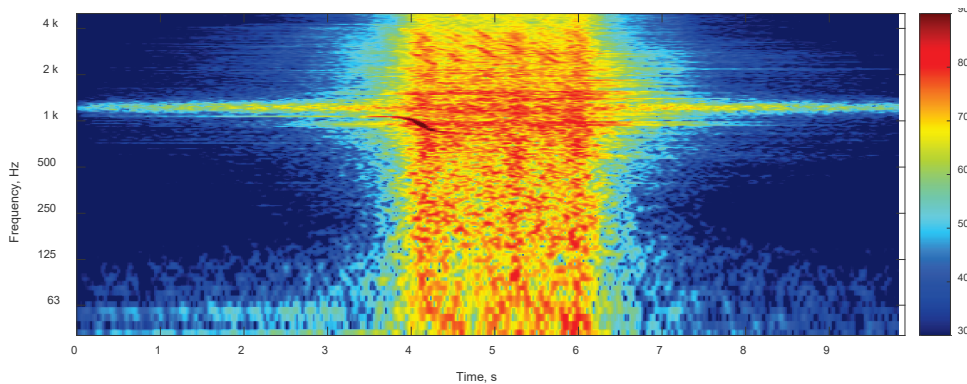


Regionalzug
160 km/h
7.5 m Abstand

Aufnahme



Synthese

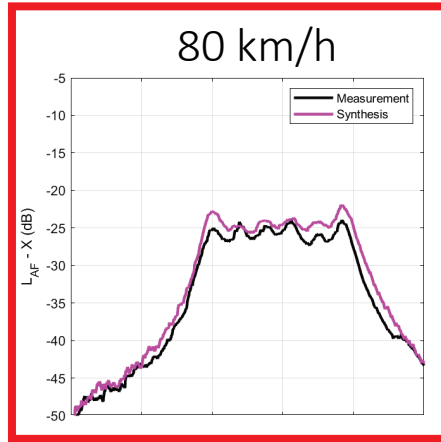


Validierung: Vergleich mit Aufnahmen

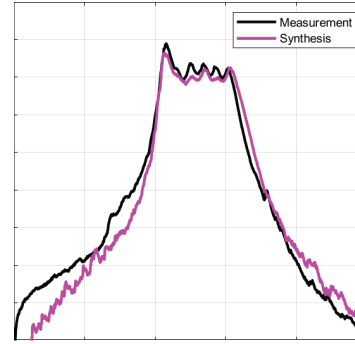


Regionalzug

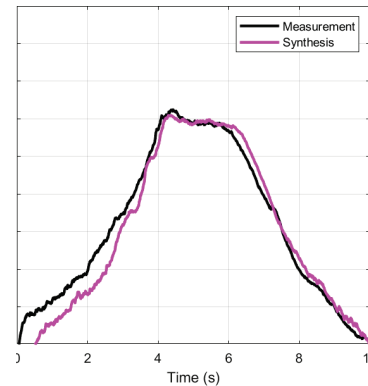
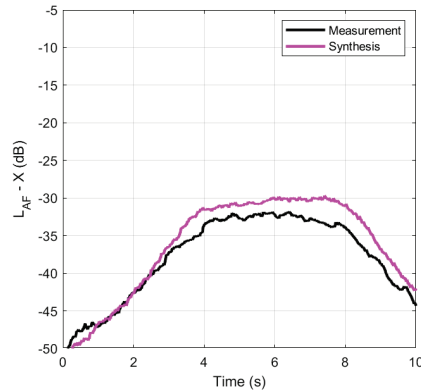
$D = 7.5 \text{ m}$



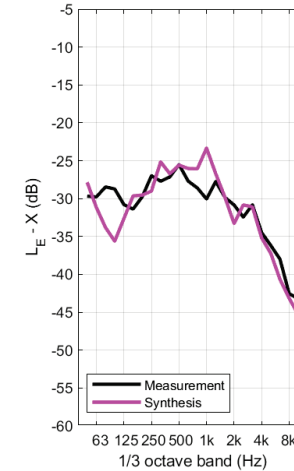
160 km/h



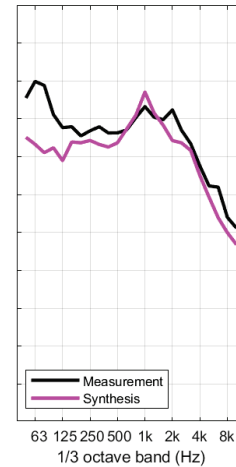
$D = 25 \text{ m}$



80 km/h



160 km/h



Hörbeispiele: Anteile der Teilschallquellen



Aufnahme



vs.

Synthese



= \sum

Schienen



Schwellen



Räder



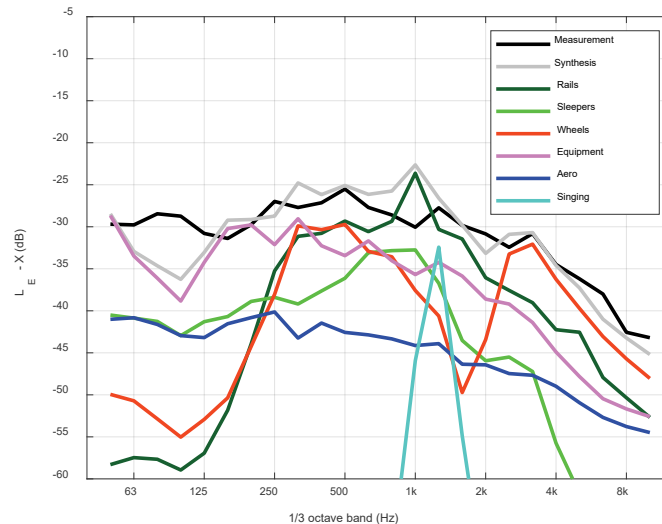
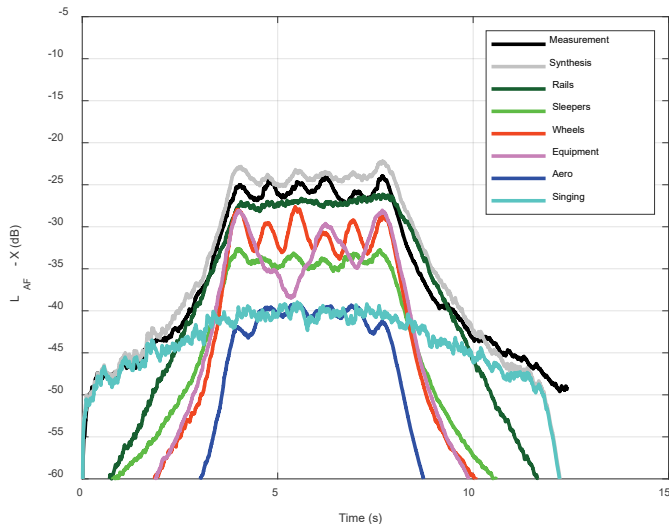
Aggregate



Aero



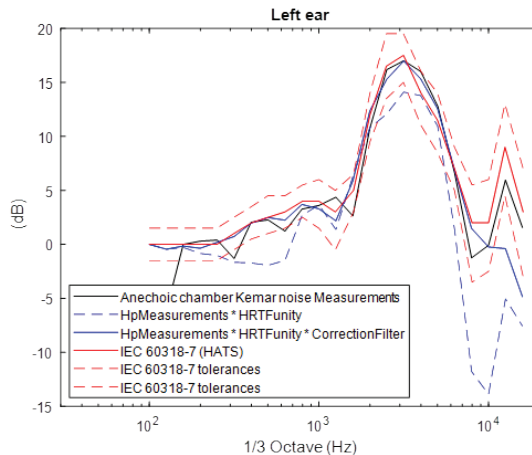
Schienen-singen



Reproduktion in VR-Umgebung



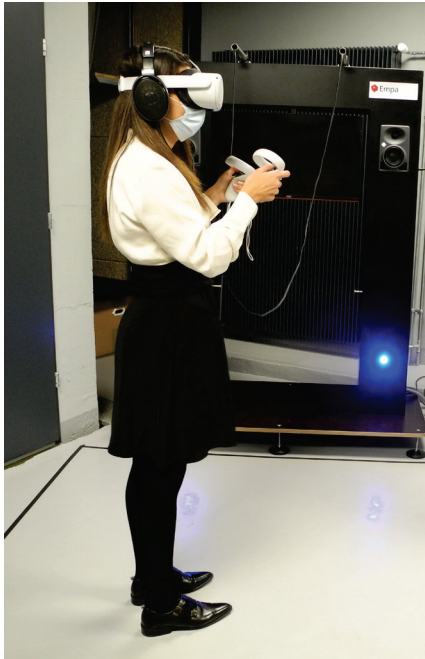
- Kalibration der Kopfhörerwiedergabe mit Labormessungen
 - Freifeld-Entzerrung des Kopfhörers
 - Freifeld-Entzerrung der generischen Kopfübertragungsfunktionen
 - korrekter Schalldruck am Ohr
- immersive und akkurate Wiedergabe



Interaktion in VR



- unmittelbares Wechseln zwischen Szenarien mit virtuellen Tastern





Bisherige Anwendungen der neuen Werkzeuge



- VR-Demonstrationen an internationalen Fachmessen
 - z.B. InnoTrans in Berlin, Transport Research Arena in Lissabon, Urban Sound Symposium, Empa, 28.-30. April
- in europäischen Forschungsprojekten zur Störfunktion
- Informationsveranstaltungen für Anwohner (z.B. Deutsche Bahn)

- Software-Werkzeuge verfügbar unter www.empa.ch/web/silvarstar



VR-Demonstration für EU Generaldirektor für Mobilität und Transport (Foto von Europe's Rail).



29.11.2024

Hörbeispiele und Demos online



www.empa.ch/web/silverstar

Zusammenfassung



- Neue Auralisierungsmodelle für Bahnlärm entwickelt
 - Physik-basierte Synthese
 - realitätsnahe Zugsvorbeifahrten
 - aktuell weltweit mächtigstes Modell

- Neue Software-Werkzeuge frei verfügbar für nicht-kommerzielle Zwecke

- Nutzen
 - neue Möglichkeiten in Kommunikation und Psychoakustik
 - erste Anwendungen laufen

Dank



Danke an

- Co-Autoren
 - Fotis Georgiou und Kurt Heutschi (Empa)
 - David Thompson und Giacomo Squicciarini (ISVR)
 - Daniel Gremlı und Dario Sala (Bandara VR)
- Partner der EU-Projekte SILVARSTAR und FINE-2



Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation

This work has received funding from the Shift2Rail Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement 101015442.