

# **sonRAIL – das neue Schweizerische Berechnungsmodell für Eisenbahnlärm**

## **1 Einführung**

sonRAIL, das neue Schweizerische Berechnungsmodell für Eisenbahnlärm, wurde mit dem Ziel entwickelt, Immissionspegel mit höchstmöglicher Genauigkeit zu ermitteln. Sowohl das Emissions- als auch das Ausbreitungsmodell orientieren sich an den physikalischen Prozessen der Schallentstehung und –ausbreitung. Entsprechend ist sonRAIL nicht nur dazu geeignet, bestehende Situationen korrekt abzubilden, es ist auch in der Lage, die Wirkung verschiedenster Massnahmen an der Quelle oder auf dem Ausbreitungsweg zu prognostizieren.

Die Entwicklung von sonRAIL wurde durch das Schweizerische Bundesamt für Umwelt bafu finanziert. Das Projekt wurde innerhalb von drei Jahren, von 2007 bis 2009, durch ein interdisziplinäres Projektteam realisiert, welches sich aus folgenden Firmen und Institutionen zusammensetzte:

- Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärminderung: Entwicklung und Ausprogrammierung des Schallausbreitungsmodells sowie Teilnahme an den Emissionsmessungen.
- Technische Universität Berlin, Departement für Schienenfahrzeuge: Entwicklung des Emissionsmodells und Teilnahme an den Emissionsmessungen.
- PROSE AG, measuring and testing: Organisation und Teilnahme an den Emissionsmessungen.
- LCC Consulting: Entwicklung der graphischen Benutzeroberfläche, Ausprogrammierung des Emissionsmodells und der Datenbank Anwendungen.
- SISE – Schweizerisches Institut für Systems Engineering: Unterstützung des Projektmanagements.
- IFV BAHNTECHNIK e.V.: Öffentlichkeitsarbeit und unterstützende Dienste (Internet, Intranet).
- Sulzer Innotec: Durchführung von Messungen mit einem Mikrofon-Array zur Schallquellenortung sowie Teilnahme an den Emissionsmessungen.
- PSIA Austria: Teilnahme an den Emissionsmessungen.

## **2 Emissionsmodell**

Das Berechnungsmodell von sonRAIL setzt sich zusammen aus einem Emissionsmodell, welches die Schallentstehung und –abstrahlung von Eisenbahnlärm beschreibt, und einem Ausbreitungsmodell, welches die Dämpfung von der Quelle zum Empfänger ermittelt. Beide Modelle wurden in Terzbändern von 100 Hz bis 8 kHz formuliert. Das Emissionsmodell liefert Schallleistungspegel für fünf vordefinierte Quellenhöhen entlang der Fahrzeugoberfläche in Abhängigkeit der Fahrzeugtypen und -eigenschaften, des Oberbaus und Schienenzustandes sowie der Betriebsbedingungen. Gleisabschnitte mit einheitlichen Eigenschaften, d.h. ein-

heitlichem Oberbau, einheitlicher Schienenrauhigkeit, konstantem Fahrzeugmix (ohne Abzweigungen) und pro Zugsart konstanter Fahrgeschwindigkeit werden dabei zu Linienquellen zusammengefasst.

Das Emissionsmodell beschreibt die Rollgeräuschquelle auf der Basis der Rauigkeitsspektren von Rad und Schiene. Mit Hilfe eines Filters zur Berücksichtigung der Grösse der Kontaktfläche von Rad und Schiene werden diese beiden Spektren zu einer effektiven Gesamtrauhigkeit kombiniert. Das abgestrahlte Rollgeräusch wird danach unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit und messtechnisch erfasster, typenabhängiger Transferfunktionen ermittelt. Neben der Fahrt auf freier, gerader Strecke sind zusätzlich spezielle Ansätze für Weichen, verschiedene Brückentypen sowie Kurvenfahrten integriert.

Für Antriebs- und Aggregatsgeräusche sowie aerodynamische Geräusche wurden basierend auf Messdaten für verschiedene Zustände Emissionsspektren ermittelt. Diese sind in einer Datenbank abgelegt und können über eine Geschwindigkeitsabhängigkeit umgerechnet werden.

### 3 Emissionsmessungen

In umfangreichen Messungen wurden für die Mehrzahl der auf dem Schweizerischen Schienennetz auftretenden Fahrzeuge und Oberbautypen Emissionsdaten ermittelt. An 18 Messstellen wurden gesamthaft 14'500 Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten zwischen 50 und 200 km/h bei Vorbeifahrtsmessungen erfasst. Jede Messstelle wurde dabei durch die Abklingraten und die Rauigkeiten sämtlicher Schienen charakterisiert. Zusätzlich wurden die örtlichen Ausbreitungsbedingungen durch Lautsprechermessungen bestimmt. Zugsvorbeifahrten wurden einerseits durch Schalldruckmessungen an vier Positionen sowie durch Beschleunigungsmessungen an sämtlichen Schienen erfasst. An zwei Messstellen wurde zusätzlich ein vertikaler Mikrofon-Array zur Schallquellenortung eingesetzt. Neben regulär verkehrenden Zügen wurden auch zwei speziell zusammengestellte Messzüge mit vorgängig erfassten Radrauhigkeiten betrieben. Abbildung 1 zeigt eine Messstelle mit Mikrofon-Array während der Vorbeifahrt des Versuchszuges NINA. In Abbildung 2 sind Resultate der Schallquellenortung dargestellt.



Abbildung 1: Messstelle mit Mikrofon-Array während der Vorbeifahrt eines Messzuges.

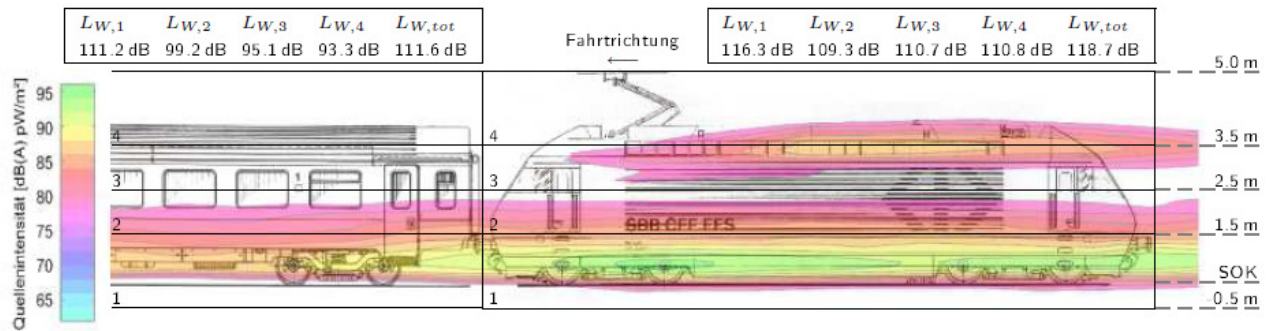


Abbildung 2: Verteilung der Quellenintensität und Angabe der Gesamtschalleistung  $L_w$  pro Quellenhöhe der 1000 Hz-Terz an einer Lok2000 mit EW IV Wagen mit  $v = 100$  km/h.

#### 4 Ausbreitungsmodell

Das Schallausbreitungsmodell ist in vier Module unterteilt, die getrennt von einander betrieben werden können. Das Berechnungsmodul 'Basic' wird für jede Ausbreitungsrechnung benötigt. In diesem Modul wird die Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger in einem Vertikalschnitt unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre berechnet. Die Ausbreitalgorithmen orientieren sich stark an der ISO-Norm 9613. Die Berechnung des Bodeneffektes erfolgt jedoch in Abweichung zur ISO-Norm. Das Bodeneffekt-Modell basiert auf einem Ansatz für Kugelwellenreflexionen an ebenem, homogenem Terrain. Mittels einer Fresnelzonen-Betrachtung wird das Modell für unebenes Gelände und wechselnde Bodeneigenschaften erweitert. Es berücksichtigt zusätzlich Kohärenzverluste zwischen Direktschall und Reflexion in Abhängigkeit der Frequenz und der Ausbreitungsdistanz.

Im zweiten Modul werden meteorologische Effekte auf die Schallausbreitung berechnet. Als zusätzliche Eingangsdaten werden dazu vertikale Profile des Windes, der Temperatur und der Feuchte benötigt, welche zusätzlich je nach Untergrund variiert werden können. Zum einen wird auf diesem Weg der Wettereinfluss auf die Luftabsorption bestimmt. Zum anderen werden die resultierenden Schallgeschwindigkeitsprofile in einem Schallstrahl-Verfolgungs-Algorithmus eingesetzt, welcher Veränderungen bei den Hinderniswirkungen sowie die Ausbildung von akustischen Schattenzonen ermittelt. Abbildung 3 zeigt eine entsprechende Situation mit einem Empfangspunkt im Schallschatten. Die Pegelabnahme wird dabei aus geometrischen Parametern des Schallstrahles abgeleitet, welcher dem Empfänger am nächsten kommt.

Das dritte und vierte Modul behandeln Pegelerhöhungen als Folge von Reflexionen. In Modul drei werden Reflexionen an Gebäuden und Schallschirmen bestimmt, wobei zwei separate Modelle, eines für kohärente, spiegelnde Reflexionen und eines für inkohärente, streuende Reflexionen zur Anwendung kommen. In Modul vier werden diffuse Reflexionen an Waldrändern und Felswänden berechnet.

Grundsätzlich erfolgt die Schallausbreitung unabhängig von der Art der Schallquelle. Entsprechend haben die Schallausbreitalgorithmen auch allgemeine Gültigkeit. Gleichwohl gibt es je nach Quellenart spezielle Herausforderungen, welche mit separaten Ansätzen behandelt werden müssen. In sonRAIL ist dies zum einen der Fall für die Schallausbreitung über Schotter, welche mit einem separat entwickelten Bodeneffektmodell

behandelt wird. Zum anderen wurden Speziallösungen implementiert um die zusätzlichen Reflexionen von Eisenbahntunneln und Geländeeinschnitten zu berücksichtigen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Einfach- und Mehrfachreflexionen, welche sich in schallhart ausgeführten Troglagen ergeben.

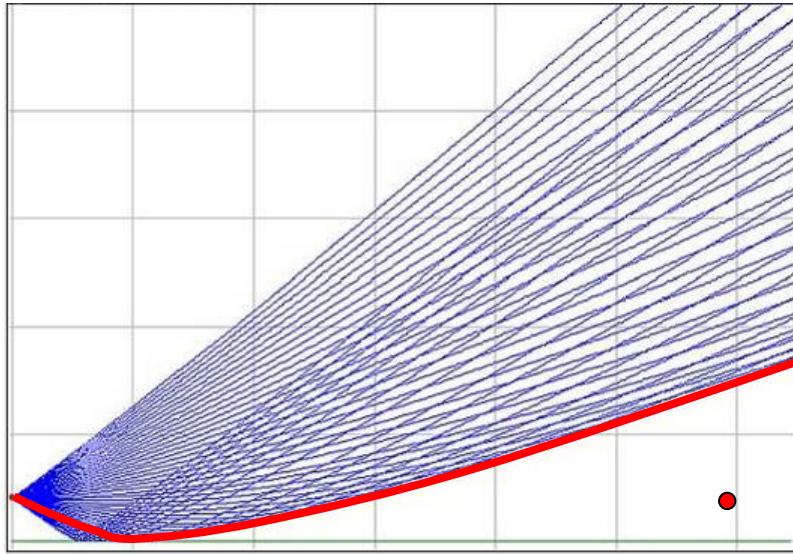


Abbildung 3: Bildung akustischer Schattenzonen. Der Schallstrahl, der dem Empfänger am nächsten kommt, ist hervorgehoben.

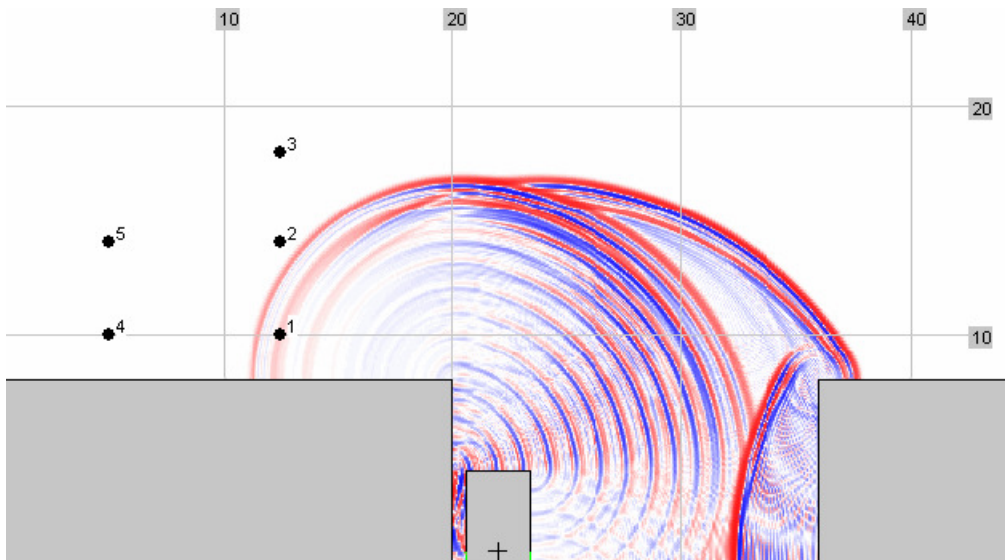


Abbildung 4: Schallausbreitung in reflektierend ausgeführten Troglagen. Als Schallquellen treten die Radbereiche des im Querschnitt dargestellten Fahrzeuges auf.

## 5 Technische Umsetzung

Das Ausbreitungsmodell kann vollständig unabhängig vom Emissionsmodell betrieben werden. Lediglich die Lage der einzelnen Streckenabschnitte muss bekannt sein. Als Resultat liefert das Ausbreitungsmodell Dämpfungsspektren für jedes der vier Module. Die resultierenden Immissionspegel berechnen sich als einfache Subtraktion dieser Ausbreitungsdämpfungen von den Schalleistungspegeln. Diese klare Trennung der beiden Modellteile erlaubt es die zeitaufwändige Ausbreitungsrechnung als separaten Schritt durchzuführen. Änderungen, welche nur die Emissionen betreffen, wie z.B. Veränderungen am Fahrzeugmix, an den Geschwindigkeiten oder den Schienenrauhigkeiten können so in ihren Auswirkungen praktisch auf Knopfdruck beurteilt werden.

Die Qualität einer Immissionsberechnung hängt nicht nur vom verwendeten Berechnungsmodell sondern auch von der Korrektheit der Eingangsgrößen ab, weshalb diesem Aspekt innerhalb des Projektes auch grosse Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Da ein Grossteil der benötigten Daten einen räumlichen Bezug aufweist, wurde als Benutzerumgebung ein geographisches Informationssystem mit der Bezeichnung EnvGDB (Environmental GeoDataBase) gewählt, welches auf ESRI-Produkten aufbaut und zusätzlich Oracle zur Speicherung und Verwaltung sämtlicher Daten verwendet. Innerhalb der EnvGDB erfolgen die Bearbeitung von Eingangsdaten, die Berechnung der Emissionen sowie die Analyse und Darstellung der Resultate. Die Ausbreitungsrechnung wird aus der GIS-Umgebung heraus als separate Anwendung angestossen und kontrolliert, wobei eine Mehr-Processor-Lösung implementiert wurde, welche es erlaubt, grosse Projekte in Teilgebiete aufzuteilen und parallel auf mehreren Rechnern bearbeiten zu lassen. Abbildung 5 zeigt schematisch die Struktur der Implementation. Das System wurde an der Empa eingerichtet und greift zur Durchführung von Berechnungen auf einen Linux-basierten Cluster mit der Bezeichnung Ipazia zu. Ipazia besteht aktuell aus 46, teilweise mit Infiniband verbundenen Knoten, 248 Prozessoren mit gesamthaft 768 GB RAM and 24 TB Diskplatz. Der Rechen-Cluster wird laufend ausgebaut und erneuert und garantiert somit auch die Abwicklung grosser Projekte innert akzeptabler Zeit.

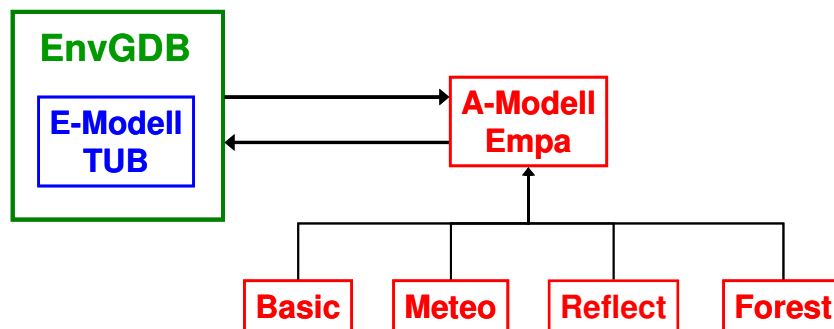


Abbildung 5: Implementation von sonRAIL mit einer direkten Integration des Emissionsmodells in die Anwendung EnvGDB und dem Ausbreitungsmodell als separatem Programm mit vier Betriebsmodi.

## 6 Anwendungsbereich

Das Modell sonRAIL kann zur Lärmermittlung an bestehenden oder geplanten Eisenbahnstrecken oder zur Evaluation von Schallschutzmassnahmen eingesetzt werden. Von der Beurteilung einzelner Gebäude bis zur Berechnung grossflächiger Lärmkarten können Projekte unterschiedlichster Grösse behandelt werden. Als erste praktische Anwendung werden die Lärmimmissionen entlang einem Nord-Süd-Korridor durch die Schweiz berechnet.

## 7 Kontakt

Eine vollständige Modelldokumentation kann beim bafu, Abteilung Lärmbekämpfung bezogen werden unter: <http://www.bafu.admin.ch/laerm/01148/06762/07079/index.html?lang=de>

Für zusätzliche Informationen kontaktieren Sie bitte:

- **Empa:** (sonRAIL) J.M. Wunderli ([jean-marc.wunderli@empa.ch](mailto:jean-marc.wunderli@empa.ch), +41 44 823 47 48)
- (Ipazia) D. Passerone ([daniele.passerone@empa.ch](mailto:daniele.passerone@empa.ch), +41 44 823 48 77)
- **bafu:** D. Sehu ([drangu.sehu@bafu.admin.ch](mailto:drangu.sehu@bafu.admin.ch), +41 31 322 93 09)
- **TU Berlin:** Prof. M. Hecht ([markus.hecht@tu-berlin.de](mailto:markus.hecht@tu-berlin.de), +49 30 314 25 195)
- **PROSE AG:** S. Bühler ([stefan.buehler@prose.ch](mailto:stefan.buehler@prose.ch), +41 52 262 74 12)
- **LCC Consulting:** T. Ledermann ([thomas.ledermann@lcc-consulting.ch](mailto:thomas.ledermann@lcc-consulting.ch), +41 44 454 30 15)

## 8 Referenzen

1. M. Hecht, T. Thron, Y.B. Othman, „Einfluss von Rad- und Schienenrauheiten auf das Rollgeräusch - Messung und Berechnung“, *ZEVrail Glasers Annalen* 8 (132), p. 276-290, 2008.
2. K. Heutschi, „Modeling of sound propagation over ballast surfaces“, Euronoise 2009.
3. K. Heutschi, „Calculation of reflections in an urban environment“, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95, p. 644-652 (2009).
4. K. Heutschi, R. Bayer, „Sound radiation from railway tunnel openings“, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 92, 567-573 (2006).
5. K. Heutschi, „Sound propagation in railway line cuttings“, *Applied Acoustics*, vol. 69, 1189-1194 (2008).
6. J. Hofmann, K. Heutschi, „An Engineering Model for Sound Pressure in Shadow Zones Based on Numerical Simulations“, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 91, 661-670 (2005).
7. A. Rohrbeck, T. Thron, „sonRAIL - Die Erweiterung des schweizerischen Lärmmodells für den Schienenverkehr“, *ZEVrail Glasers Annalen*, 11 (132), p. 95-105, 2008.
8. J.M. Wunderli, E.M. Salomons, „A Model to Predict the Sound Reflection from Forests“, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95, p. 76-85 (2009).
9. J.M. Wunderli, „The sound propagation model of sonrail“, Euronoise 2009.