

Auralisierung als Werkzeug für die Gestaltung der akustischen Umgebung

Kurt Heutschi, Reto Pieren

Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, 8600 Dübendorf

Kurt.Heutschi@empa.ch, Reto.Pieren@empa.ch

Abstract

Bereits im Entwurfsstadium in einen künftigen Konzertsaal hineinhören zu können, ist in der Raumakustik eine Selbstverständlichkeit geworden. In den letzten zwei Dekaden wurde die Nützlichkeit der Auralisierung auch für umweltakustische Szenen entdeckt. Hier wird gezeigt, was es dafür braucht und welche Entwicklungen an der Empa in den letzten 10 Jahren in diesem Zusammenhang stattgefunden haben.

Einleitung

Das Auslaufen der in der Schweizerischen Lärmschutzverordnung festgelegten Sanierungsfristen eröffnet die Chance, die Gestaltung der akustischen Umwelt weiter zu denken. Die bisher praktizierte, klassische Lärmbekämpfung, welche lärmbelastete Gebiete zu beruhigen sucht und die Wirkung einer Massnahme ausschliesslich durch Angabe einer Pegelreduktion beschreibt, wird künftig mehr und mehr hinterfragt werden. Zum einen werden Geräusche nicht mehr nur kategorisch als zu dulndendes Übel verstanden, sondern in gewissen Fällen auch als Bereicherung aufgefasst. Zum anderen wird die Optimierung der akustischen Umgebung breiter verstanden, indem z.B. durch Hinzufügen von positiv besetzten Geräuschen oder durch gezieltes Verbessern des Geräuschcharakters die Szenerie insgesamt aufgewertet werden kann, obwohl der Pegel sogar zunimmt. Das gleichbleibende Ziel verfolgend, nämlich einen Beitrag zur Verbesserung der akustischen Umgebung zu leisten, wird die künftige Forschung nicht mehr ausschliesslich auf die Physik der Schallentstehung und -ausbreitung ausgerichtet sein, sondern vermehrt die Wirkung auf den Menschen ins Zentrum stellen. Da die menschliche Wahrnehmung neu in der Gleichung auftaucht, müssen Werkzeuge geschaffen werden, die deren Charakterisierung erlauben und in Zusammenarbeit mit Psychologen, Sozialwissenschaftlern und Medizinern eingesetzt werden können. Ein wichtiges Element dazu ist die Auralisierung, d.h. die Hörbarmachung einer virtuellen umweltakustischen Szenerie [Vorländer 2008]. Mit einer qualitativ hochwertigen und glaubwürdigen Auralisation können Hörversuche durchgeführt werden, die gezielt einzelne Aspekte der Lärmwirkung untersuchen. Durch Schliessen von Lücken im Verständnis der Wirkungskette können Modelle realisiert werden, die unter Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren und Moderatoren für ein akustisches Signal die beim Menschen hervorgerufene Störwirkung prognostizieren.

Aufnahme versus Synthese

Das Audiomaterial für eine Auralisierung kann mittels einer geeigneten Audioaufnahme oder durch Erzeugung von synthetischen Signalen gewonnen werden. Es können auch Mischformen eingesetzt werden, die von Aufnahmen ausge-

hend durch Signalverarbeitung eine Anpassung an das gewünschte Szenario erlauben. Der Vorteil von Aufnahmen liegt in der undiskutablen Korrektheit des Signals. Nachteilig ist, dass Aufnahmen immer nur eine bestimmte existierende akustische Szenerie repräsentieren, die höchstens in engen Grenzen verändert werden kann. Demgegenüber können synthetische Auralisierungssysteme innerhalb der kontrollierbaren Parametersetzungen beliebige, auch nichtexistierende Szenarien erzeugen. Allerdings stellt die Synthese auf Grund der Modelllimitierungen immer nur eine Annäherung an die Realität dar.

Ein zentraler Aspekt der Auralisierung ist die Vermittlung von Richtungsinformation. Damit Aufnahmen eine Quellenortung erlauben, werden mehrkanalige Aufzeichnungssysteme benötigt, die formatabhängig entsprechende Anforderungen an das Wiedergabesystem stellen [Hohmann 2020]. Die synthetische Auralisierung baut die akustische Szenerie aus einzelnen Quellen auf und ermöglicht so eine beliebige räumliche Platzierung, die abhängig vom Wiedergabesystem in die einzelnen Kanäle eingerechnet wird.

Bausteine einer synthetischen Auralisierung

Die synthetische Auralisierung setzt sich aus drei Modulen zusammen. Modul 1 umfasst den Emissionssynthesizer. Für den gewünschten Betriebszustand der Schallquelle wird ein Audiosignal generiert, das die Abstrahlung der Quelle, z.B. den Schalldruck in 1 m Abstand, repräsentiert. Modul 2 ist ein Ausbreitungsfiler, das die Schallausbreitungsphänomene von der Quelle zum Empfänger nachbildet. Hierzu gehören die geometrische Verdünnung und die zugehörige schalllaufzeitbedingte Signalverzögerung, die Luftdämpfung, der Bodeneffekt, mögliche Hinderniswirkungen, Reflexionen sowie Turbulenzeffekte. Bei bewegten Quellen und/oder Empfängern wird die Filterung entsprechend zeitvariabel. Modul 3 leistet die Signalwiedergabe, die je nach Bedürfnis für Lautsprecherreproduktion oder Kopfhörer gerendert wird.

Modellentwicklungen an der Empa

Mit der künstlichen Hörbarmachung von Windparks hat die Gruppe Umweltakustik der Empa vor rund 10 Jahren das Thema Auralisierung aufgenommen. In der Folge werden die wichtigsten Projekte aufgeführt, die alle auf das Ziel ausgerichtet sind, die bedeutendsten umweltakustischen Quellen und Szenarien in beliebiger Konfiguration im Labor erlebbar zu machen.

VisAsim

SNF Projekt zur Visualisierung und Auralisierung von ausgewählten Windturbinen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung der ETH [Manyoky 2014, Pieren 2014, Heutschi 2014].

Das Synthesewerkzeug bildete die Grundlage für Hörversuche zum Vergleich der Störwirkung von Windturbinen- und Strassenlärm (Abbildung 1) [Schäffer 2015, 2016, 2017, 2018]. Aktuell werden damit geometrische und materialbezogene Modifikationen der Rotorblätter durch Einbezug von Windkanaldaten auralisiert.

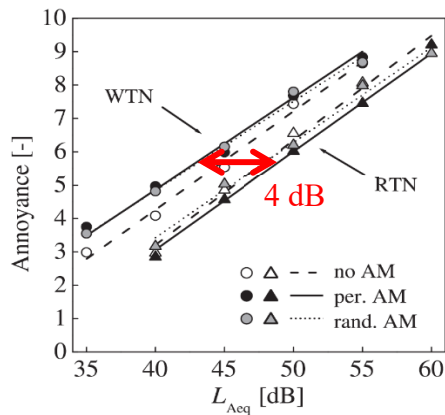


Abbildung 1: Experimentell bestimmter Zusammenhang zwischen L_{Aeq} und Belästigung für Windturbinenlärm (WTN) im Vergleich zu Strassenlärm (RTN) mit Hinweis auf einen "psychoakustischen Offset" von 4 dB [Schäffer 2016].

TAURA

SNF Projekt zur Auralisierung von Strassen- und Eisenbahnfahrzeugen.

Die Motorgeräusch-Emissionssignale der Strassenfahrzeuge werden drehzahl- und lastabhängig aus den Motorordnungen aufgebaut, das Rollgeräusch wird durch spektral gefärbtes Rauschen nachgebildet. Die Geräuschsynthese bei Bahnfahrzeugen stützt sich auf das Emissionsmodell aus sonRAIL, ergänzt um modale Komponenten. Durch Nachbildung von Radrauhheitsprofilen können Flachstellen simuliert werden [Pieren 2015, 2016, 2016b]. Beispiele von synthetischen Autovorbeifahrten:

https://www.youtube.com/watch?v=_XbKWmKjdr4

<https://www.youtube.com/watch?v=fQPnLIXvG9I>

SONORUS

EU FP7 ITN Projekt "Urban Sound Planner" mit Partnern aus Schweden, Belgien, Deutschland, Grossbritannien, Holland und Italien.

Empa-seitig lag der Entwicklungsschwerpunkt bei der exemplarischen Fluglärm-Auralisierung und der Nachbildung von Pegelfluktuationen und Dekohärenz zwischen verschiedenen Schallausbreitungspfaden als Folge von Turbulenzerscheinungen in der Atmosphäre [Rietdijk 2014, 2015, 2017].

DESTINATE

EU Horizon 2020 Projekt mit Partnern aus Deutschland, England, Holland, Polen und Spanien mit dem Empa-seitigen Entwicklungsschwerpunkt Visualisierung und Auralisierung von Bahnlärm [Pieren 2017, 2017b].

Beispielvideos sind auf YouTube mit den Suchbegriffen "Destinate" und "Empa" zu finden oder direkt unter:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLF-HEzMwLXvjHmWEICA27CrG90NejHpaKN>

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLF-HEzMwLXvjGY4KUMNRIPWGPWXj40jXnk>

Die Bahnlärm auralisierung und -visualisierung wird im Rahmen eines anlaufenden EU-Forschungsprojektes weiterentwickelt.

IDEAL & ARTEM

Projekte in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Auralisierung von verschiedenen Grossflugzeugen.

Aufbauend auf virtuellen Überflügen eines Airbus A319 als Referenzfall wurden sowohl Retrofit-Massnahmen am Flugzeug, ein neuartiger Flugzeugentwurf, als auch verschiedene Flugverfahren von der Empa synthetisch auralisiert und mittels Hörexperiment hinsichtlich Lästigkeit verglichen (Abbildung 2) [Pieren 2018, 2019, 2019b]. Erstmals wurden in Auralisierungen neben tonalen Anteilen des Triebwerkklärs auch schmalbandige Umströmungsgeräusche (sog. cavity tones) abgebildet. In einem internationalen Benchmark wurden kürzlich die Auralisierungsmodelle von der NASA, ONERA und der Empa verglichen [Rizzi 2020]. Im laufenden EU Horizon 2020 Projekt ARTEM auralisiert die Empa neuartige Flugzeugkonzepte, die innerhalb eines grossen Konsortiums entwickelt werden.

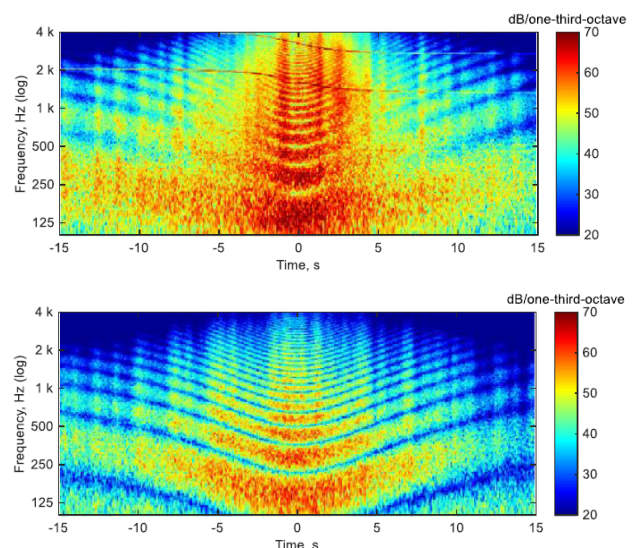


Abbildung 2: Spektrogramme von synthetisch erzeugten Flugzeugüberflügen: Oben ein Airbus A319 im Landeanflug 4 km zum Aufsetzpunkt; Unten im Direktvergleich ein neuer nicht existenter Flugzeugentwurf mit alternativen Flugverfahren [Pieren 2019].

Urban Mining and Design of Street Canyons

Bis Ende 2022 laufendes SNF Projekt in Zusammenarbeit mit der Empa Abteilung Strassenbau / Abdichtungen und den Instituten Landschaftsarchitektur und Umweltingenieurwissenschaften der ETH.

Der Schwerpunkt der Empa-Umweltakustik liegt bei der Auralisierung von Strassenfahrzeugen in urbanen Umgebungen als Werkzeug für die wahrnehmungsbezogene Optimierung von Fassadenoberflächen.

AuraLab

Das Auralisierungslabor *AuraLab* der Empa ist seit 2016 in Betrieb und bietet eine hochwertige Abhörmöglichkeit von virtuellen akustischen 3D-Szenen. Das Labor wird in der Modellentwicklung, für psychoakustische Experimente, Demonstrationen und zur Kommunikation eingesetzt. Der Hörraum des Labors ist mit einem mehrkanaligen Lautsprecher-System ausgerüstet, das laufend an neue Bedürfnisse aus Forschungsprojekten angepasst und erweitert wird. Es erlaubt eine kalibrierte Wiedergabe von 20 Hz bis 20 kHz. Aktuell sind 17 aktive 100 W-Satelliten-Lautsprecher in Halbkugelanordnung und 4 aktive 200 W-Subwoofer im Einsatz (Abbildung 3). Die Nachhallzeit liegt bei $T_m = 0.11$ s, das Grundgeräusch bei eingeschaltetem Audiosystem beträgt 7 dB(A). Zeitsynchron können Visualisierungen der virtuellen Szenen als Projektion auf eine mikroperforierte Leinwand oder über ein Head-Mounted Display dargeboten werden. Die Benutzersteuerung erfolgt über einen Touchscreen.



Abbildung 3: *AuraLab* der Empa bei der Demonstration einer virtuellen Zugvorbeifahrt.

Aktuelle Forschungsfragen

Der Wunsch nach der Auralisierung von umweltakustischen Szenarien hat in den letzten 15 Jahren eine international wachsende Forschungstätigkeit ausgelöst. Hier werden einige aktuelle, noch nicht abschliessend gelöste Herausforderungen, an denen auch die Empa Umweltakustikgruppe arbeitet, herausgegriffen.

1) Hybride Ausbreitungsmodellierung zur Erzeugung von Impulsantworten, die den ganzen Hörbereich abdecken

Die Schallausbreitung in urbanen Umgebungen ist wesentlich durch Reflexionen geprägt. Zur Nachbildung dieser Schallfelder bieten sich wellentheoretische Schallausbreitungssimulationen als Grundlage für eine Auralisierung an. Auf Grund der grossen Abmessungen muss die räumliche Diskretisierung relativ grob bleiben, sodass nur der tiefe und mittlere Frequenzbereich abgedeckt werden kann. Informationen zu den hohen Frequenzen müssen mit anderen Methoden - z.B. geometrischer Raumakustik - gewonnen werden. Dazu ist eine Strategie zu entwickeln, die die Ergebnisse der beiden Simulationsansätze kombiniert.

2) Interpolation von Impulsantworten zur Auralisierung von sich bewegenden Quellen

Schallausbreitungssimulationen beschreiben die Ausbreitung von einem Quellen- zu einem Empfängerpunkt mittels einer Impulsantwort. Eine sich bewegende Quelle muss durch eine endliche Zahl diskreter Positionen approximiert werden. Dies macht eine Interpolationsstrategie notwendig, die eine kontinuierliche Auralisierung ermöglicht. Dazu können die für die diskreten Quellenpositionen durch Faltung erzeugten Empfängerpunktsignale segmentweise überblendet werden [Georgiou 2019] oder es wird versucht, interpolierte Impulsantworten zu schätzen [Gisladottir 2020].

3) Emissionssignalsynthese durch physiknahe Modellierung des Schallentstehungsprozesses

Grösste Flexibilität und Universalität wird durch eine Emissionssignalsynthese erreicht, die die zu Grunde liegenden Schallentstehungsprozesse mit einem physikalischen Modell nachbildet. Damit lassen sich spezifische Quelleneigenschaften und beispielsweise Massnahmen an der Quelle direkt in ihren Auswirkungen untersuchen.

4) Validierung von synthetischen Auralisierungen

Wie alle Modelle und Simulationen bedürfen Auralisierungen einer Validierung. Jedoch ist bisher unklar, welcher Art Validierung sich ein Auralisierungsmodell stellen muss. Die implizite Reproduktion von gängigen akustischen Grössen wie z.B. einem Terzbandspektrum entspricht dabei eher einer Modell-Verifizierung. Konsens scheint zu herrschen, dass eine Validierung an einen Anwendungszweck gebunden ist und dass Ununterscheidbarkeit zu einer Aufnahme meist nicht zwingend ist, da eine Aufnahme nur eine einzige spezifische und zufällige Situation abbildet. Aktuell manifestiert sich als ein wichtiges Qualitätsmerkmal einer Auralisierung die Evaluation der (wahrgenommenen) Plausibilität.

Bedeutung der Auralisierung für die Praxis

Auch wenn noch bedeutender Forschungsbedarf besteht, hat die synthetische Umweltakustik-Auralisierung einen Reifegrad erreicht, der eine Einführung in den Akustik-Alltag legitimiert. Der Auralisierung eröffnen sich zwei Hauptanwendungsfelder. Zum einen kann sie als *wissenschaftliches Werkzeug* z.B. als Stimulusgenerator in psychoakustischen Experimenten dienen. Durch Hörversuche mit gezielt veränderten Signalattributen lassen sich beispielsweise für die Lästigkeit relevante Merkmale identifizieren. Überdies können virtuelle Mikrophonsignale erzeugt werden, die vielfältige Weiterverarbeitungen ermöglichen [Heutschi 2020]. Auralisierung als *Kommunikationswerkzeug* stellt ein zweites Einsatzgebiet dar. Durch das Vorführen einer akustischen Szene können auch nicht-dB-affine Personen einen Eindruck eines Sachverhaltes gewinnen und sich beispielsweise eine eigene Meinung zu einer geplanten Massnahme bilden. Dies kann Transparenz schaffen und in der Kommunikation zwischen Projektentwicklern und Betroffenen vertrauensfördernd sein.

Literatur

- [Georgiou 2019] F. Georgiou, M. Hornikx, A. Kohlrausch: Auralization of a car pass-by using impulse responses computed with a wave-based method, *Acta Acust. United with Acustica*, vol. 105, 381-391 (2019).
- [Gisladottir 2020] A. Gisladottir, K. Heutschi, A. Taghipour, R. Pieren, K. Eggenschwiler: Influence of facade characteristics on perceived annoyance from moving cars in urban living environments, *Forum Acusticum 2020*.
- [Heutschi 2014] K. Heutschi, R. Pieren, M. Müller, M. Manyoky, U. Wissen Hayek, K. Eggenschwiler: Auralization of Wind Turbine Noise: Propagation Filtering and Vegetation Noise Synthesis, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, 13-24 (2014).
- [Heutschi 2020] K. Heutschi, B. Ott, T. Nussbaumer, P. Wellig: Synthesis of real world drone signals based on lab recordings, submitted to *Acta Acustica*.
- [Hohmann 2020] B. Hohmann: 3D-Aufnahmen in 5.1.2 für die Lautsprecherwiedergabe realer Geräuschlandschaften, *DAGA 2020*.
- [Manyoky 2014] M. Manyoky, U. Wissen Hayek, K. Heutschi, R. Pieren, A. Grêt-Regamey: Developing a GIS-Based Visual-Acoustic 3D Simulation for Wind Farm Assessment. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 3, 29-48 (2014).
- [Pieren 2014] R. Pieren, K. Heutschi, M. Müller, M. Manyoky, K. Eggenschwiler: Auralization of Wind Turbine Noise: Emission Synthesis, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, 25-33 (2014).
- [Pieren 2015] R. Pieren, T. Bütler, K. Heutschi: Auralisierung of accelerating passenger cars, *Euronoise 2015*, Maastricht.
- [Pieren 2016] R. Pieren, T. Bütler, K. Heutschi: Auralization of accelerating passenger cars using additive synthesis, *Applied Sciences*, vol. 6, no. 5 (2016).
- [Pieren 2016b] R. Pieren, J.M. Wunderli, A. Zemp, S. Sohr, K. Heutschi: Auralisierung of Railway Noise: A Concept for the Emission Synthesis of Rolling and Impact Noise, int. conference INTER-NOISE Hamburg, 2016.
- [Pieren 2017] R. Pieren, K. Heutschi, J.M. Wunderli, M. Snelen, D. G. Simons: Auralization of Railway Noise: Emission Synthesis of Rolling and Impact Noise, *Applied Acoustics*, vol. 127, 34-45 (2017).
- [Pieren 2018] R. Pieren, L. Bertsch, J. Blinstrub, B. Schäffer, J.M. Wunderli: Simulation process for perception-based noise optimization of conventional and novel aircraft concepts, int. conference AIAA SciTech Forum, Florida, 2018.
- [Pieren 2017b] R. Pieren, K. Heutschi, R. Aalmoes, D. G. Simons: Evaluation of Auralization and Visualization systems for Railway Noise Scenes, int. conference INTER-NOISE Hongkong, 2017.
- [Pieren 2019] R. Pieren, L. Bertsch, D. Lauper, B. Schäffer: Improving future low-noise aircraft technologies using experimental perception-based evaluation of synthetic flyovers, *Science of the Total Environment*, vol. 692, 68-81 (2019).
- [Pieren 2019b] R. Pieren, L. Bertsch, D. Lauper, B. Schäffer: Future low-noise aircraft technologies and procedures - Perception-based evaluation using auralised flyovers, *International Congress on Acoustics (ICA 2019)*, Aachen, 2019.
- [Rietdijk 2014] F. Rietdijk, K. Heutschi, J. Forssén: Modeling sound propagation in the presence of atmospheric turbulence for the Auralisierung of aircraft noise, int. conference *Forum Acusticum*, Krakow, 2014.
- [Rietdijk 2015] F. Rietdijk, K. Heutschi, C. Zellmann, Determining an empirical emission model for the auralization of jet aircraft, *Euronoise*, Maastricht, 2015.
- [Rietdijk 2017] F. Rietdijk, K. Heutschi, J. Forssén: Generating sequences of acoustic scintillations, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 103, 331-338 (2017).
- [Rizzi 2020] S. Rizzi, I. LeGriffon, R. Pieren, L. Bertsch: A comparison of aircraft flyover auralizations by the aircraft noise simulation working group, int. conference *AIAA aviation 2020 forum*, 2020.
- [Schäffer 2015] B. Schäffer, S. J. Schlittmeier, K. Heutschi, M. Brink, R. Graf, R. Pieren, J. Hellbrück: Annoyance potential of wind turbine noise compared to road traffic noise, *Euronoise 2015*, Maastricht.
- [Schäffer 2016] B. Schäffer, S. J. Schlittmeier, R. Pieren, K. Heutschi, M. Brink, R. Graf, J. Hellbrück: Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: a laboratory study, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 139, 2949-2963 (2016).
- [Schäffer 2017] B. Schäffer, R. Pieren, S. Schlittmeier, M. Brink, K. Heutschi: Annoyance to wind turbine noise - influence of different acoustical characteristics, int. conference *INTER-NOISE Hongkong*, 2017.
- [Schäffer 2018] B. Schäffer, R. Pieren, S. Schlittmeier, M. Brink: Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 2018, 15, 1029 (2018).
- [Vorländer 2008] M. Vorländer: *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Springer, 2008.