

Von der Emission bis zur Wirkung

Betrachtung eines Lärmbrennpunkts

Dietrich Heimann, Klaus Ehrenfried, Eva-Maria Elmenhorst, Arne Henning, Hartmut Maaß, Uwe Müller, Sibylle Pennig, Arthur Schady

Zusammenfassung Die Beurteilung von Brennpunkten des Verkehrslärms erfordert eine ganzheitliche Situationsanalyse der Prozesskette von den relevanten Schallquellen (Emission) über die Schallausbreitungsbedingungen unter Berücksichtigung meteorologischer und topografischer Faktoren bis hin zur Schallimmission und ihren psychologischen und physiologischen Wirkungen auf den Menschen. Als Beispiel für eine solche Analyse wurden aktuelle Verfahren der Messtechnik, der numerischen Simulation, der Erhebung der Lärmbelästigung und der Erfassung physiologischer Parameter während einer Woche im Mittelrheintal in konzentrierter Weise angewandt und anschließend ausgewertet. Im Beitrag werden eine Auswahl der Methoden und Auswertemöglichkeiten beispielhaft erläutert.

From emission to its effects – close-up of a noise hotspot

Summary The assessment of traffic-noise hotspots requires a holistic analysis of the process chain from the relevant noise sources (emission), via the topographical and meteorological conditions of sound propagation, to the sound levels and their psychological and physiological impact on humans. For such an illustrative analysis up-to-date measuring techniques, advanced numerical simulations, inquiries of the annoyance and recordings of physiological parameters have been applied and evaluated in a concerted manner during one week in the Middle Rhine valley. This article demonstrates a selection of methods and possible evaluations.

Verkehrslärm ist seit Langem ein gravierendes Umweltproblem, das weite Teile des Landes betrifft. Es gibt aber geografische Schwerpunkte besonderer Lärmbelastung, wie z. B. in der Umgebung großer Verkehrsflughäfen. In den letzten Jahren hat auch der Schienenverkehrslärm zunehmende Aufmerksamkeit erfahren, insbesondere entlang von Strecken mit einer hohen Anzahl von Güterzugfahrten. Kommen beengte topografische Verhältnisse und eine hohe Einwohnerdichte hinzu, so bilden sich Lärmbrennpunkte, die zu gesellschaftlichen Konflikten führen und lärmreduzierende Maßnahmen dringlich machen.

Das Rheintal zwischen Bingen und Bonn ist ein solcher Lärmbrennpunkt, in dem das Ruhebedürfnis der dort lebenden Bevölkerung, die Interessen des Tourismus im UNESCO-Welterbe „Oberes Mittelrheintal“ mit den volkswirtschaftlichen Interessen des Landes und den betriebswirtschaftlichen der Verkehrsunternehmen in vielfältiger Weise aufeinanderstoßen. In dem nur wenige hundert Meter breiten und etwa 200 m tief in das Rheinische Schiefergebirge eingeschnittenen Tal drängen sich die Bundeswasserstraße Rhein und beiderseits des Flusses die links- und rechtsrheinische Bahnstrecke mit einem jeweils hohen Verkehrsaufkommen sowie zwei Bundesstraßen. Aufgrund der Enge des Tals konzentrieren sich die Ortschaften entlang der Verkehrswege und nur Neubaugebiete erstrecken sich teilweise auf Hanglagen oder auf die Hochebenen oberhalb des Tals.

Der Lärm-„Hotspot“ Mittelrheintal wurde ausgewählt, um zeitgemäße, teils neu entwickelte wissenschaftliche Methoden zur Erfassung der Lärmemission, der Schallausbreitung und der physiologischen und psychologischen Lärmwirkung gemeinsam, d. h. zur gleichen Zeit am gleichen Ort unter realen Bedingungen zu testen. Dies geschah im Zeitraum vom 7. bis 12. Mai 2012 im Bereich der Stadt Oberwesel im Rhein-Hunsrück-Kreis. Nachfolgend werden Ergebnisse dieser konzentrierten Feldmesskampagne und begleitende Auswertungen diskutiert und die „Lärmsituation“ in diesem Bereich des Mittelrheintals beschrieben.

Die Studie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr soll sie Anregungen geben, wie die Lärmsituation in einem Gebiet ganzheitlich analysiert werden kann. Sie soll methodische Anregungen geben, aber auch frühere Studien der Lärmproblematik in diesem Gebiet ergänzen (z. B. [1]).

Messgebiet und -konzeption

Die Stadt Oberwesel hat ca. 2 800 Einwohner und erstreckt sich über ca. 1,5 km auf einem 200 m breiten flachen Streifen am linken (westlichen) Ufer des Rheins. Zwischen Stadt und Flussufer verlaufen die zweigleisige elektrifizierte linksrheinische Bahnstrecke 2630 und die Bundesstraße 9. Gegenüber entlang des rechten (östlichen) Ufers verlaufen die ebenfalls zweigleisige elektrifizierte rechtsrheinische Bahnstrecke 3507 sowie die Bundesstraße 42. Der Rhein ist auf der Höhe von Oberwesel ca. 250 m breit und nahezu von Südost nach Nordwest orientiert. Das Tal ist etwa 250 m tief eingeschnitten, am Talgrund etwa 250 m und auf der Höhe des Plateaus etwa 2 km breit. Das rechte Hochufer ist sehr steil und teilweise felsig, während das linke (stadtseitige) Hochufer etwas flacher und bewaldet ist. Im Stadtgebiet münden aus Südwesten zwei Seitentäler (Niederbach und Oberbach) ein. Die orografische Situation führt zu komplexen meteorologischen Bedingungen. Hierzu gehören typischerweise eine Kanalisierung der Strömung entlang der Talachse und die Ausbildung autochthoner Zirkulationen wie thermisch induzierte Hangwinde und nächtliche Kaltluftabflüsse durch die Seitentäler.

Der Verkehr auf den beiden Bahnstrecken ist die dominante Lärmquelle. Täglich rollen 80 bis 120 Güterzüge durch das Tal. Hinzu kommen Regionalzüge auf beiden Seiten und Fernzüge auf der linksrheinischen Strecke. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt linksrheinisch 140 km/h (in der Kurve nördlich der Stadt 100 km/h). Rechtsrheinisch beträgt die Streckenhöchstgeschwindigkeit 110 km/h (im Roßsteintunnel 90 km/h). Die Gleise beider Bahnstrecken sind mit Schienenstegdämpfern versehen. Südlich des Bahnhofs stehen an der linksrheinischen Strecke niedrige Lärmschutzbarrieren. Weitere Lärmschutzeinrichtungen existieren nicht. Auf der B9 beträgt der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) 3 700 Fahrzeuge (laut Bundesanstalt für Straßenwesen, Zählung 2010), davon ca. 6,4 % Schwerverkehr. Die zulässige Geschwindigkeit beträgt 60 km/h. Für die B42 betragen diese Werte 3 000 Fahrzeuge/Tag bzw. 5,6 %. Die zulässige Geschwindigkeit be-

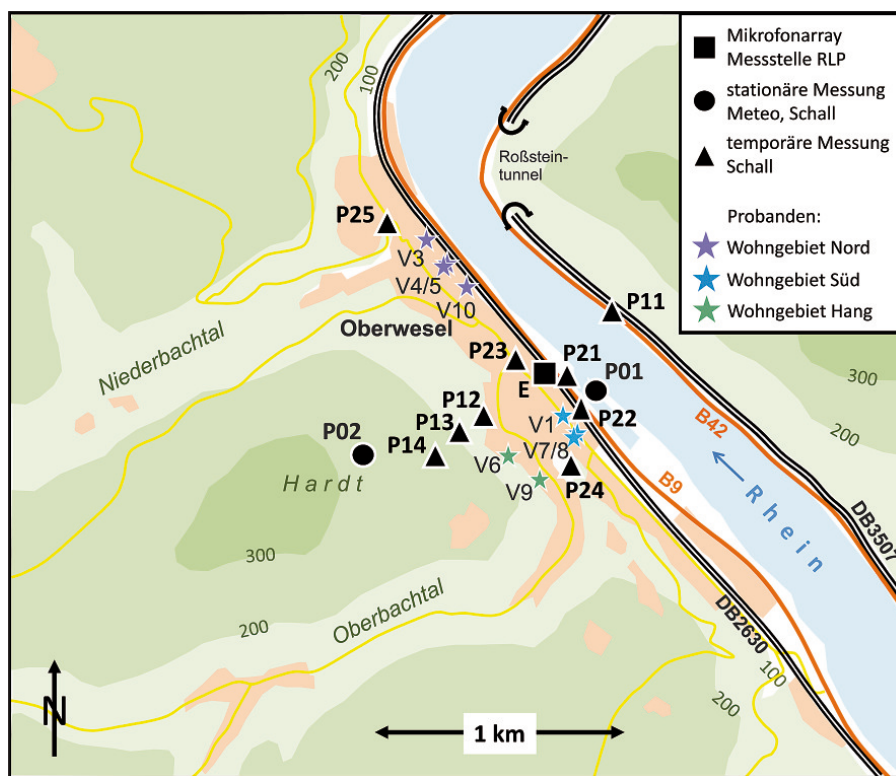


Bild 1 Überblick über das Untersuchungsgebiet und Lage der Messpositionen (E: Mikrofon-Array und Lärmmessstelle des Landes Rheinland-Pfalz; P##: stationäre und temporäre Messpositionen) und Lage der Probandenwohnungen (V#). Eingezeichnet sind die links- und rechtsrheinische Bahnstrecke (schwarz), die Bundesstraßen (orange), sowie Landes- und Kreisstraßen (gelb). Angabe der Geländehöhe über Meeresspiegel in m.

trägt 100 km/h. Aufgrund der touristischen Bedeutung des Mittelrheintals ist der Bus- und Kraftradverkehr vor allem an Wochenenden überdurchschnittlich hoch. Auf der Bundeswasserstraße Rhein herrscht ein erheblicher Verkehr mit Güterbinnenschiffen. Genaue Verkehrszahlen liegen für den betreffenden Flussabschnitt nicht vor. Oberwesel liegt zudem unterhalb von Anflugrouten auf die Verkehrsflughäfen Frankfurt am Main (EDDF) und Hahn (EDFH).

Einen Überblick über die vom Bahnverkehr im Bereich Oberwesel verursachten Mittelungspegel L_{DEN} und L_{Night} vermittelt die Lärmkartierung entsprechend der 34. BImSchV, die vom Eisenbahn-Bundesamt bereitgestellt wird¹⁾. Danach werden weite Teile der Stadt Oberwesel mit einem Schallpegel $L_{DEN} \geq 70$ dB bzw. $L_{Night} \geq 60$ dB beaufschlagt. Dort, wo die Wohnbebauung bis an die linksrheinische Bahnstrecke heranreicht, gilt sogar $L_{DEN} \geq 75$ dB bzw. $L_{Night} \geq 70$ dB.

Die Lärmwirkung umfasst physiologische oder psychologische Reaktionen von Betroffenen auf unerwünschten Schall. Sie ist damit das Ende der Wirkungskette von der Entstehung über die Ausbreitung des Schalls, wie sie im Projekt untersucht wurde. Im Rahmen psychologischer Effekte wird der Belästigungsgrad als eine Form der Sekundärreaktion ermittelt. Zur Langzeit-Lärmbelästigung wurden Fragebögen an 1 457 Haushalte in Oberwesel verteilt. 380 Fragebögen wurden retourniert, von denen sich 340 als aus-

wertbar erwiesen. Basierend auf den Empfehlungen der International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN) wurde die Belästigung der Anwohner durch die Frage „Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen zu Hause denken, wie stark haben Sie sich durch Lärm von den folgenden Lärmquellen gestört oder belästigt gefühlt?“ mit den Antwortmöglichkeiten 1 = „überhaupt nicht“ bis 5 = „äußerst“ erhoben [2]. Es ergab sich folgendes Bild: Bahnlärm führt mit einer mittleren Bewertung von $M = 3,7$ bei einer Standardabweichung von $SD = 1,3$. Es folgen als Lärmquellen Straßenfahrzeuge ($M = 2,6$, $SD = 1,1$), Flugzeuge ($M = 2,0$, $SD = 1,0$), Schiffe ($M = 1,7$, $SD = 0,9$), Nachbarn ($M = 1,5$, $SD = 0,8$), Baustellen ($M = 1,5$, $SD = 0,7$) und Gewerbe ($M = 1,3$, $SD = 0,7$). Beim Bahnlärm fühlten sich 34,8 % äußerst, 28,3 % stark, 13,6 % mittelmäßig, 15,6 % etwas und 7,7 % überhaupt nicht belästigt. Der Prozentsatz der durch Bahnlärm hoch belästigten Personen (Kategorien „stark“ und „äußerst“) übersteigt mit 63 % deutlich den bundesweiten Durchschnitt (2 %) sowie Befragungsergebnisse, die einen größeren Bereich des Mittelrheintals abdeckten (45 %) [1]. Einschränkung muss jedoch berücksichtigt werden, dass Effekte der Selbstselektion aufgrund des erforderlichen aktiven Zurücksendens des Fragebogens nicht ausgeschlossen werden können.

Im Zeitraum vom 7. bis 12. Mai 2012 fanden koordinierte Messungen und Erhebungen im Bereich Oberwesel statt (**Bild 1**). Stationäre Messungen akustischer Parameter (LAF , Terzspektren) und meteorologischer Parameter (Wind, Temperatur, Feuchte, Druck) fanden an der Position P01 auf der Rheinmole zwischen den beiden Bahnstrecken und an der Position P02 auf der Hardt, 200 m oberhalb des Rheins, jeweils 4 m über Grund statt. Stationäre Emissionsmessungen mit einem Array, bestehend aus 19 in einer Linie angeordneten Mikrofonen, fanden an der Position E direkt neben der linksrheinischen Bahnstrecke statt. Ebenfalls an der Position E befindet sich auch die ständige Messstelle „Oberwesel“ des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht des Landes Rheinland-Pfalz, deren Daten ebenfalls ausgewertet wurden. An den Positionen E und P01 (**Bild 2**) wurden auch Videos vorbeifahrender Züge aufgenommen, um Zugart, Länge und Geschwindigkeit zu bestimmen. Dies war allerdings nur bei Tageslicht möglich. An weiteren Positionen wurden jeweils paarweise temporäre akustische Messungen durchgeführt. Dies geschah entlang zweier Messlinien quer zum Tal (Hangprofil: P11 bis P14) und längs des Tals (Stadtprofil: P21 bis P25).

Als eine besonders wichtige physiologische Primärreaktion werden lärmbedingte Aufwachreaktionen im Schlaf verstanden. An insgesamt zehn Probanden wurden nächtliche Aufwachreaktionen ermittelt. Dies geschah mithilfe von Elektroenzephalogramm (EEG), Elektrokardiogramm (EKG) und Aktometrie. Zusätzlich wurden von den Probanden Fragebögen zur Kurzzeit-Lärmbelästigung ausgefüllt. In den Schlafzimmern der Probanden fanden

¹⁾ <http://laermkartierung.eisenbahn-bundesamt.de>

nachts Innenraummessungen des Schallpegels und vor dem Schlafraum des Probanden V1 auch durchgehend Außenraummessungen statt. Ergänzende akustische Messungen wurden während jeweils einer Nacht auch vor den Wohnungen (Balkon) der Probanden V3 und V6 durchgeführt.

Ergebnisse der Immissionsmessungen

In **Bild 3** werden typische Pegelzeitverläufe während eines zehnminütigen Zeitabschnitts (8. Mai 2012, 16:30 bis 16:40 Uhr) gezeigt. Sie werden geprägt durch zwei Güterzüge auf der rechtsrheinischen Strecke: um 16:35 Uhr ein mit 84 km/h nach Norden fahrender, 250 m langer Kesselwagen-Ganzzug, gezogen von einer Lok der Baureihe 152, und um 16:37 Uhr ein mit 85 km/h nach Süden fahrender, 264 m langer Kesselwagen-Ganzzug, bespannt mit einer Lok der Baureihe 145. Die Messungen an der nur 18 m von der Trassenmitte entfernten Position P11 (1,5 m über Grund) zeigen für die beiden Züge sehr unterschiedliche Signaturen im Pegel-Zeitverlauf und in der spektralen Verteilung, obwohl die Züge bezüglich Art, Länge und Geschwindigkeit sehr ähnlich sind. Der Maximalpegel des zweiten Zugs ist um 4 dB niedriger, obwohl sich das Richtungsgleis nach Süden sogar etwa 4 m näher an der Messposition befindet. Dieses Beispiel zeigt die hohe Variabilität der Schallemission der Züge, die nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch maßgeblich von der Bauart der Bremsen und dem Gewicht der Waggons abhängt. Die Pegel-Zeitverläufe an den Messpositionen P01 (387 m entfernt), P13 (790 m) und P02 (1 045 m) zeigen, wie das Geräusch der Züge mit der Entfernung abebbt, aber sich an der Hangposition P13 noch deutlich, allerdings ohne die hohen Frequenzanteile, und an der Position P02 auf der Hochebene noch schwach vom Hintergrundpegel abhebt.

Neben den Geräuschen der beiden Güterzüge wurden auch Kraftfahrzeug-Vorbeifahrten auf der B42 an der Position P11 registriert. Deren Maximalpegel liegt um etwa 15 dB unter denen der Züge. Allerdings sind diese Geräusche an den anderen Messpositionen nicht mehr einzeln zu identifizieren. Auffallend in den Zeitverläufen des Schallspektrums sind auch die langanhaltenden niederfrequenten (50 bis 100 Hz) und tonhaltigen Geräusche, die auf Schiffe zurückzuführen sind. Diese sind nicht nur an der Position P11, sondern auch an der Position P13 (640 m von der Flussmitte entfernt) markant im Spektrogramm erkennbar.

Die Lärmsituation im Untersuchungsgebiet wird geprägt durch die spezifischen Schallemissionen, vor allem denen des Bahnverkehrs, und die Ausbreitungsbedingungen, die einerseits von der Topografie, d. h. dem Rheintal, den Seitentälern und der Verteilung von Bebauung und Vegetation, andererseits von der zeitlich variablen lokalen Meteorologie abhängen. Die lokale Meteorologie hängt wiederum von den jeweils herrschenden großräumigen Wetterbedingungen (Wetterlage) und der Überprägung aufgrund der topografischen Verhältnisse ab. Hier kommen insbesondere die Kanalisierung der Strömung in den Tälern, die Ausbildung thermisch induzierter Hang- und Flurwinde und die Widerstandswirkung der Bebauung und der Vegetation in Betracht.

Betrachtet man die gesamte sechstägige Messperiode, so erwiesen sich die meteorologischen Bedingungen als durchaus variabel. Die Windgeschwindigkeit (4 m über Grund) bewegte sich zumeist unter 4 m/s, teilweise aber auch darüber, vor allem am Ende des Untersuchungszeitraums. Der Wind kam dabei überwiegend aus südöstlichen bis südwestlichen, zeitweise aber auch aus westlichen bis nördlichen Richtungen. Mit Ausnahme des 9. Mai 2012 war der Tagesgang der Temperatur mit einer Amplitude von 10 bis 15 Grad recht ausgeprägt. Die meteorologischen Messungen zeigten auch, wie unterschiedlich die meteorologischen Bedingungen an den ca.



Bild 2 (a) Messposition P01 (Mole) mit meteorologischer und akustischer Sensorik. (b) Messposition E (Bahnhof) mit Messstelle des Landes Rheinland-Pfalz (mittig) und linearem Mikrofon-Array (rechts) neben der linksrheinischen Bahnstrecke.

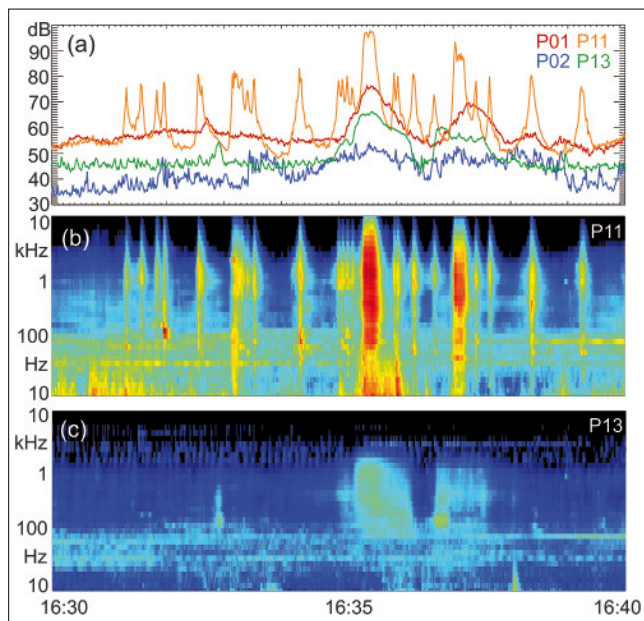


Bild 3 Zugvorbeifahrten auf der rechtsrheinischen Bahnstrecke am 8. Mai 2012. (a) Zeitverlauf des LAF an den Positionen P11 (neben rechtsrheinischer Bahnstrecke und B42), P01 (Mole), P13 (Kalvarienbergkapelle) und P02 (Hardt). Spektrogramme (Terzbänder, unbewertet) an den Positionen P11 (b) und P13 (c).

930 m voneinander entfernten Positionen (Höhenunterschied ca. 190 m) waren.

Die Zeitreihen des Schallpegels als Mittelungspegel über 1 h (LAF_{eq}) der stationären Messgeräte an den Positionen E, P01 und

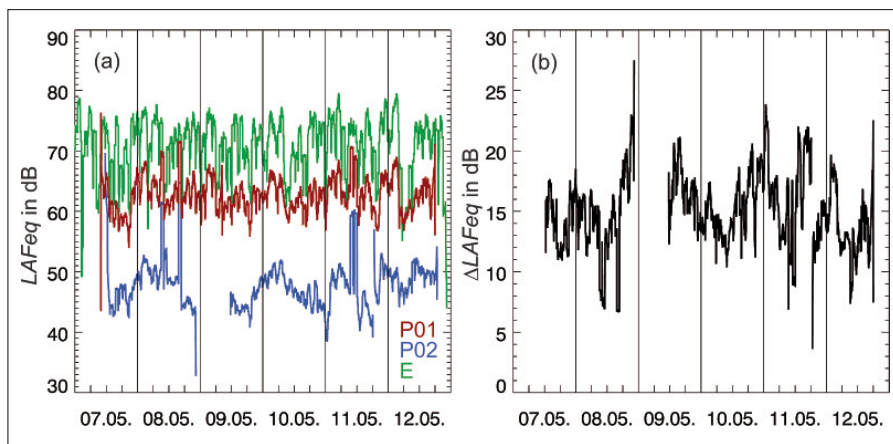


Bild 4 Zeitreihen (a) des Schallpegels LAF_{eq} (Mittelungszeit 1 h) an den Positionen E (Bauhof), P01 (Mole) und P02 (Hardt) und (b) der Differenz $LAF_{eq}(P01) - LAF_{eq}(P02)$.

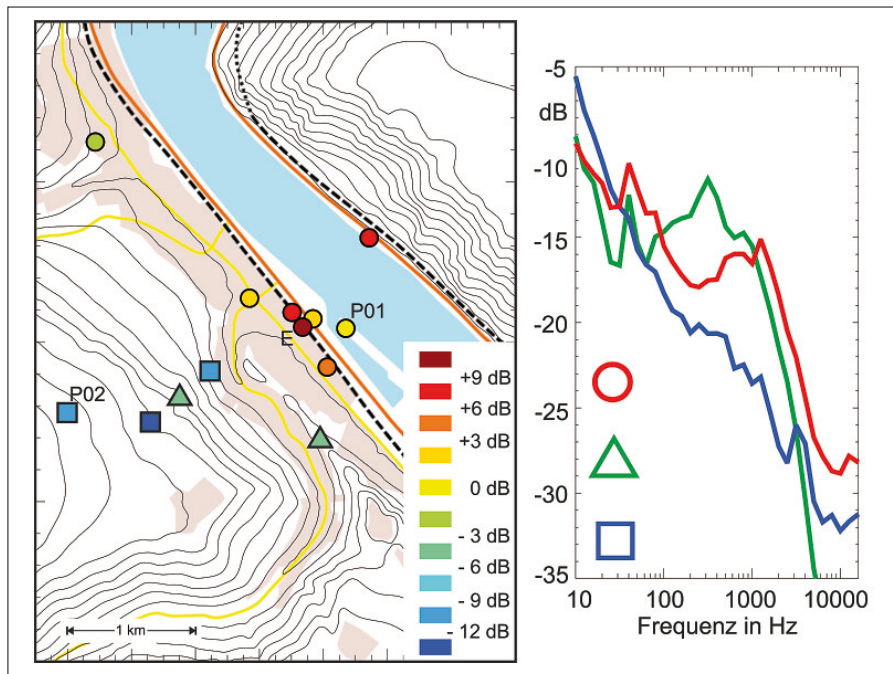


Bild 5 Mittelungspegel LAF_{eq} relativ zur Position P01 (farbcodiert) und Zugehörigkeit zu drei Gruppen spektraler Verteilung (Symbolform). Die dargestellten Spektren sind unbewertet und normiert, d. h. sie addieren sich breitbandig jeweils auf 0 dB.

P02 sind in **Bild 4** dargestellt. Die Langzeitmittelungspegel LAF_{eq} an diesen Positionen während der sechstägigen Messperiode betragen für E: 72,8 dB, P01: 63,8 dB und P02: 52,0 dB; die L_{DEN} -Werte für E: 80,1 dB, P01: 70,8 dB und P02: 55,8 dB. Die L_{DEN} -Werte stimmen gut mit denen der veröffentlichten Lärmkartierung überein und unterstreichen die hohe Lärmbelastung des Gebiets, selbst auf der Hochebene Hardt (P02). Auch fällt auf, dass es aufgrund des stetigen Bahnverkehrs kaum einen Tagesgang im Pegelverlauf gibt. Weitgehend gilt dies auch für die emissionsferne Position P02. Die markanten Pegelspitzen an beiden Positionen wurden von militärischen Tiefflügen verursacht. Die Differenz der Pegel zwischen P01 und P02 schwankt relativ stark. Diese Schwankungen gehen auf unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen (von den Emissionen im Tal hoch zur Hardt) zurück, aber auch auf einige wenige lokale Quellen nahe P02 (vor allem Vögel).

Durch die Einbeziehung der temporären Messungen mit zwei mobilen Schallpegelmessern an den Positionen P11 bis P14 und P21 bis P25 erhält man Informationen über die Fläche, allerdings nur auf Stichprobenbasis. Auch konnten die temporären Messungen aus logistischen Gründen nur tagsüber durchgeführt werden. Im **Bild 5** sind die Ergebnisse daher nur relativ zum Pegel an der Basisposition P01 (Mole) dargestellt. Auffällig sind die hohen Pegel an den Hanglagen (P13, 24, 25).

Teilt man die mittlere Spektralverteilung mithilfe einer k-means-Clusteranalyse in drei Gruppen, so erkennt man, dass die emissionsnahen Messpositionen einen hohen Anteil an Frequenzen zwischen 500 und 2 000 Hz aufweisen, also dem Maximum der Straßen- und Schienenverkehrsemissionen. Die emissionsfernen Positionen haben naturgemäß einen hohen niederfrequenten Anteil. Was den hohen Anteil von Frequenzen um 300 Hz der dritten Gruppe verursacht, konnte nicht geklärt werden.

Modellsimulationen und Screening

Um die meteorologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet und ihre Auswirkungen auf die Schallausbreitung besser interpretieren zu können, wurden meteorologische und daran gekoppelte akustische Modellsimulationen durchgeführt [3]. Die meteorologischen Simulationen wurden mit dem mesoskaligen Modell FITNAH [4] in einem $6,4 \times 6,4$ km² großen Gebiet durchgeführt, das den in Bild 1 gezeigten Gebietsausschnitt einschließt. Die horizontale Auflösung betrug 80 m. Insgesamt wurden 432 Simulationen für generische großräumige meteorologische Bedingungen durchgeführt, nämlich für zwölf Geschwindigkeits- und zwölf

Richtungsklassen des geostrophischen Windes (alle 30° Sektoren, geostrophische Geschwindigkeit zwischen 2 und 30 m/s), sowie drei Stabilitätsklassen der thermischen Schichtung (neutral, stabil, labil). Der „geostrophische Wind“ repräsentiert dabei den großräumigen horizontalen Luftdruckgradienten entsprechend der Lage und Stärke der relevanten Hoch- und Tiefdruckgebiete. Die Ergebnisse der 432 Simulationen bilden die möglichen akustisch relevanten Werte der vertikalen Wind- und Temperaturgradienten flächendeckend und für alle Schallausbreitungsrichtungen ab.

In **Bild 6** sind die Ergebnisse dieser Simulationen (bodennahe Windgeschwindigkeit und -richtung) an den Positionen P01 und P02 zusammen mit den gemessenen Werten dieser Stationen (10-min-Mittelwerte) dargestellt. Die Streudiagramme veranschaulichen nicht nur den Zusammenhang zwischen den meteorologischen Bedingungen im Tal (P01) und auf der Hochebene

(P02), sondern zeigen auch, dass die Modellsimulationen den gemessenen Parameterraum gut abdecken. Dies gilt insbesondere auch für die Kanalisierungen der Strömung im Rheintal. Natürlich decken die Simulationen auch Situationen ab, die im Messzeitraum nicht vorgekommen sind. Es gibt aber auch Defizite, d. h. gemessene Situationen, die nicht oder nur unzureichend von den Simulationen repräsentiert werden: So ist der Schwerpunkt der Kanalisierung im Rheintal bei nördlicher Strömung richtungsmäßig um 20 bis 30° versetzt, und es treten bei gegebener Windgeschwindigkeit auf der Hochebene hohe Windgeschwindigkeiten im Tal auf, die von den Simulationen nicht abgedeckt sind. Beide Defizite können an kleinräumigen Bedingungen liegen, die vom Modell bei 80 m Auflösung nicht erfasst wurden – z. B. die exponierte Lage der ca. 8 m hohen Mole und die Nähe der Bäume des nördlich der Mole gelegenen Rheinuferparks.

Numerische Schallausbreitungssimulationen wurden mit Emissionen der beiden Bahnstrecken als Linienquellen für alle meteorologischen Situationen durchgeführt, die im betrachteten Sechstage-Zeitraum vorkamen. Dabei wurde jeweils diejenige simulierte meteorologische Situation herangezogen, für die an den Positionen P01 und P02 die beste Übereinstimmung mit den dortigen Messungen bestand. Die Schallausbreitungssimulationen wurden dreidimensional mit einem prognostischen, auf den Eulergleichungen basierenden Finite-Differenzen-Modell [5] in dem in Bild 1 dargestellten Gebiet mit der bei der gegebenen Rechnerkapazität bestmöglichen räumlichen Auflösung von 6,25 m durchgeführt. Diese Auflösung ermöglichte allerdings nur die Berechnung von Infraschall bis 10,9 Hz. Wie in [3] demonstriert wurde, reicht dies aber aus, um die topografisch-meteorologischen Einflüsse zumindest qualitativ zu beurteilen, z. B. um herauszufinden, welche Gebiete durch die Topografie immissionsmäßig begünstigt oder benachteiligt sind, bzw. welches Gebiet immissionsmäßig mehr oder weniger sensibel auf die meteorologische Variabilität reagiert.

Als Ergebnis zeigt **Bild 7**, welche Gebiete von der gegebenen Verteilung der Geländehöhe (Orografie) durch Abschattungen hinter konvexen Geländeformen profitieren oder durch Mehrfachreflexionen im Bereich konkaver Geländeformen benachteiligt sind. Betrachtet man die Emissionen der beiden Bahnstrecken getrennt, so führen sie jeweils an den gegenüberliegenden Talhängen zu erhöhten Immissionen. So werden die Hanglagen in Oberwesel vor allem von der rechtsrheinischen Bahnstrecke beeinträchtigt. Die

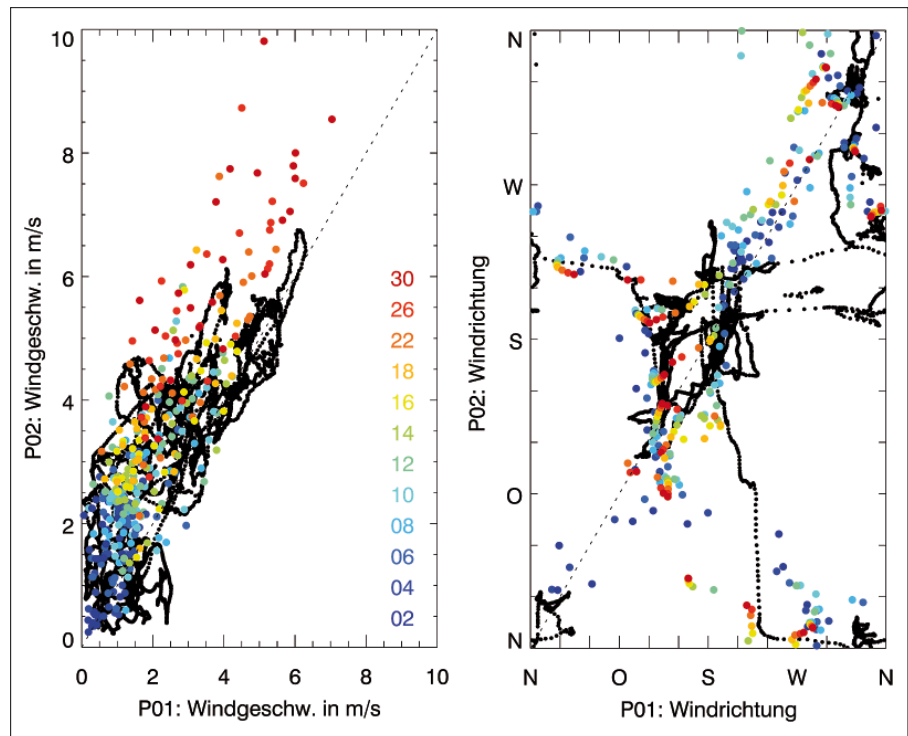


Bild 6 Streudiagramme mit den im Zeitraum vom 7. bis 12. Mai 2013 gemessenen 1-Stunden-Vektormittelwerten der Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) an den Positionen P01 (Mole) und P02 (Hardt) als schwarze Punkte. Farblich sind die an diesen Positionen berechneten Werte aus allen 432 mesoskaligen Simulationen eingetragen. Die Farbskala gibt die geostrophische Windgeschwindigkeit in m/s an.

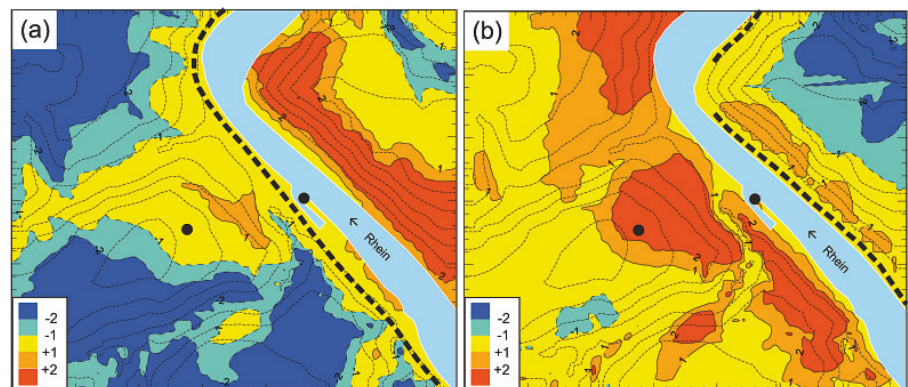


Bild 7 Mittels Modellsimulation berechneter relativer Einfluss der Orografie auf die Schallimmission in Einheiten der räumlichen Standardabweichung für die Emissionen der links- (a) und rechtsrheinischen (b) Bahnstrecke. Die Farben signalisieren eine Verstärkung (rötlich) bzw. Abschwächung (bläulich) der Schallimmission gegenüber flachem Gelände.

Simulationen bestätigen auch die erhöhten relativen Schallpegel der Hanglagen in Bild 7. In ähnlicher Weise lassen sich auch die Gebiete ermitteln, in denen die mit dem Wetter wechselnden meteorologischen Schallausbreitungsbedingungen bei gegebener Emission des Bahnverkehrs zu hohen Schwankungen der Schallimmission führen. **Bild 8** zeigt, dass dies vor allem auf der Hochebene der Fall ist. Auch wenn hier die Schallpegel aufgrund der Entfernung zu den Bahnstrecken nicht mehr so hoch sind, gibt es Wetterlagen, die auch hier zu hohen Belastungen führen, wie die Messungen an der Position P02 bestätigten.

Die hier angewandte Methodik ermöglicht ein effizientes Screening eines Untersuchungsraums im Hinblick auf die topogra-

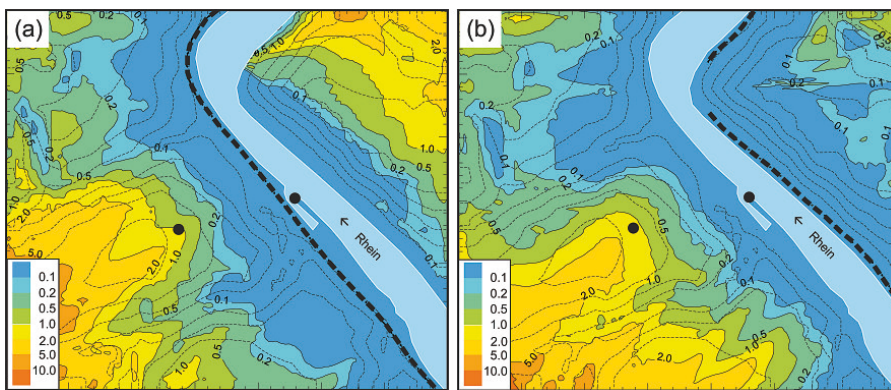


Bild 8 Mittels Modellsimulation berechnete meteorologisch bedingte Variabilität der Schallimmission in Einheiten der räumlichen Standardabweichung für die Emissionen der links- (a) und rechtsrheinischen (b) Bahnstrecke.

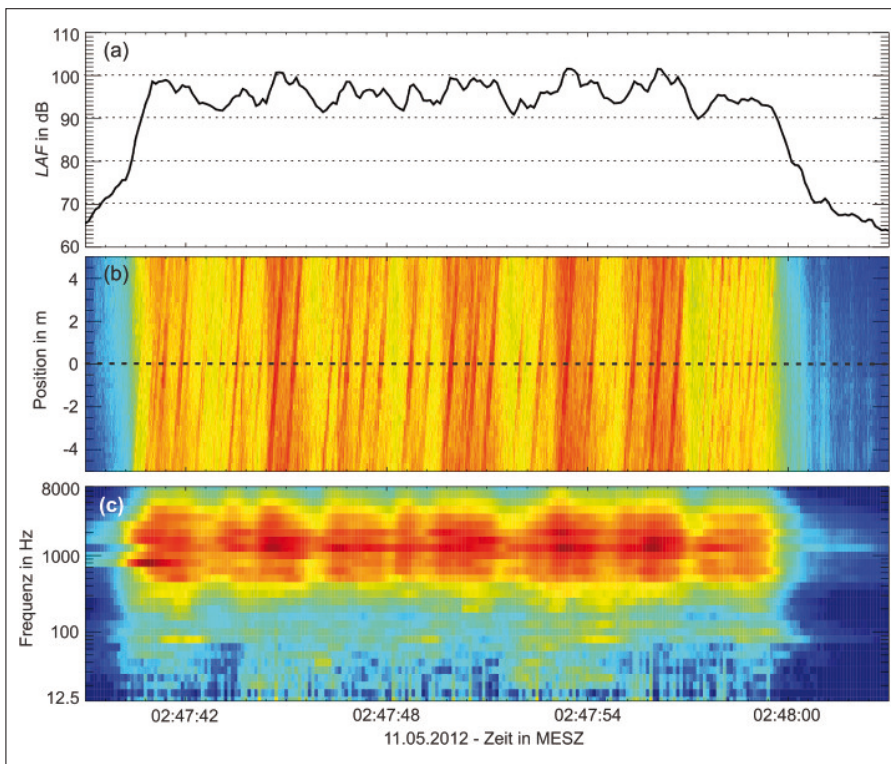


Bild 9 Aufzeichnungen der Güterzug-Vorbeifahrt 69 auf der linksrheinischen Bahnstrecke an der Position E mit dem Mikrofon-Array: (a) Zeitverlauf des Schallpegels LAF in dB. (b) Zeitverlauf des Schallpegels entlang eines 10 m langen Gleisabschnitts. Das Array befindet sich auf Höhe der Position 0. (c) Spektrogramm auf der Basis von Terzbändern ohne Frequenzwichtung.

fischen und meteorologischen Einflüsse auf die Schallimmission. Nicht zuletzt lassen sich kritische Gebiete und Wetterlagen identifizieren, die je nach Lage zu erhöhten Immissionen führen.

Von der Schallemission zur Lärmwirkung – ein Fallbeispiel

Schallemission

Die Schallemissionen wurden mit einem Mikrofon-Array neben der linksrheinischen Bahnstrecke erfasst. Dabei wurden insgesamt 19 wetterfeste Außenmikrofone in einer horizontalen, linearen Anordnung an der Außenfassade des Bauhofs der Stadt Oberwesel

angebracht (siehe Bild 2b). Die Mikrofone befanden sich in ca. 6 m Entfernung zur nächstgelegenen Schiene des Richtungsgleises Bingen der linksrheinischen Bahnstrecke. Der Abstand zur nächstgelegenen Schiene des Richtungsgleises Koblenz betrug ca. 10 m. Zur Aufzeichnung der Mikrofon-signale wurde ein Datenerfassungssystem mit Akkupuffer verwendet. Die Abtast-rate betrug 20 kHz. Das Datenerfassungssystem zusammen mit der Kontrolleinheit konnte innerhalb des Bauhofgebäudes wettergeschützt untergebracht werden. Die Messung erfolgte vollautomatisiert. Aufzeichnungen mit einer Länge von 30 s (Pre-Trigger-Zeit 5 s) wurden bei Überschreitung eines bestimmten Schalldruckpegels in dem Frequenzbereich von 4 bis 6 kHz ausgelöst. Dadurch konnten ornithologisch bedingte Fehlauflösungen weitgehend vermieden werden. Das Mikrofon-Array erlaubt neben der Berechnung der Pegelzeitverläufe und der Spektralanalyse an einem Einzelmikrofon auch die Anwendung der sog. Beamforming-Technik [6; 7]. Dabei kann der fokussierte Schalldruck für 41 äquidistante Fokuspunkte entlang der Schiene in hoher zeitlicher Auflösung (0,01 s) berechnet werden.

Synchron zu den Mikrofonmessungen wurden Videoaufzeichnungen der Bahnstrecke durchgeführt. Die optische Erfassung von Triebfahrzeug- und Wagentypen ermöglicht eine Zuordnung zu Emissionsstärke und Schalldrucksignaturen. Insgesamt wurden 1 210 Messungen an sieben Tagen durchgeführt. Davon liegen für 361 Messungen auch Videoaufzeichnungen vor, da diese tagsüber durchgeführt wurden.

Lärmwirkung

Die entwickelten Lärmwirkungsmodelle zur Aussage über physiologische Effekte berücksichtigen Maximalpegel, Dauer und Anstiegssteilheit der Lärmereignisse sowie die Schlafdauer und Schlafphase der betroffenen Person.

Zur Erfassung dieser Parameter sind daher die ganze Nacht hindurch Aufzeichnungen von akustischen und elektrophysiologischen Messungen notwendig. Der jeweilige Schallpegelmessung im Schlafzimmer der Person sowie die Datenaufzeichnung der physiologischen Ableitungen, nämlich EEG, EKG und Aktometrie, müssen zeitlich synchronisiert sein, um lärmereigniskorrelierte Berechnungen durchführen zu können [8; 9]. Dazu können korrespondierende Lärmaufzeichnungen außen, wie sie in der Studie erhoben wurden, die Grundlage bilden, konkrete Lärmquellen (Züge) als relevant für Aufwachreaktionen einzuordnen.

Um die Lärmwirkung zu erfassen, wurden nach Billigung durch die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein an acht Mess-

stellen $n = 10$ Versuchspersonen, davon fünf männlich, fünf weiblich im Alter $49,8 \text{ Jahre} \pm 18,3 \text{ Jahre}$ durch Werbung vor Ort rekrutiert. Sie wurden nach der Deklaration von Helsinki aufgeklärt und gaben ihr schriftliches Einverständnis. Diese Personen lebten in drei Bereichen in Oberwesel: sieben lebten entlang der Bahntrasse, vier im Norden und drei im Süden. Drei weitere Versuchspersonen wohnten in Hanglage, mehr als 200 m von der Trasse entfernt. Alle Versuchspersonen wurden intensiv in der Handhabung der eingesetzten Geräte geschult. Die Aufzeichnungen der Innenakustik nachts am Bett erfolgten mittels Klasse-1-Schallpegelmessern. Die physiologischen Daten wurden nach Selbstver Kabelung mittels Aktometer, EKG und vereinfachtem EEG [10] erfasst. Die Datenaufzeichnungen dauerten sieben aufeinander folgende Nächte. Die Datensicherung und Datenkontrolle erfolgten täglich vor Ort.

Fallbeispiel

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen und der Erfassung der Wirkung werden am Beispiel einer Güterzugvorbeifahrt (Ereignis 69) dargestellt, die am 11. Mai 2012 um 2:48 MESZ auf der linksrheinischen Bahnstrecke stattfand. Auswertbare Videoaufzeichnungen des Zuges lagen wegen der Dunkelheit nicht vor. Die Aufzeichnungen des Mikrofon-Arrays an der Position E sind in **Bild 9** wiedergegeben. Der Pegel-Zeitverlauf (Bild 9a) in einer zeitlichen Auflösung von 0,1 s zeigt einen steilen Anstieg des LAF auf Spitzenwerte um 100 dB. Die maximale Anstiegsrate betrug 11,5 dB/s. Während der Zugvorbeifahrt schwankte der Pegel um etwa 10 dB, was auf einen inhomogen zusammengesetzten Zug hindeutet, z. B. Waggons mit konventionellen Graugussbremsklötzen und Bremsen mit K-Sohle.

Mithilfe der Auswertung der Array-Mikrofon-Aufzeichnungen konnte das Rad-Schiene-Geräusch entlang eines 10 m langen Abschnitts des Gleises erfasst und als Hovmöller-Diagramm dargestellt werden (Bild 9b). Die zeitliche Auflösung beträgt 0,01 s, die räumliche 0,25 m. Die Darstellung lässt deutlich die Geräusche einzelner Achsen erkennen. Die Vorbeifahrt dauerte 23,8 s. Aus der Schrägstellung der Signaturen lässt sich eine mittlere Geschwindigkeit des Zuges von 85,7 km/h ableiten. Daraus ergibt sich eine Länge des Zuges von 442 m. Das Array ermöglicht daher die Bestimmung von Zugeigenschaften auch während der Nacht. Die Auswertung der Array-Mikrofon-Aufzeichnungen bestätigt den inhomogenen Charakter der Schallemission des Zuges während der Vorbeifahrt.

Schließlich ist in Bild 9c der ungewichtete Spektralverlauf an der Position E in einer zeitlichen Auflösung von 0,1 s für die Terzbänder zwischen 12,5 Hz und 8 kHz wiedergegeben. Er zeigt maximale Pegel zwischen 500 und 5 000 Hz mit einzelnen tonhaltigen Zeitabschnitten, bei denen die dominierende Frequenz meist zwischen 800 und 2 000 Hz liegt, teilweise aber auch unter 100 Hz. Neben der Schallemission an der Rad-Schiene-Kontaktfläche können zu diesem Bild auch weitere Schallquellen am Zug und Luftverwirbelungen beitragen.

Die physiologische Wirkung dieser Zugvorbeifahrt wird anhand der Ergebnisse bei den Versuchspersonen V7 und V8 diskutiert. Die Wohnung dieser Versuchspersonen befand sich unweit der linksrheinischen Bahnstrecke, etwas südlich der Messposition E. Aufgrund der Nähe zur Quelle konnten Ausbreitungseffekte außer Acht gelassen werden. Im **Bild 10a** sind die Pegelverläufe in einem 2,5 s dauernden Zeitabschnitt vor, während und nach der Vorbeifahrt an der Position E, P01 (Mole) und im Schlafraum der Versuchspersonen bei gekipptem Fenster wiedergegeben. Hierzu wurde aufgrund des Versatzes der Positionen E und P01 entlang der

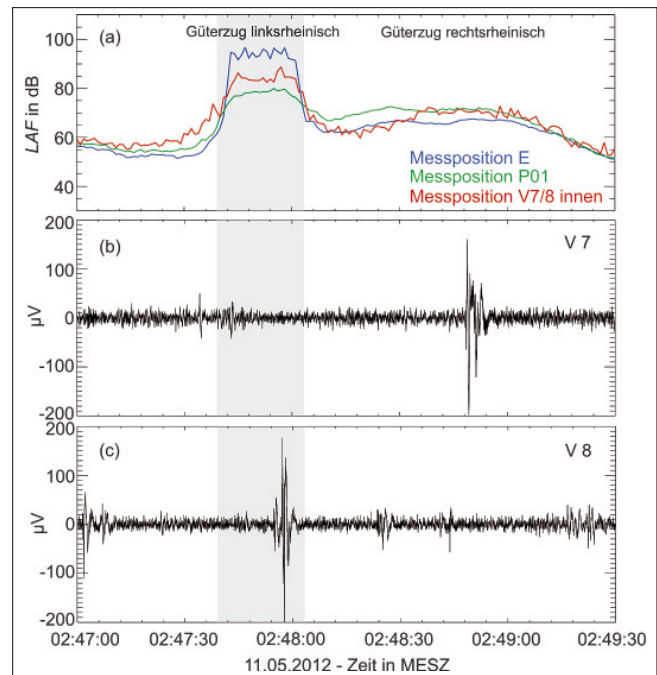


Bild 10 Pegel-Zeit-Verläufe der Güterzug-Vorbeifahrt 69 (grau unterlegter Bereich) und einer weiteren Vorbeifahrt, gemessen an den Positionen E (Station RLP), P01 (Mole) und im Schlafzimmer der Versuchspersonen V7 und V8 (a), sowie EEG-Signale der Versuchspersonen V7 (b) und V8 (c).

Strecke die Zeitachse der dortigen Messungen so verschoben, dass sie mit den Messungen im Schlafraum der V7/8 synchron erscheinen. Die drei Kurven zeigen aufgrund des unterschiedlichen Abstands zur Bahnstrecke auch unterschiedliche Maximalpegel und Pegelan- und abstiege an den Flanken. Eine Minute nach dem Ereignis 69 auf der linksrheinischen Strecke passierte ein weiterer Güterzug die Messpositionen auf der rechtsrheinischen Strecke. Dieser wesentlich weiter von den Messpositionen entfernte Zug weist einen um ca. 30 dB niedrigeren Maximalpegel auf und ein zeitlich über fast 1 min gestrecktes akustisches Signal. Erstaunlicherweise erreicht der von diesem Zug verursachte Innenraumpegel geringfügig höhere Werte als an der näher zur Strecke gelegenen Position P01. Ursache hierfür könnten günstigere Ausbreitungsbedingungen und Reflexionen an benachbarten Häusern sein.

Als Beispiel für die physiologische Reaktion der Versuchspersonen werden die EEG-Aufzeichnungen in Bild 10b und 10c gezeigt. Die beiden Versuchspersonen erleben jeweils einen Übergang vom REM-Stadium des Schlafs („Traumschlaf“) zum Schlafstadium 1, allerdings zu unterschiedlichen Zeitpunkten: bei V8 während der lauten Vorbeifahrt des Zuges 69, bei V7 dagegen fast eine Minute später und eher im zeitlichen Zusammenhang mit der Vorbeifahrt des Zuges auf der gegenüberliegenden Rheinseite. Definiert wird als Aufwachreaktion der Übergang von einem Schlafstadium (Stadium 2 bis 4 oder REM) zum Schlafstadium 1 oder nach „wach“ [8; 11]. Innerhalb einer Nacht werden mehrere Zyklen aller Schlafstadien erlebt, und etwa 20, meist nicht erinnerte Aufwachreaktionen sind normal. Eine Aufwachreaktion infolge einer externen Störung kann bis zu 90 s nach dem Ereignis erfolgen. Die Auswertung der nächtlichen Aufzeichnungen beruht primär auf der visuellen Interpretation des EEG, die darüber hinaus auch die Daten von elektrischen Ableitungen an Augen (Elektrookulogramm EOG) und Kinnmuskulatur (Elektromyogramm EMG) ein-

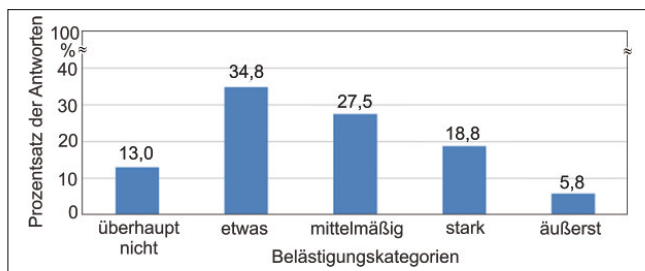


Bild 11 Prozentuale Verteilung der nächtlichen Belästigungsbeurteilung („Wie stark haben Sie sich durch den Bahnlärm der vergangenen Nacht gestört oder belästigt gefühlt?“) gemittelt über sechs Nächte.

schließt. Die EKG- und Aktometerdaten dienen zur Absicherung im Falle von Artefakten.

Psychologische Lärmwirkungen

Die psychologischen Wirkungen nächtlichen Bahnlärms wurden an denselben zehn Probanden in Form von Belästigung und subjektiver Einschätzung des Schlafs jeden Morgen nach dem Aufwachen mittels Fragebogen erfasst. Im Hinblick auf diese Effekte sind insbesondere der im Schlafzimmer gemessene energieäquivalente Dauerschallpegel (LAF_{eq}) und die Anzahl der Lärmereignisse während der gesamten Nacht von Relevanz. Darüber hinaus spielen auch nicht akustische Parameter (z.B. Lärmempfindlichkeit) der betroffenen Personen eine Rolle, die ebenfalls durch einen Fragebogen erhoben wurden.

Aufgrund des exemplarischen Charakters der Studie mit geringer Stichprobengröße kann lediglich eine deskriptive Darstellung und Interpretation der Ergebnisse erfolgen und keine Expositions-Wirkungsbeziehung zur nächtlichen Bahnlärmbelästigung erstellt werden [12]. **Bild 11** zeigt die prozentuale Verteilung der durch den Bahnlärm der vergangenen Nacht hervorgerufenen Belästigung über die Antwortkategorien der fünfstufigen Belästigungsskala (1=„überhaupt nicht“; 5=„äußerst“ belästigt, in Anlehnung an die standardisierte Frage zur Langzeitbelästigung). In 25% der untersuchten Nächte fühlten sich die Probanden während des Untersuchungszeitraums hoch belästigt (Kategorien 4/5 bzw. „stark“ / „äußerst“). Im Mittel ergab sich ein Wert von $M = 2,7$ ($SD = 1,1$). Im **Bild 12** ist die nächtliche Belästigung und die subjektive Aufwachhäufigkeit durch Geräusche von Zügen in Abhängigkeit

von den Wohngebieten (siehe Bild 1) mit unterschiedlicher nächtlicher akustischer Belastung dargestellt.

Die stärkste Belastung im Wohngebiet an der Südtrasse spiegelt sich in den höchsten subjektiven Belästigungsurteilen sowie subjektiv eingeschätzten Aufwachhäufigkeiten wider. Die Probanden fühlten sich „stark belästigt“ und führten in 50% der Fälle zwei- bis viermal pro Nacht ihr Erwachen auf Geräusche von Zügen zurück (vgl. Bild 12). Zwischen den Gebieten Nord und Hang sind hingegen trotz unterschiedlicher akustischer Belastung ähnliche oder sogar gegenläufige Reaktionen erkennbar. Dies kann möglicherweise auf interindividuelle Unterschiede hinsichtlich der nicht-akustischen Variablen zurückgeführt werden. So heben sich die untersuchten Probanden am Hang im Vergleich zum Wohngebiet Nord deskriptiv betrachtet durch eine leicht höhere Lärmempfindlichkeit hervor (Hang: Median (Md) = 23, Spannweite (R) = 1 – Nord: Md = 20, R = 7; mögliche Skalensummenwerte von 6 bis 30) und eine höhere Einstufung der eigenen Gesundheitsschädigung durch Bahnlärm (Hang: Md = 4, R = 2 – Nord: Md = 3, R = 3; Skala von 1 = „nicht“ bis 5 = „sehr“). Diese Ergebnisse betonen die Relevanz nicht akustischer Einflussfaktoren, sind jedoch aufgrund der geringen Versuchspersonenanzahl nur äußerst eingeschränkt interpretierbar.

Darüber hinaus wurde die Belästigung der untersuchten Anwohner auch tagsüber erhoben, indem die Probanden in einem dreistündigen Intervall (im Zeitraum ab 9:00 Uhr bis zum Zeitpunkt vor dem Zubettgehen) rückwirkend ihre Störung und Belästigung durch Bahnlärm angaben. Die Daten wurden nur für die Messzeitpunkte ausgewertet, an denen die Probanden angaben, sich im Haus bzw. außerhalb des Hauses in der Wohngegend aufgehalten zu haben (231 von 382 Messzeitpunkten). Ähnlich wie bei der nächtlichen Belästigung fühlten sich die Probanden in 29% der erhobenen Zeiträume durch den Bahnlärm hoch belästigt ($M = 2,8$ und $SD = 1,2$). Die Belästigung im Wohngebiet Süd ($Md = 4$, $R = 2$) ist deskriptiv betrachtet wiederum stärker ausgeprägt als in den Wohngebieten Nord und Hang ($Md = 2$, $R = 3$).

Schlussbemerkungen

Zielführende Lärmschutzmaßnahmen in einem Lärmbelastungsgebiet hängen von vielen Faktoren ab:

- der Art und Charakteristik der Schallquellen und den Möglichkeiten diese zu reduzieren,

- den Schallausbreitungsbedingungen, die insbesondere in Gebieten mit hoher topografischer Komplexität räumlich und zeitlich stark variieren, und schließlich

- den Wohnsituationen der Bevölkerung und deren Sensibilität bezüglich Lärm.

Zur ganzheitlichen Beurteilung der „Lärmsituation“ in einem Gebiet reichen punktuelle Messungen der Schallimmission oder Kartierungen mit einer Standardberechnungsmethode vielfach nicht aus. Vielmehr sollten die anderen oben genannten Faktoren mit erfasst werden. Eine in die Fläche gehende Betrachtung unter Einbeziehung der gesamten Prozesskette „Emission – Ausbreitung – Immission – Wirkung“ muss sich zwar zwangsläufig auf einen begrenzten, nach Möglichkeit repräsentativen Zeitraum beschränken, liefert aber

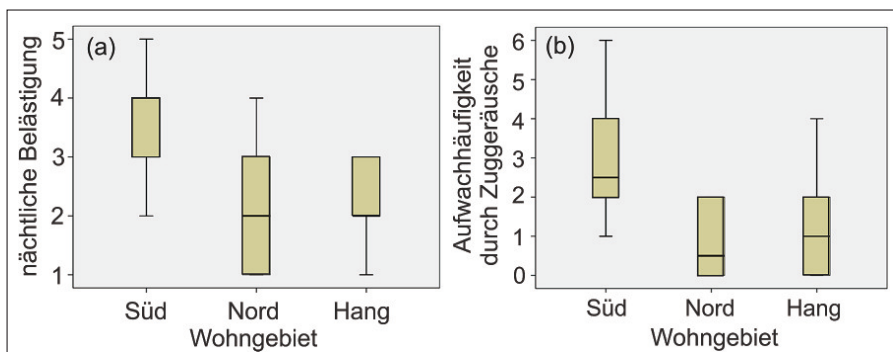


Bild 12 (a) Nächtliche Belästigung („Wie stark haben Sie sich durch den Bahnlärm der vergangenen Nacht gestört oder belästigt gefühlt?“ 1=„überhaupt nicht“ bis 5=„äußerst“) und (b) nächtliche Aufwachhäufigkeit (Anzahl) durch Zuggeräusche („Wie häufig sind Sie in der vergangenen Nacht durch Geräusche von Zügen geweckt worden?“) für sechs Nächte in Wohngebieten mit unterschiedlicher nächtlicher akustischer Belastung (siehe Bild 1): Süd: 75 Züge, $LAF_{eq} = 50,3$ dB, Nord: 68 Züge, $LAF_{eq} = 46,4$ dB, Hang: 46 Züge, $LAF_{eq} = 31,8$ dB.

dennoch wertvolle Erkenntnisse, die über die Möglichkeiten eines punktuellen Monitorings oder einer Standardlärmmkartierung weit hinausgehen, letztere aber auch sinnvoll ergänzen. Die vorliegende Studie gibt Hinweise, wie hierfür zusätzliche Messungen der Schallemission mit moderner Technologie (z. B. ein Mikrofon-Array), die Erfassung meteorologischer Parameter, in die Fläche gehende Schallimmissionsmessungen und ergänzende numerische Modellsimulationen sowie Befragungen der Bevölkerung zur Lärmbelastigung und Untersuchungen des Lärmeinflusses auf den Schlaf in ausgewählten Wohngebieten genutzt werden können. Welche Methoden und Auswertungen schlussendlich sinnvoll sind, hängt natürlich vom betrachteten Gebiet und der jeweiligen Fragestellung ab.

Danksagungen

Wir danken der Stadt Oberwesel, insbesondere Herrn Stadtbürgermeister *J. Port* und den Mitarbeitern des städtischen Bauhofs für ihre ideelle und logistische Unterstützung. Ferner danken wir allen Versuchspersonen für ihre Mitarbeit sowie *M. Vejvoda* und *S. Schmitt* für ihren Einsatz und ihre wertvolle Unterstützung vor Ort und *I. Rieger* für die kompetente EEG-Auswertung und Datenaufbereitung. Unser Dank gilt auch *J. Feng* und *S. Dietz* für ihre Mithilfe bei den Messungen der Schallimmission und der Meteorologie. Schallimmissionsdaten der Lärmmessstelle „Oberwesel“ wurden freundlicherweise vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht des Landes Rheinland-Pfalz zur Verfügung gestellt.

Dietrich Heimann, Arthur Schady,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Weßling.
Klaus Ehrenfried, Arne Henning,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen.
Eva-Maria Elmenhorst, Hartmut Maaß, Uwe Müller, Sibylle Pennig,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.

Literatur

- [1] *Giering, K.; Schreckenberger, D.; Augustin, S.; Eberle, W.; Möller, G.; Barth, R.*: Perspektiven für den Lärmschutz bei der Bahn: „10-Punkte Programm Leises Rheintal“, und „Mittelrheintal Bahnlärm-Index“. *Lärmbekämpf.* 6 (2012) Nr. 4, S. 154-165.
- [2] *Fields, J. M.; De Jong, R. G.; Gjestland, T.; Flindell, I. H.; Job, R. F. S.; Kurra, S.; Lercher, P.; Vallet, M.; Guski, R.; Felscher-Suhr, U.; Schuemer, R.*: Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *J. Sound Vib.* 242 (2001), S. 641-679.
- [3] *Heimann, D.*: Wide-area assessment of topographical and meteorological effects on sound propagation by time-domain modeling. *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (2013), S. 419-425.
- [4] *Gross, G.*: Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dyn. Res.* 10 (1992), S. 483-498.
- [5] *Heimann, D.; Karle, R.*: A linearized Euler finite-difference time-domain sound propagation model with terrain-following coordinates. *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (2006), S. 3813-3821.
- [6] *Lauterbach, A.; Ehrenfried, K.; Loose, S.; Wagner, C.*: Aeroacoustics of a high-speed train double model at high Reynolds numbers. Civil-Comp Press and Saxe-Coburg Publications. Railways 2012: The First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 18.-20. Apr. 2012, Las Palmas de Gran Canaria, Spanien (2012).
- [7] *Lauterbach, A.; Ehrenfried, K.; Loose, S.; Wagner, C.*: Microphone array wind tunnel measurements of Reynolds number effects of high-speed train aeroacoustics. *Int. J. Aeroacoustics* 11 (2012), S. 411-446.
- [8] *Elmenhorst, E. M.; Pennig, S.; Rolny, V.; Quehl, J.; Mueller, U.; Maaß, H.; Basner, M.*: Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: sleep, psychomotor performance, and annoyance. *Sci. Total Environ.* 424 (2012), S. 48-56.
- [9] *Quehl, J.; Müller, U.; Maass, H.; Pennig, S.; Rolny, V.; Basner, M.; Elmenhorst, E. M.*: Dosis-Wirkungsbeziehungen aus einer Feldstudie zur Wirkung nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf, die psychomotorische Leistung und die Belästigung. *Lärmbekämpf.* 6 (2011) Nr. 5, S. 188-196.
- [10] *Werth, E.; Borbély, A. A.*: Recording the sleep EEG with periorbital skin electrodes. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 94 (1995), S. 406-413.
- [11] *Basner, M.; Isermann, U.; Samel, A.*: Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (2006), S. 2772-2784.
- [12] *Pennig, S.; Quehl, J.; Mueller, U.; Rolny, V.; Maaß, H.; Basner, M.; Elmenhorst, E. M.*: Annoyance and self-reported sleep disturbance due to night-time railway noise examined in the field. *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (2012), S. 3109-3117.