

Ökoakustik: Bedeutung von Sound für Ökosysteme

Sandra Müller

Die ökologische Rolle von Sound in der Landschaft

Klang ist allgegenwärtig: Vom Summen der Insekten über das Rauschen des Windes bis hin zu anthropogenen Geräuschen prägen Soundscapes unsere Umwelt. Natürliche Soundscapes bieten nicht nur ästhetische und sinnliche Qualitäten, sondern sind auch wichtige Indikatoren für ökologische Prozesse. Die relativ junge Disziplin der Ökoakustik untersucht akustische Dimensionen der Landschaft, um ihre Bedeutung für Artenvielfalt, Habitatwahl und Interaktionen zwischen Organismen besser zu verstehen. Es handelt sich um eine interdisziplinäre Forschungsrichtung, die seit den wegweisenden Publikationen von Pijanowski, und Sueur aus den Jahren 2008 und 2011¹ eine beachtliche Dynamik entwickelt hat.² Sie verbindet Elemente der Landschaftsökologie, der Biodiversitätsforschung, der Stadtökologie, der Verhaltensforschung, der Bioakustik, der Psychoakustik, der Musikwissenschaft und der Klangkunst. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen der akustischen Umwelt und den darin lebenden Organismen sowie die Interaktionen innerhalb der verschiedenen akustischen Tiergemeinschaften untersucht.

Der Begriff »Soundscape« wurde vor allem von R. Murray Schafer geprägt und bekannt gemacht.³ Eine Soundscape umfasst alle Klänge einer Landschaft. Sie setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen:

- Biophonie: Geräusche lebender Organismen, wie Vogelgesang, Insektenzirpen oder das Quaken von Fröschen;
- Geophonie: natürliche, abiotische, Umweltgeräusche, wie das Plätschern eines Baches, das Rauschen des Meeres oder die Geräusche von Regen und Wind;
- Anthropophonie: vom Menschen verursachte Geräusche, wobei Verkehrslärm und Maschinengeräusche aller Art als Technophonie bezeichnet werden.

Während sich die ISO-Definition von »Soundscape« auf deren menschliche Wahrnehmung beschränkt (Soundscape: »acoustic environment as perceived or experienced and/or understood by a person or people, in context«⁴), wird der Begriff in ökologischen Studien – und auch in diesem Beitrag – konzeptionell weiter gefasst

und schließt auch die Wahrnehmung durch nicht-menschliche Organismengruppen mit ein.

Die Soundscape bildet den akustischen Lebensraum, das akustische Habitat, in dem Tiere kommunizieren, interagieren und sich fortpflanzen.⁵ Die ökologische Analyse einer Soundscape liefert wichtige Informationen über das Vorkommen von Tierarten, ihr Verhalten und ihre Interaktionen. Akustische Kommunikation ist ein wesentlicher Prozess im Lebenszyklus lautgebender Tierarten und betrifft unter anderem Fortpflanzung, Territorialverhalten, soziale Interaktion und Räuber-Beute-Beziehungen. Ein klassisches Beispiel ist der Vogelgesang. Vögel nutzen ihren Gesang als Territorialgesang, um ihr Revier zu markieren und potenzielle Partner anzulocken.⁶ Die Komplexität, Intensität und Häufigkeit des Gesangs eines Männchens⁷ kann Aufschluss über seine Fitness geben und wird daher als »ehrliches Signal« an das Weibchen über den potenziellen Fortpflanzungserfolg angesehen.⁸ Im Gegensatz zu Territorial- und Paarungsgesängen sind Warn- und Interaktionsrufe oft weniger komplex und damit weniger energieaufwendig. Solche Rufe gehen nicht nur von einem Sender an einen bestimmten Empfänger, sondern bilden Kommunikationsnetzwerke.⁹ Warnrufe spielen eine wichtige Rolle, um Artgenossen und – eher unbeabsichtigt – auch Individuen anderer Arten vor möglichen Fressfeinden zu warnen. So ist der Warnruf der Amsel vor Feinden aus der Luft (z.B. dem Sperber) ein Ruf, der dem anderer kleiner Singvögel (Meisen, Buchfinken etc.) sehr ähnlich ist und auch über Artgrenzen hinweg verstanden und interpretiert wird.¹⁰

Neben der direkten Kommunikation zwischen Individuen und Gruppen liefert das akustische Habitat auch Signale, die im Hinblick auf die Habitatwahl von den Tieren interpretiert werden. Dabei werden Informationen decodiert, die Aufschluss über die Qualität des Habitats geben, d.h. darüber, wie gut es an die Bedürfnisse eines Individuums angepasst ist.¹¹ So konnte die Studie von Szymkowiak zeigen, dass Waldlaubsänger ihre Reviere während der Brutzeit in Hörweite anderer Waldlaubsänger etablieren.¹² Mehr Augen und Ohren in der Nachbarschaft bedeuten mehr Sicherheit für das Individuum. Einige Zugvögel wählen, wie für den Amerikanischen Blaurücken-Waldsänger gezeigt wurde, ihr Habitat nach der Ankunft aus dem Winterquartier anhand von akustischen Hinweisen, d.h. den Gesängen von Artgenossen, um zu entscheiden, ob es für die erfolgreiche Aufzucht ihrer Jungen geeignet ist.¹³ Habitate ohne den Gesang der Artgenossen, die ansonsten aber die gleichen Eigenschaften aufwiesen, wurden nicht genutzt.¹⁴

Die akustische Umgebung spielt auch eine wichtige Rolle bei der Besiedlung von Korallenbänken. Obwohl Korallenriffische als Larven wochenlang im Meer leben und über viele Kilometer verstreut sein können, finden sie anhand der akustischen Hinweise eines intakten Korallenriffs einen geeigneten Lebensraum und kehren in einigen Fällen sogar an ihr Geburtsriff zurück.¹⁵ Andere Arten wiederum meiden die Geräusche von Korallenriffen, um den dort lebenden Räubern zu entkommen.¹⁶ Die Erkenntnisse aus entsprechenden Studien können nun genutzt werden, um degra-

dierte Ökosysteme mit Hilfe von Playback-Soundscapes effektiver zu restaurieren.¹⁷ Hier werden im Zuge der Renaturierung degraderter Korallenriffe diese künstlich mit Geräuschen intakter Korallenriffe beschallt.¹⁸

Die akustische Kommunikation zwischen Individuen und Tiergruppen sowie die richtige Interpretation akustischer Signale aus der Umwelt sind somit lebenswichtige Prozesse. Der akustische Raum, welcher der akustisch aktiven Tiergemeinschaft zur Verfügung steht, wird sowohl durch die abiotische Geräuschkulisse der Geophonie und Anthropophonie als auch durch die Aktivitäten anderer Tierarten – Bestandteil der Biophonie – bestimmt. Das heißt, der akustische Raum ist eine Ressource, um die Tiere konkurrieren und an die sie ihre Kommunikation sowohl durch evolutionäre als auch adaptive Prozesse anpassen, um ihre eigene akustische Nische zu finden (akustische Nischenhypothese nach Bernie Krause,¹⁹ akustische Adoptionshypothese²⁰). Die Prozesse der akustischen Nischenfindung werden am Beispiel der Soundscapes tropischer Regenwälder besonders eindrücklich. Tropische Soundscapes zeichnen sich durch eine hohe akustische Dichte aus. Insbesondere Insekten dominieren.²¹ Folglich ist die akustische Raumnutzung hinsichtlich der für die verschiedenen Gruppen relevanten Frequenzen, Tages- und Jahreszeiten sehr strukturiert. Vor allem der Frequenzbereich zwischen 2 und 8 kHz wird von Vögeln, Amphibien, Grillen und Zikaden dicht besetzt (Abbildung 1a). Um akustische Maskierung, das Überdecken eines akustischen Signals durch ein anderes, zu vermeiden, muss jede Gruppe oder Art eine andere Nischenstrategie verfolgen. So konzentrieren die meisten Vogelarten ihre Lautäußerungen auf bestimmte Tageszeiten wie die Morgen- und Abenddämmerung, wenn die Insekten weniger aktiv sind.²² Grillen stridulieren über den ganzen Tag, aber jede Art singt in einem sehr schmalen Frequenzband.²³ Zikaden dagegen sind in einem breiten Frequenzbereich aktiv, aber physiologisch an ein bestimmtes Mikroklima gebunden und daher in ihrer akustischen Aktivität auf bestimmte Tageszeiten beschränkt, die diesem physiologischen Optimum entsprechen.²⁴ Ihre Lautäußerungen umfassen das gesamte Spektrum zwischen 2 und 8 kHz (Abbildung 1a) und überlagern die meisten anderen Vokalisationen. Tropische Amphibien vokalisieren hauptsächlich vor der Paarungszeit, um Partner anzulocken. Die explosiven Fortpflanzungsereignisse und die damit verbundene akustischen Aktivitäten dauern oft nur wenige Tage, aber ihr kollektiver Chorgesang übertönt alle anderen Geräusche.²⁵

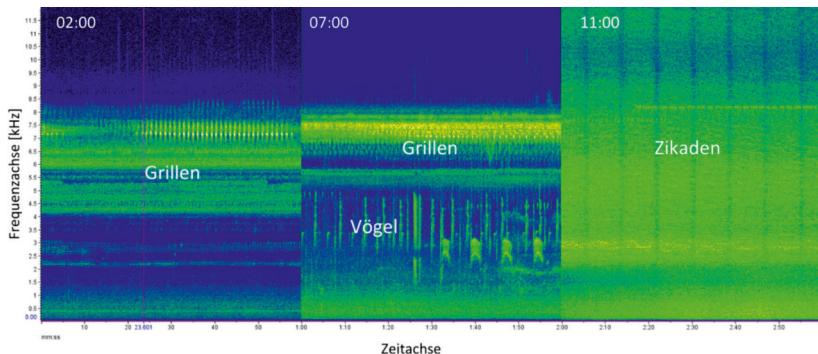
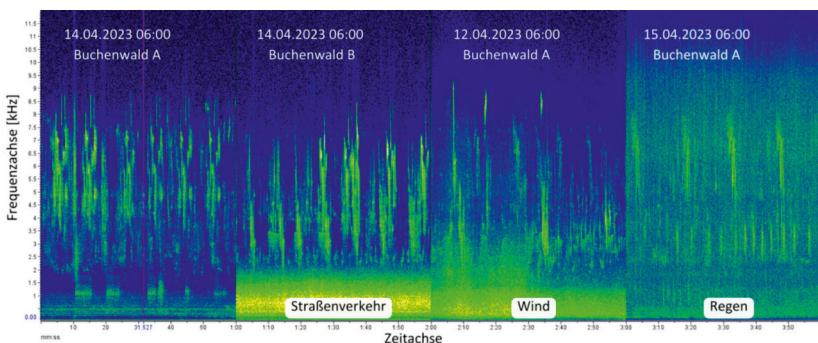


Abbildung 1: Erstellt von Sandra Müller. a) Spektrogramm von eigenen Tonaufnahmen aus dem tropischen Tieflandregenwald im Darién, Panama.²⁶



b) Spektrogramm von Tonaufnahmen aus einem Buchenwald in Hessen.²⁷

Die akustische Adoptionshypothese postuliert, dass Tonhöhe und Gesangstruktur (Silbenlänge, Rufhäufigkeit) an die akustischen Eigenschaften des Lebensraumes angepasst werden, um die Reichweite der Kommunikation zu optimieren.²⁸ Dies findet sich unter anderem bei Tieren, die natürlicherweise in lauten, geophonreichen Habitaten leben (siehe Abbildung 1b). Eine direkte Anpassung der Rufhäufigkeit an die jeweiligen Windverhältnisse konnte beispielsweise bei Königspinguinen auf den windumstösten Crozet-Inseln in der Subantarktis nachgewiesen werden.²⁹

Das akustische Habitat ist also ein integraler Bestandteil ökologischer Systeme und beeinflusst sowohl die Habitatwahl als auch das Verhalten von Arten. Tiere re-

agieren auf akustische Veränderungen und passen ihre Lautäußerungen an, um ihre akustischen Nischen zu sichern und Maskierungseffekte zu vermeiden. Neben der Geophonie zwingt auch die Zunahme des Verkehrslärms durch den Menschen (Technophonie) die Tiere zur Anpassung ihrer Lautäußerungen.

Menschliche Eingriffe in die Soundscape

Auch die durch die menschliche Ressourcennutzung ausgelösten Prozesse des Globalen Wandels, wie der Klimawandel, die Veränderung von Stoff- und Wasserkreisläufen, der Verlust von Biodiversität und die Verbreitung invasiver Arten, haben Auswirkungen auf die Ökosystemlandschaft.³⁰ Durch den Verlust von akustisch aktiven Arten verarmt die Biophonie in der Landschaft, sie wird »stiller« und akustisch weniger vielfältig; häufig ist eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung die indirekte Ursache.³¹ Eine Intensivierung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung führt direkt zu einer Verringerung der Pflanzenvielfalt und der Vegetationsstruktur und damit zu einem Verlust von Lebensräumen. So führt die Abnahme von Habitatabäumen und Totholz in Wäldern zu einer Abnahme der Vogelvielfalt und ihrer Lautäußerungen.³² Auf landwirtschaftlich genutzten Wiesen sind intensives Mähen und Düngen sowie der Verlust von Säumen und Hecken eine der Hauptursachen für den Rückgang von Insekten- und Vogelgemeinschaften in unseren Breiten, was sich ebenfalls in einer geringeren akustischen Diversität niederschlägt.³³ Auf Landschaftsebene führt die Intensivierung auch zu einer Homogenisierung der Artenzusammensetzung, d.h. in immer mehr Lebensräumen kommen die gleichen Arten vor, einzelne Wälder und Wiesen unterscheiden sich in ihrer Artenzusammensetzung nicht mehr stark. Diese Homogenisierung der Artenzusammensetzung führt letztlich auch zu einer Homogenisierung der Soundscapes;³⁴ ein Prozess, der durch den Lärm eines dichten Straßennetzes noch verstärkt wird.³⁵

Die durch den Menschen verursachte Zunahme der Anthropophonie (z.B. Verkehrslärm) und Veränderungen der Geophonie (etwa durch Landschaftsveränderungen) beeinflussen also einerseits das Gesangsverhalten der Tiere und verändern andererseits die Artenzusammensetzung (Abbildung 2). Hier bereits beschriebene Anpassungsstrategien im Gesangsverhalten umfassen Veränderungen im Frequenzbereich, im Zeitpunkt der Kommunikation sowie in der Häufigkeit und Lautstärke der Rufe.³⁶ Insgesamt müssen Tiere in lauten Umgebungen mehr Zeit und Energie für ihren Gesang aufwenden. Oder sie verbringen mehr Zeit damit, nach Feinden Ausschau zu halten, um diese in der lauten Umgebung nicht zu überhören.³⁷ Steigt der Anteil von Verkehrs- und Industrielärm, führt dies bei Tieren zu ähnlichen gesundheitlichen Auswirkungen wie beim Menschen.³⁸ Erhöhter Stress, weniger Zeit für die Nahrungssuche und vermehrte Krankheiten sind

nachgewiesene Auswirkungen von Verkehrslärm auf verschiedene Tiergruppen.³⁹ Neben dem Verlust an Biodiversität ist die Lärmbelastung wohl die direkteste Folge menschlicher Eingriffe in die Soundscapes. Und wie oben bereits angedeutet, interagieren beide Faktoren miteinander, da Lärmbelastung auch zur Abwanderung und zum Fitnessverlust von Arten führt. Wie groß der Anteil des Verkehrslärms am aktuellen Biodiversitätsverlust ist, lässt sich jedoch noch nicht abschätzen. Einige Studien konnten zeigen, dass sich Verkehrslärm auch auf Ökosystemdienstleistungen wie Bestäubung und Samenausbreitung auswirkt, insbesondere durch verkehrsbedingte Veränderungen der Artenzusammensetzung.⁴⁰

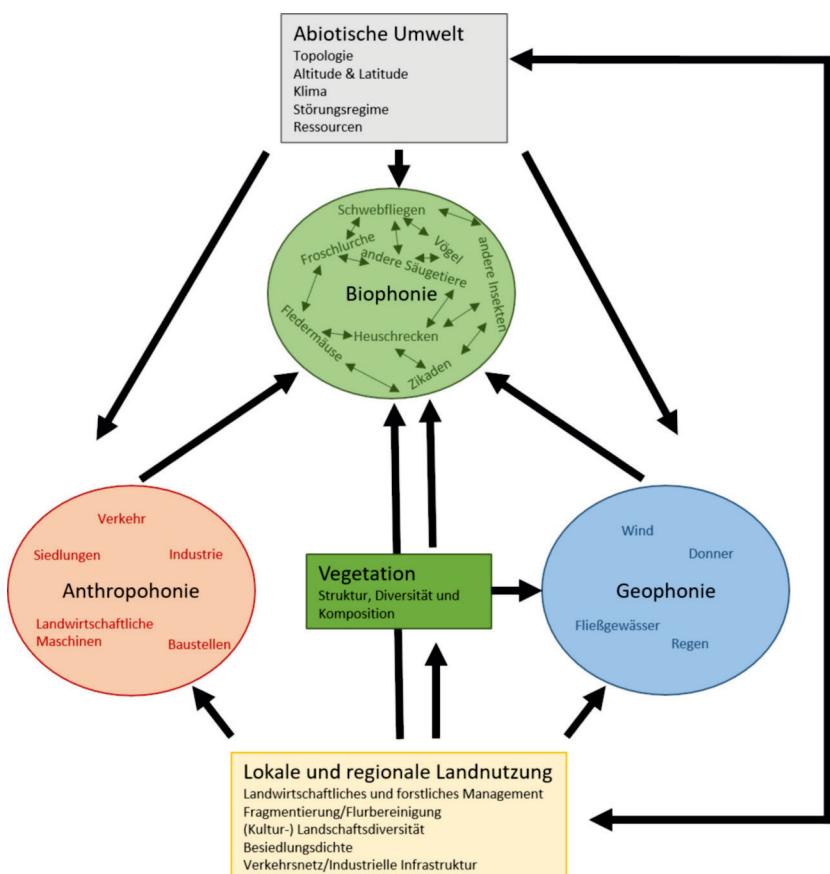


Abbildung 2: Konzeptioneller Rahmen der Soundscape-Ökologie. Flussdiagramm von Sandra Müller.⁴¹

Rückwirkungen auf Aspekte der globalen Gesundheit

Die WHO hat Verkehrslärm nach der Luftverschmutzung durch Feinstaub als zweitwichtigste umweltbedingte Ursache für Gesundheitsstörungen in Westeuropa identifiziert.⁴² Die Belastung durch Umgebungslärm kann zu Stressreaktionen, Schlafstörungen, Beeinträchtigung der psychischen Gesundheit und des Wohlbefindens, Beeinträchtigung der kognitiven Funktionen bei Kindern und negativen Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System und den Stoffwechsel führen. Umgebungslärm verursacht in Europa indirekt jährlich etwa 10 000 vorzeitige Todesfälle, indem er Erkrankungen wie Bluthochdruck und kardiovaskuläre Erkrankungen begünstigt, wobei schätzungsweise 20 Millionen Erwachsene unter Lärmbelastigung und mehr als 8 Millionen Erwachsene unter Schlafstörungen leiden. Potentiell »ruhige« Gebiete, d.h. Gebiete, die wenig von Maschinenlärm betroffen sind (< 55 dB), sind im dicht besiedelten Europa selten.⁴³ Nur etwa 18 Prozent der Landfläche Europas sind nicht von hohen Lärmpegeln betroffen, und bisher gibt es nur wenige nationale Schutzstrategien für diese potenziell noch ruhigen Gebiete, sofern sie nicht bereits Teil von Naturschutzgebieten sind (z.B. *Natura 2000*).⁴⁴ Auch der Zugang zu ruhigen Gebieten als Erholungsraum für die Bevölkerung ist ungleich verteilt und – wenig überraschend – in Ländern mit hoher Bevölkerungsdichte und in städtischen Gebieten unzureichend. Deutschland hat im EU-Vergleich den zweitniedrigsten Flächenanteil pro Einwohner*innen an potenziell ruhigen Gebieten, die innerhalb einer Stunde Fahrzeit vom Wohnort erreichbar sind.⁴⁵ Dieser kurze Exkurs verdeutlicht, dass ein verstärkter Schutz naturnaher Soundscapes nicht nur der Umwelt und der Tierwelt zugutekäme, sondern auch direkte positive Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen hätte.

Naturnahe Soundscapes zeichnen sich jedoch nicht nur durch Lärmfreiheit aus, sondern auch durch akustische Vielfalt im Sinne der biotisch vielfältigen Lautäußerungen der Tierwelt im Zusammenspiel mit der lokalen Geophonie. Dabei kommt insbesondere den Vogelstimmen eine besondere Bedeutung zu. Ihr positiver Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und verschiedene Gesundheitsaspekte (etwa Stressreduktion, Blutdrucksenkung, Wiederherstellung der Konzentrationsfähigkeit, Verbesserung der psychischen Gesundheit) ist vielfach untersucht.⁴⁶ Der Zugang zu einer artenreichen Vogelwelt und deren Gesang hat einen bedeutenden Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und insbesondere auf die psychische Gesundheit.⁴⁷ Befragungen ergaben, dass der positive Einfluss der Vogelartenvielfalt auf das Wohlbefinden von ähnlicher Bedeutung ist wie die Einkommenssituation der Befragten.⁴⁸ Eine andere Studie zeigte, dass vor allem sozioökonomisch benachteiligte Menschen überproportional von einem verbesserten Zugang zu Grünflächen, Parks und Naherholungsgebieten mit einer bioakustisch reichen Geräuschkulisse profitieren würden.⁴⁹ Menschen mit gesicherter finanzieller Situation sind tendenziell weniger stressbelastet und profitieren daher

weniger stark von der stressreduzierenden Wirkung von Naturerlebnissen, so die Autor*innen der Studie. Dabei haben auch andere Naturgeräusche, wie das Zirpen von Insekten, vor allem aber Wassergeräusche, eine positive Auswirkung auf die Gesundheit.⁵⁰ Eine Studie in US-amerikanischen Nationalparks konnte zudem zeigen, dass Naturgeräusche die negativen Auswirkungen von anthropogenem Lärm abmildern können.⁵¹

Der Einfluss von Vogelgesang und Vogelartenvielfalt auf das menschliche Wohlbefinden wurde oft nachgewiesen. Allerdings zeigt sich auch, dass dieser positive Effekt vor allem dann eintritt, wenn die Proband*innen die akustische Vielfalt auch als solche wahrnehmen. Nur Biodiversität, die wahrgenommen wird, kann auch eine positive Wirkung entfalten.⁵² Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Kindheitserinnerungen zu: Smalley et al. fanden heraus, dass die naturnahen Soundscapes noch erholsamer wirkten, wenn die Studienteilnehmenden positive Kindheitserinnerungen damit verbinden konnten.⁵³ Gleichzeitig zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der von den Proband*innen erhofften Erholungsfunktion und der Verknüpfung mit positiven Kindheitserinnerungen einerseits und der Bereitschaft, Schutzmaßnahmen für naturnahe Soundscapes zu unterstützen, andererseits.

Fazit und Ausblick

Die Wechselwirkungen zwischen dem Menschen und der ihn umgebenden Soundscape sind vielfältig. Akustische Umwelten beeinflussen maßgeblich die Kommunikation, die Habitatwahl und das Verhalten vieler Tierarten und dienen als Indikatoren für Biodiversität und ökologische Prozesse auf Landschaftsebene. Menschliche Aktivitäten, insbesondere Verkehrslärm und die Intensivierung der Landwirtschaft, können die akustische Vielfalt und damit die ökologischen Prozesse in Lebensräumen erheblich beeinträchtigen.

Der Verlust naturnaher Soundscapes schadet Mensch und Tier. Der Schutz und die Wiederherstellung solcher Soundscapes ist in Anbetracht der oben genannten Unterschiede im Zugang zu solchen Räumen auch eine Frage der sozialen und intergenerationalen Gerechtigkeit. Es ist eigentlich eine triviale Tatsache, dass der Erhalt der natürlichen Ressourcen und der biologischen Vielfalt für uns Menschen überlebenswichtig ist.⁵⁴ Dennoch bleibt diese Erkenntnis für weite Teile der Gesellschaft abstrakt oder ist mit negativen Assoziationen wie Verzicht verbunden. Das Bewusstsein für die Belange der Natur zu schärfen, Artenkenntnis zu fördern und den Kontakt zwischen Menschen und Natur zu stärken, sind daher zentrale Ziele der Umweltbildung. Neuere Forschungsergebnisse aus Psychologie und Ökologie zeigen, dass dieser Kontakt auch auf den Menschen zurückwirkt und gesundheitliche Vorteile mit sich bringt.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Biodiversitätskrise sind gesellschaftliche Transformationsprozesse notwendig, wenn die bisherigen Trends umgekehrt werden sollen. Soundscapes sind gute Vermittlerinnen, um das Bewusstsein für den Zusammenhang zwischen Umwelt- und Gesundheitsschutz zu schärfen. Die nachgewiesene positive Wirkung naturnaher Soundscapes auf das Wohlbefinden und ihre emotionale Zugänglichkeit machen sie zu einem wirkungsvollen Instrument, um den Dialog über Klima- und Naturschutz zu fördern. Sie machen erlebbar, dass Umweltschutz nicht nur Verzicht bedeutet, sondern auch einen Gewinn an Lebensqualität mit sich bringen kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erstellt von Sandra Müller. a) Spektrogramm von eigenen Tonaufnahmen aus dem tropischen Tieflandregenwald im Darién, Panama. b) Spektrogramm von Tonaufnahmen aus einem Buchenwald in Hessen.

Abbildung 2: Konzeptioneller Rahmen der Soundscape-Ökologie. Flussdiagramm von Sandra Müller.

Anmerkungen

- 1 Sueur, J et al.: »Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal«, in: *PLoS ONE* 3, 12 (2008): S. e4065, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>; Pijanowski, Bryan C. et al.: »What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science«, in: *Landscape Ecology* 26, 9 (2011): S. 1213–1232, <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>; Pijanowski, Bryan C. et al.: »Soundscape ecology: The science of sound in the landscape«, in: *BioScience* 61, 3 (2011): S. 203–216, <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- 2 Scarpelli, Marina D. A. et al.: »Gaps in terrestrial soundscape research: It's time to focus on tropical wildlife«, in: *Science of The Total Environment* 707 (2020): S. 135403, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135403>.
- 3 Schafer, R. Murray: »Die Ordnung der Klänge: Eine Kulturgeschichte des Hörens«, hg. von Sabine Breitsameter, Mainz: Schott Music 2010.
- 4 ISO: »ISO 12913–1:2014(en) Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and Conceptual Framework«, 2014, letzter Zugriff: 26.02.2025, <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:12913:-1:ed-1:v1:en>.
- 5 Farina, Almo/James, Philip: »The acoustic communities: Definition, description and ecological role«, in: *Biosystems* 147 (2016): S. 11–20, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2016.05.011>; Mullet, Timothy C./Farina, Almo/Gage, Stuart H.: »The acoustic habitat hypothesis: An ecoacoustics perspective on species

- habitat selection», in: *Biosemiotics* 10, 3 (2017): S. 319–336, <https://doi.org/10.1007/s12304-017-9288-5>.
- 6 Catchpole, Clive K/Slater, Peter J B: *Bird song—Biological Themes and Variations*, 2. Auflage, New York: Cambridge University Press 2018.
- 7 In der Regel singen im Vogelreich die Männchen. Es gibt aber auch Arten, bei denen Weibchen singen, meist um mit Männchen zu kommunizieren oder zur Revierverteidigung, z.B. wurde dies beim Rotkehlchen beobachtet. Seltener, z.B. bei der Alpenbraunelle und Heckenbraunelle, konnte nachgewiesen werden, dass auch Weibchen Gesänge nutzen, um Männchen anzulocken. Im weiteren Text werde ich davon absehen, in Bezug auf Tierarten zu gendern.
- 8 . Gil, Diego/Gahr, Manfred: »The honesty of bird song: Multiple constraints for multiple traits«, in: *Trends in Ecology & Evolution* 17, 3 (2002): S. 133–141, [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02410-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02410-2); Dougherty, Liam R.: »Meta-analysis reveals that animal sexual signalling behaviour is honest and resource based«, in: *Nature Ecology & Evolution* 5, 5 (2021): S. 688–699, <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01409-z>; Lopez-Serna, Salome/Gonzalez-Quevedo, Catalina/Rivera-Gutierrez, Hector Fabio: »Beyond illness: Variation in haemosporidian load explains differences in vocal performance in a songbird«, in: *Ecology and Evolution* 11, 24 (2021): S. 18552–18561, <https://doi.org/10.1002/ece3.8455>.
- 9 Naguib, Marc/Riebel, Katharina: »Singing in space and time: The biology of birdsong«, in: *Biocommunication of Animals*, hg. von Guenther Witzany, Dordrecht: Springer Netherlands 2014, S. 233–247.
- 10 Magrath, Robert D/Pitcher, Benjamin J/Gardner, Janet L: »Recognition of other species' aerial alarm calls: Speaking the same language or learning another?«, in: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276, 1657 (2009): S. 769–774, <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1368>; Szymkowiak, Jakub: »Eavesdropping on conspecific alarm calls links birds across territory borders into a population-wide information network«, in: *Animal Behaviour* 192 (2022): S. 85–93, <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2022.07.012>.
- 11 Mullet/Farina/Gage, »Acoustic habitat hypothesis«.
- 12 Szymkowiak, »Eavesdropping«.
- 13 Hahn, B. A./Silverman, E. D.: »Managing breeding forest songbirds with conspecific song playbacks«, in: *Animal Conservation* 10, 4 (2007): S. 436–441, <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2007.00128.x>.
- 14 Hahn/Silverman, »Managing breeding forest songbirds«.
- 15 Simpson, S D et al.: »Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise«, in: *Marine Ecology Progress Series* 276 (2004): S. 263–268, <https://doi.org/10.3354/meps276263>.
- 16 Simpson, Stephen D et al.: »Adaptive avoidance of reef noise«, in: *PLoS ONE* 6, 2 (2011): S. e16625, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016625>.

- 17 Gordon, Timothy A. C. et al.: »Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat«, in: *Nature Communications* 10, 1 (2019): S. 5414, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13186-2>.
- 18 Gordon et al., »Acoustic enrichment«.
- 19 Krause, Bernhard L.: »Bioacoustics – Habitat ambience and ecological balance«, in: *Whole Earth Review* 57 (1987): S. 14–18.
- 20 Morton, Eugene S.: »Ecological sources of selection on avian sounds«, in: *The American Naturalist* 109, 965 (1975): S. 17–34, <https://doi.org/10.1086/282971>; Hansen, Poul: »Vocal learning: Its role in adapting sound structures to long-distance propagation, and a hypothesis on its evolution«, in: *Animal Behaviour* 27, 4 (1979): S. 1270–1271, [https://doi.org/10.1016/0003-3472\(79\)90073-3](https://doi.org/10.1016/0003-3472(79)90073-3).
- 21 Aide, T. Mitchell et al.: »Species richness (of insects) drives the use of acoustic space in the tropics«, in: *Remote Sensing* 9, 11 (2017), <https://doi.org/10.3390/rs9111096>.
- 22 Stanley, Calandra Q. et al.: »Insect noise avoidance in the dawn chorus of neotropical birds«, in: *Animal Behaviour* 112 (2016): S. 255–265, <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.12.003>.
- 23 Schmidt, Arne K D/Römer, Heiner/Riede, Klaus: »Spectral niche segregation and community organization in a tropical cricket assemblage«, in: *Behavioral Ecology* 24, 2 (2012): S. 470–480, <https://doi.org/10.1093/beheco/ars187>.
- 24 Do Nascimento, Leandro A. et al.: »Time and habitat structure shape insect acoustic activity in the Amazon«, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 379, 1904 (2024): S. 20230112, <https://doi.org/10.1098/rstb.2023.0112>.
- 25 Ulloa, Juan Sebastian et al.: »Explosive breeding in tropical anurans: Environmental triggers, community composition and acoustic structure«, in: *BMC Ecology* 19, 28 (2019), <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0243-y>.
- 26 Man erkennt, wie verschiedene Tiergruppen zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedliche Frequenzbereiche nutzen; Grillen nachts 4–8 kHz, tagsüber 5,5–8 kHz; Vögel: 1,5–5 kHz; Zikaden: 1,5–12 kHz.
- 27 Buchenwald A: weit entfernt von der nächsten Straße; Buchenwald B: nahe einer stark befahrenen Straße. Aufnahme vom 14.04.2023 06:00, Buchenwald A: Vogelkonzert ohne Anthropophonie, nur leichtes Hintergrundrauschen zwischen 0–0,5 kHz. Aufnahme vom 14.04.2023 06:00, Buchenwald B: Vogelkonzert mit Anthropophonie, diese maskiert Gesänge zwischen 0–2 kHz. Aufnahme vom 12.04.2023 06:00, Buchenwald A: Vogelkonzert mit Geophonie (Wind). Aufnahme vom 15.04.2023 06:00, Buchenwald A: Vogelkonzert mit Geophonie (Regen).
- 28 Morton, »Ecological sources«.
- 29 Lengagne, T. et al.: »How do king penguins (*Aptenodytes patagonicus*) apply the mathematical theory of information to communicate in windy condi-

- tions?«, in: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 266, 1429 (1999): S. 1623–1628, <https://doi.org/10.1098/rspb.1999.0824>.
- 30 IPBES: »The global assessment report on biodiversity and ecosystem services«, hg. von E. S. Brondízio u.a., Bonn: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) 2019; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Hg.): Globale Biodiversität in der Krise—Was können Deutschland und die EU dagegen tun? Diskussion Nr. 24, Halle (Saale): 2020; IPCC: »Summary for policymakers«, in: Climate change 2023: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, hg. von H Lee/J Romero, Geneva: IPCC 2023, S. 1–34.
- 31 Müller, Sandra et al.: »Land-use intensity and landscape structure drive the acoustic composition of grasslands«, in: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 328, 107845 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107845>; Müller, Sandra et al.: »Temporal dynamics of acoustic diversity in managed forests«, in: *Frontiers in Ecology and Evolution* 12 (2024), <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.139288> 2.
- 32 Shaw, Taylor/Scherer-Lorenzen, Michael/Müller, Sandra: »Forest structural heterogeneity positively affects bird richness and acoustic diversity in a temperate, Central European forest«, in: *Frontiers in Ecology and Evolution* 12 (2024), <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1387879>.
- 33 Humbert, Jean-Yves/Ghazoul, Jabouty/Walter, Thomas: »Meadow harvesting techniques and their impacts on field fauna«, in: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 130, 1 (2009): S. 1–8, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.014>; Allan, Eric et al.: »Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity«, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 1 (2014): S. 308–313, <https://doi.org/10.1073/pnas.1312213111>; Gossner, Martin M. et al.: »Land-use intensification causes multitrophic homogenization of grassland communities«, in: *Nature* 540, 7632 (2016): S. 266–269, <https://doi.org/10.1038/nature20575>; Le Provost, Gaëtane et al.: »Contrasting responses of above- and belowground diversity to multiple components of land-use intensity«, in: *Nature Communications* 12, 1 (2021): S. 3918, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23931-1>; Müller et al., »Land-use intensity«.
- 34 Gossner et al., »Land-use intensification«; Müller et al., »Land-use intensity«; Müller, Jörg et al.: »Enhancing the structural diversity between forest patches—A concept and real-world experiment to study biodiversity, multifunctionality and forest resilience across spatial scales«, in: *Global Change Biology* 29, 6 (2023): S. 1437–1450, <https://doi.org/10.1111/gcb.16564>.
- 35 Müller et al., »Land-use intensity«.
- 36 Slabbekoorn, Hans et al. (Hg.): *Effects of Anthropogenic Noise on Animals* (=Springer Handbook of Auditory Research), New York: Springer 2018; Shan-

- non, Graeme et al.: »A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife«, in: *Biological Reviews* 91, 4 (2016): S. 982–1005, <https://doi.org/10.1111/brv.12207>; Williams, R. et al.: »Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management«, in: *Ocean & Coastal Management* 115 (2015): S. 17–24, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021>; Francis, Clinton D. et al.: »Acoustic environments matter: Synergistic benefits to humans and ecological communities«, in: *Journal of Environmental Management* 203 (2017): S. 245–254, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.041>; Francis, Clinton D.: »Vocal traits and diet explain avian sensitivities to anthropogenic noise«, in: *Global Change Biology* 21, 5 (2015): S. 1809–1820, <https://doi.org/10.1111/gcb.12862>.
- 37 Evans, Julian C/Dall, Sasha R X/Kight, Caitlin R: »Effects of ambient noise on zebra finch vigilance and foraging efficiency«, in: *PLoS ONE* 13, 12 (2019): S. e0209471, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209471>; Francis, »Vocal traits and diet«; Ware, Heidi E. et al.: »A phantom road experiment reveals traffic noise is an invisible source of habitat degradation«, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 39 (2015): S. 12105–12109, <https://doi.org/10.1073/pnas.1504710112>.
- 38 Slabbekoorn, Hans/McGee, JoAnn/Walsh, Edward J.: »Effects of man-made sound on terrestrial mammals«, in: *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, hg. von Hans Slabbekoorn u.a., New York: Springer 2018, S. 243–276; Shannon et al., »A synthesis of two decades of research«.
- 39 Shannon et al., »A synthesis of two decades of research«.
- 40 Francis, Clinton D. et al.: »Noise pollution alters ecological services: Enhanced pollination and disrupted seed dispersal«, in: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279, 1739 (2012): S. 2727–2735, <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.0230>; Francis, Clinton D./Phillips, Jennifer N./Barber, Jesse R.: »Background acoustics in terrestrial ecology«, in: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 54 (2023): S. 351–373, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102220-030316>.
- 41 Der akustische Raum, der Tieren zur Verfügung steht, wird durch Anthropophonie und Geophonie sowie durch die Kommunikation anderer Arten bestimmt. Die Artenzusammensetzung der vokalisierten Tierarten wird durch die abiotische Umwelt, die Landnutzung und die Vegetation beeinflusst.
- 42 WHO: »Burden of Disease From Environmental Noise—Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe«, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe & JRC European Commission 2011, letzter Zugriff: 26.02.2025, <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326424/9789289002295-eng.pdf?sequen ce=1>; European Environment Agency: »Healthy Environment, Healthy Lives: How the Environment Influences Health and Well-Being in Europe«, in: EEA

- Report No 21/2019, Luxembourg: European Environment Agency 2020, letzter Zugriff: 26.02.2025, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/healthy-environment-healthy-lives/healthy-environment-healthy-lives/@@download/file>.
- 43 European Environment Agency: »Quiet Areas in Europe—The Environment Unaffected by Noise Pollution«, in: EEA Report No 14/2016, Luxembourg: European Environment Agency 2016, letzter Zugriff: 26.02.2025, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/quiet-areas-in-europe/quiet-areas-in-europe/@@download/file>.
- 44 European Environment Agency, »Quiet Areas in Europe«.
- 45 European Environment Agency, »Quiet Areas in Europe«.
- 46 Ratcliffe, Eleanor/Gatersleben, Birgitta/Sowden, Paul T.: »Bird sounds and their contributions to perceived attention restoration and stress recovery«, in: *Journal of Environmental Psychology* 36 (2013): S. 221–228, <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.08.004>; Hedblom, Marcus et al.: »Bird song diversity influences young people's appreciation of urban landscapes«, in: *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 3 (2014): S. 469–474, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.002>; Ferraro, Danielle M. et al.: »The phantom chorus: Birdsong boosts human well-being in protected areas«, in: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287, 1941 (2020): S. 20201811, <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1811>; Methorst, Joel: »Positive relationship between bird diversity and human mental health: An analysis of repeated cross-sectional data«, in: *The Lancet Planetary Health* 8, 5 (2024): S. e285–e296, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00023-8).
- 47 Methorst, »Positive relationship«.
- 48 Methorst, Joel et al.: »The importance of species diversity for human well-being in Europe«, in: *Ecological Economics* 181 (2021): S. 106917, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106917>.
- 49 Mitchell, Richard J. et al.: »Neighborhood environments and socioeconomic inequalities in mental well-being«, in: *American Journal of Preventive Medicine* 49, 1 (2015): S. 80–84, <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2015.01.017>; vgl. auch Methorst, »Positive relationship«.
- 50 Buxton, Rachel T. et al.: »A synthesis of health benefits of natural sounds and their distribution in national parks«, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118, 14 (2021): S. e2013097118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2013097118>.
- 51 Buxton et al., »Synthesis of health benefits«.
- 52 Marselle, Melissa R. et al.: »Pathways linking biodiversity to human health: A conceptual framework«, in: *Environment International* 150 (2021): S. 106420, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106420>; Rozario, Kevin et al.: »The more the merrier? Perceived forest biodiversity promotes short-term mental

- health and well-being—A multicentre study», in: *People and Nature* 6, 1 (2024): S. 180–201, <https://doi.org/10.1002/pan3.10564>.
- 53 Smalley, Alexander J. et al.: »Forest 404: Using a BBC drama series to explore the impact of nature's changing soundscapes on human wellbeing and behavior«, in: *Global Environmental Change* 74 (2022): S. 102497, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102497>.
- 54 IPBES, »Global assessment report«.

