

Effiziente Finite-Differenzen-Modellierung der Infraschallausbreitung in realistischen 3D-Domänen: Validierung anhand von Windkraftanlagenmessungen

Ken Mattsson^{a,b,*} , Gustav Eriksson^a, Leif Persson^a, José Chilo^b, Kourosh Tatar^b 

^a Universität Uppsala, Fachbereich Informationstechnologie, Uppsala, Schweden

^b Universität Gävle, Gävle, Schweden

HIGHLIGHTS

- 3D-Simulationstool für tieffrequente Schwingungen in komplexen Bereichen.
- Validierung anhand von Infraschallmessungen an Windparks.
- Verifizierung anhand realistischer 2D- und 3D-Benchmark-Probleme.
- Verifizierung von Effekten bei langer Ausbreitung in verschiedenen Atmosphären.
- Bestimmung der Infraschall-Schallleistungspegel moderner Windkraftanlagen.

ARTIKEL INFO

Stichworte:

Finite-Differenzen-Methoden
Infraschallmessung
Infraschallsimulationen
Validierung
Verifizierung

ZUSAMMENFASSUNG

Wir stellen ein hochpräzises Simulationswerkzeug für die genaue akustische Modellierung in einem breiten Anwendungsspektrum vor. Die numerische Methode basiert auf Finite-Differenzen-Operatoren vom Typ „Summation-By-Parts“ (SBP) mit Diagonalnorm, die lineare Stabilität auf stückweise gekrümmten Mehrblockgittern gewährleisten. Realistische dreidimensionale atmosphärische und topografische Daten werden direkt in die Simulationen einbezogen, und der Solver ist in CUDA implementiert, um eine hohe Recheneffizienz zu erzielen. Die Verifizierung erfolgt durch Konvergenzstudien anhand hochauflösender Benchmark-Probleme sowohl in zwei als auch in drei räumlichen Dimensionen, während die Validierung unter Verwendung hochwertiger Infraschallmessungen aus zwei modernen Windparks in Schweden durchgeführt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass moderne, groß dimensionierte Windkraftanlagen deutlich höhere Infraschallpegel erzeugen als ältere, kleinere Anlagen. Diese Erkenntnisse tragen zum besseren Verständnis der akustischen Eigenschaften moderner Windkraftanlagen bei und liefern wichtige Anhaltspunkte für die Bewertung ihrer potenziellen ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen.

1. Einleitung

Stille ist in der modernen Gesellschaft zu einem seltenen Gut geworden. Unter den Umweltbelastungen gilt Verkehrslärm als eine der größten Gefahren für die öffentliche Gesundheit [1,2]. Langfristige Exposition wird mit einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen [3] sowie mit Belästigung, Schlafstörungen und beeinträchtigter kognitiver Leistungsfähigkeit bei Kindern [4] in Verbindung gebracht. Um solche Auswirkungen zu mindern, sind zuverlässige und präzise Berechnungswerkzeuge unerlässlich, die die Ausbreitung von Lärm vorhersagen und Lärmkarten erstellen können. Solche Werkzeuge sind unverzichtbar für die Planung von städtischen Siedlungen, Verkehrsinfrastruktur, Flughäfen und Windparks sowie für den Schutz ruhiger Gebiete in Nationalparks und Erholungsgebieten.

Tieffrequenter Lärm (unter 200 Hz) ist von besonderer Bedeutung. Er dringt leicht in Gebäude ein und durchdringt diese, und während das menschliche Gehör einen Frequenzbereich von 16 Hz bis 18 kHz (oft auf 20 Hz – 20 kHz) [5], werden Frequenzen unterhalb von etwa 100 Hz typischerweise eher als Vibrationen oder Druckwellen wahrgenommen als als tonale Geräusche. Zu den wichtigsten Quellen im Außenbereich zählen Straßen-, Luft- und Schienenverkehr, Bautätigkeit und moderne Windkraftanlagen, während im Innenbereich Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage sowie Industriemaschinen dazu beitragen. Der kombinierte Einfluss mehrerer Quellen kann die Belastung auf ein Niveau erhöhen, das ausreicht, um gesundheitsschädliche Auswirkungen hervorzurufen. Die Gewährleistung ruhiger Wohnbedingungen, insbesondere in Schlafumgebungen, ist daher von entscheidender Bedeutung.

* Korrespondenzautor an der Universität Uppsala, Institut für Informationstechnologie, Uppsala, Schweden.

E-Mail-Adressen: ken.mattsson@it.uu.se (K. Mattsson), gustav.eriksson@it.uu.se (G. Eriksson), leif.persson@it.uu.se (L. Persson), Jose.Chilo@hig.se (J. Chilo), Kourosh.Tatar@hig.se (K. Tatar).

Bestehende numerische Methoden zur Schallausbreitung im Freien haben sich für großräumige Gebiete mit komplexem und unregelmäßigem Gelände als unzureichend erwiesen [6]. Um diese Mängel zu beheben, wurden kürzlich genauere und fortschrittlichere Berechnungsansätze entwickelt [7]. Empirische Messungen bestätigen zudem [8,9], dass eine genaue Vorhersage der Schalldruckpegel (SPL) über große Entfernungen hinweg eine explizite Berücksichtigung sowohl des dreidimensionalen atmosphärischen Zustands als auch des darunterliegenden Geländes erfordert. Die dynamische Atmosphäre beeinflusst die Schallausbreitung über alle Entfernungen hinweg, doch ihre räumlich-zeitliche Variabilität gewinnt mit zunehmender Entfernung an Bedeutung. Folglich müssen hochpräzise Simulationen der Schallausbreitung über große Entfernungen (typischerweise über 500 m) folgende Faktoren berücksichtigen: 1) atmosphärische Dämpfung, 2) Windeinflüsse, 3) höhenabhängige Schallgeschwindigkeit, 4) Schichtung und Auftrieb, 5) unregelmäßiges Gelände und 6) realistische Randbedingungen.

Die Schallausbreitung in einer heterogenen Atmosphäre wird in dieser Studie unter Verwendung der dreidimensionalen Schallwellengleichung modelliert [10]. Um Stabilität und Konvergenz zu gewährleisten, werden SBP-Finite-Differenzen-Operatoren mit Diagonalnorm mit der Simultaneous Approximation Term (SAT)-Technik zur schwachen Durchsetzung von Randbedingungen kombiniert. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde das SBP-SAT-Framework umfassend weiterentwickelt und rigoros analysiert, und es hat sich durchweg als geeignet erwiesen, hochgenaue und zuverlässige numerische Simulationen der Schallwellenausbreitung zu liefern (siehe z. B. [6,7,11–16]).

Damit ein Berechnungswerkzeug für die Wissenschafts- und Ingenieurgemeinschaft von breitem Nutzen ist, muss es drei wesentliche Kriterien erfüllen:

- 1) Die Methodik muss streng validiert und transparent dokumentiert sein; 2) die Ergebnisse müssen klar, interpretierbar und visuell zugänglich sein; und 3) das Werkzeug muss benutzerfreundlich sein und die Notwendigkeit der Feinabstimmung von Ad-hoc-Parametern vermeiden. All dies zu erreichen, ist das übergeordnete Ziel des Schallsimulationswerkzeugs namens *SoundSim360*. Im Gegensatz dazu basieren weit verbreitete kommerzielle Lärmsimulationsprogramme, darunter Modelle wie Nord2000, auf Raytracing-Verfahren, die zahlreiche einstellbare Parameter erfordern. Solche Modelle sind zwar rechnerisch effizient, weisen jedoch mehrere bekannte Einschränkungen auf, die wir durch die direkte Lösung der vollständigen dreidimensionalen Schallwellengleichung vermeiden. Vier wesentliche Schwächen von Raytracing-Ansätzen sind: 1) unzureichende Behandlung von tieffrequenten Schall (unter 200 Hz), 2) Schwierigkeiten bei der Handhabung komplexer Geometrien, 3) begrenzte Fähigkeit zur Modellierung der Schallübertragung durch Wände und 4) Unfähigkeit, transiente Quellen genau zu erfassen.

Als anschauliches Beispiel zeigt Abb. 1 einen Vergleich zwischen *SoundSim360* und Nord2000 (wie in der kommerziellen Software *SoundPlan 9.1* implementiert) für eine 25-Hz-Monopolquelle am Polacksbacken der Universität Uppsala. Die Quelle befindet sich 10 m über dem Boden und hat einen Schallleistungspegel von 105 dB. Gelände- und Gebäudedaten stammen von Lantmateriet [17], und der Boden wird als harte Oberfläche modelliert (Impedanzklasse H in Nord2000). Alle anderen Nord2000-Parameter werden auf ihren Standardwerten belassen. Die Schalldruckpegelverteilung (SPL) in 2 m Höhe wird für beide Modelle dargestellt. Der Berechnungsbereich

Berechnungsbereich für *SoundSim360* umfasst $500 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 250 \text{ m}$.

Signifikante Abweichungen treten in den akustischen Schattenzonen hinter Gebäuden auf, wo Nord2000 den SPL aufgrund grundlegender Einschränkungen der strahlenbasierten Ausbreitung bei niedrigen Frequenzen systematisch unterschätzt. Das Modell kann die Kantenbeugung bei diesen Frequenzen nicht genau simulieren, da es auf geometrischer Akustik basiert und für höherfrequente Schallwellen kalibriert ist. Bei längeren Wellenlängen versagen diese Annahmen, und wellenbasierte Beugungseffekte dominieren das Ausbreitungsfeld.

Infraschall bezeichnet Schallwellen mit Frequenzen unter 20 Hz und wird von verschiedenen natürlichen und künstlichen Quellen erzeugt. Beispiele für künstliche Infraschallquellen sind Explosionen, Motoren, Lüftungsanlagen, Hochgeschwindigkeitszüge, Hochgeschwindigkeitsflugzeuge, Raketen und Windkraftanlagen. Natürliche Infraschallquellen sind vielfältig: Vulkanausbrüche, Auroras, Blitze und Sprites, Brandung, Wechselwirkungen zwischen Wellen und dem Ozean (Mikrobarom), Lawinen, Meteore, bergbedingte Wellen, Erdbeben und Tsunamis.

Infraschallsimulationen werden zunehmend in der geophysikalischen Forschung und Überwachung für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Diese Simulationen

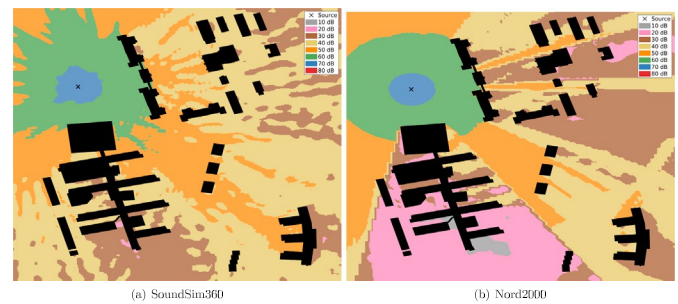


Abb. 1. Simulation von Niederfrequenzschall (25 Hz) in Polacksbacken (105-dB-Punktquelle bei \times , 10 m über dem Boden), Vergleich zwischen (a) *SoundSim360* und (b) Nord2000. Dargestellt sind Schalldruckpegel 2 m über dem Boden. Nord2000 kann die Randbeugung bei niedrigen Frequenzen nicht genau modellieren, wo lange Wellenlängen eine ausgeprägte Wellenbeugung um Hindernisse herum verursachen.

Sie helfen Wissenschaftlern dabei, das Verhalten von Infraschallwellen in verschiedenen Umgebungen zu untersuchen und ihre Auswirkungen in verschiedenen geophysikalischen Kontexten zu verstehen. Hier sind einige wichtige geophysikalische Anwendungen, in denen Infraschallsimulationen zum Einsatz kommen: 1) zur Erkennung großer Explosionen (einschließlich Atomtests) [18,19], 2) zur Erkennung von Naturkatastrophen wie Erdbeben [20,21], Tsunamis oder Vulkanausbrüchen [22], 3) zur Bereitstellung von Daten über atmosphärische Bedingungen [23–25] und zur Verbesserung von Vorhersagemodellen. Diese Anwendungen erfordern in der Regel die Kombination aus präzisen Infraschall- (und manchmal seismischen) Messungen und fortschrittlichen numerischen Methoden, um die Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre bis zu einer Höhe von 140 km zu simulieren. Eine beliebte numerische Methode für Infraschallsimulationen in relativ flachem Gelände mit einer einzigen Quelle ist die Wide-Angle-Parabolic-Equation-Methode [18,20,24,25]. Um Interferenzen von mehreren Quellen in unregelmäßigem Gelände zu erfassen, ist ein dreidimensionales Wellengleichungsmodell erforderlich.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie ist zweigeteilt. Der erste Schwerpunkt liegt auf der Validierung des Simulationswerkzeugs anhand genauer Infraschallmessungen. Infraschall eignet sich ideal zur Validierung eines Simulationswerkzeugs für Außengeräusche, da die minimale Dämpfung in der Atmosphäre (und am Boden) eine Ausbreitung über große Entfernungen ermöglicht. Moderne Windkraftanlagen sind starke Infraschallquellen und befinden sich oft in abgelegenen Gebieten, weit entfernt von Städten und Autobahnen, die andernfalls zu einem relativ hohen Hintergrundlärmpegel beitragen würden. Der zweite Schwerpunkt liegt auf der Kartierung der Schalleistungspegel im Infraschallbereich für einige moderne Windkraftanlagentypen und der Untersuchung des Einflusses der Atmosphäre. Wir haben dreimal Messungen im Windpark Mälarderget durchgeführt: am 26.10.2023, am 23.10.2024 und am 16.12.2024 sowie zweimal im Windpark Lervik: am 21.05.2024 und am 10.09.2024.

Nach diesen ersten Infraschallmessungen litten zwei von uns unter Schlafstörungen und Migräne. Diese Symptome traten auf, nachdem wir mindestens vier Stunden lang Infraschallpegeln von knapp über 95 dB im Frequenzbereich um 1 Hz ausgesetzt waren (siehe Abb. 7). Über ähnliche Symptome während Infraschallmessungen wurde in [26] berichtet. Unter Fachleuten der Otoneurologie und Otolaryngologie ist bekannt, dass nicht hörbarer Infraschall bei Menschen mit einem empfindlicheren Nervensystem Migräne auslösen kann, siehe beispielsweise [27–29]. Jeder Dritte ist für Migräne prädisponiert und verfügt über ein empfindlicheres Nervensystem [30,31]. Der Grad der Empfindlichkeit ist sehr individuell. Es gibt neue Studien, die einen Zusammenhang zwischen den Auswirkungen von unhörbarem Infraschall und der Gehirnaktivität herstellen [32,33]. Bereits 1985 zeigten Danielsson und Landström [34], dass Infraschall mit Pegeln von 95 dB bei einer Exposition von 1 Stunde einen Anstieg des diastolischen Blutdrucks sowie einen Rückgang des systolischen Blutdrucks und der Pulsfrequenz verursacht. Neuere Studien zeigen zudem, dass sich viele Tiere mehr als 5 km von Windkraftanlagen entfernen, insbesondere Hirsche und Vögel [35].

Andere (jüngere) Studien [36,37] legen nahe, dass Infraschall von Windkraftanlagen keine messbaren gesundheitlichen Auswirkungen hat. In [37] wurden 27 Teilnehmer 10 Minuten lang in einem Labor einem Infraschall von 89 dB ausgesetzt, während in [36] 37 Teilnehmer drei Tage lang einem Pegel von 87 dB ausgesetzt waren. Diese Studien weisen gewisse Einschränkungen auf: Sie bezogen keine Experten

aus den Bereichen Otoneurologie oder HNO-Heilkunde einbezogen, und Teilnehmer mit bekannten Empfindlichkeiten, wie z. B. Personen, die zu Migräne neigen, wurden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus spiegeln die kurzfristigen Laborbelastungen möglicherweise nicht vollständig die langfristige, kumulative Belastung in Wohnumgebungen in der Nähe von Windparks wider. Folglich sollten die Ergebnisse, obwohl sie aufschlussreich sind, mit Vorsicht interpretiert werden, insbesondere bei der Betrachtung potenzieller Auswirkungen auf empfindliche Bevölkerungsgruppen.

Es ist bekannt [38,39], dass sich wiederholende, pulsierende Geräusche als störender empfunden werden als kontinuierliche Geräusche mit derselben Frequenz

Frequenzspektrum und durchschnittlicher Schallpegel. Jedes Mal, wenn ein Rotorblatt den Turm passiert, entsteht ein Druckimpuls mit steilen Flanken, der sich als Infraschall ausbreitet. Die Rotorblatt-Passierfrequenz (BPF) lässt sich ermitteln, indem man die Anzahl der Rotorblattdurchläufe pro Minute zählt und durch 60 teilt. Die BPF nimmt mit zunehmender Rotorblattgröße ab, und größere Rotorblätter erzeugen zudem stärkere Druckimpulse, was zu intensiverem Infraschall führt. Bei modernen Windkraftanlagen liegt die BPF typischerweise zwischen 0,2 und 0,5 Hz, während ältere Anlagen eine höhere BPF von etwa 0,7 bis 0,9 Hz aufweisen. In Schalldruckspektren werden die BPF und ihre Harmonischen

(Vielfache der BPF) erscheinen als deutliche Spitzen [26,40]. Dieses Muster steht in starkem Kontrast zu natürlichem Infraschall, der typischerweise breitbandig durch meteorologische Ereignisse erzeugt wird und keine solchen diskreten Spitzen aufweist.

Auf dieser Grundlage ist die Annahme naheliegend, dass Menschen im Allgemeinen von natürlichem Infraschall nicht beeinträchtigt werden. Die unnatürlichen Eigenschaften des Infraschalls von Windkraftanlagen, die auf deren sich wiederholende Impulse zurückzuführen sind, könnten jedoch zu den Symptomen beitragen, die in der Nähe von Windkraftanlagen berichtet werden.

Die gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall durch Windkraftanlagen sind nach wie vor ungeklärt, was vor allem auf die Einschränkungen bestehender Laborstudien zurückzuführen ist. Bislang hat kein kontrolliertes Experiment den charakteristischen pulsierenden Infraschall moderner Windkraftanlagen genau nachgebildet. Stattdessen stützten sich frühere Studien auf kontinuierlichen Breitband-Infraschall bei vergleichsweise moderaten Pegeln [36,37]. Diese Bedingungen spiegeln die reale Exposition nicht wider. Eine wissenschaftlich fundierte Studie muss daher eine realistische Reproduktion des pulsierenden Infraschalls, Expositionszeiträume von mehreren Wochen, eine ausreichend große und vielfältige Teilnehmergruppe – einschließlich Personen mit bekannten Empfindlichkeiten wie Migräne – sowie die Einbeziehung von medizinischen Experten aus den Bereichen Otoneurologie und HNO-Heilkunde umfassen. Solange solche Studien nicht durchgeführt werden, ist es verfrüht, endgültige Schlussfolgerungen hinsichtlich der gesundheitlichen Auswirkungen von Infraschall durch Windkraftanlagen.

Der weitere Aufbau dieses Artikels ist wie folgt: In **Abschnitt 2** stellen wir das Modell der akustischen Wellengleichung vor und begründen dessen Wohlgestelltheit, einschließlich einer Erörterung verschiedener Randbedingungen und die Modelldaten. In **Abschnitt 3** werden die räumliche Diskretisierung und das explizite Zeitintegrationsschema zweiter Ordnung vorgestellt. Eine kurze Darstellung der Implementierung findet sich in **Abschnitt 4**. Die Genauigkeit der Methode wird in **Abschnitt 5** anhand von 2D- und 3D-Benchmark-Problemen überprüft. In **Abschnitt 6** beschreiben wir Infraschallmessungen aus zwei verschiedenen Windparks, und in **Abschnitt 7** validieren wir die Simulationen anhand dieser Messungen und präsentieren Ergebnisse zur Infraschallausbreitung rund um die Windparks. Abschließend fasst **Abschnitt 8** die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen.

2. Das physikalische Modell

Das von uns für die Schallausbreitung verwendete Modell ist die 3D-Schallwellengleichung in Form zweiter Ordnung [10], gegeben durch

$$\frac{1}{c(x)^2} \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(x)} \nabla u \right) + \beta(x)u + \frac{1}{c(x)^2 \rho(x)} S(x, t), \quad x \in \Omega, \quad t > 0, \tag{1}$$

wobei $u = u(x, t)$ die Druckabweichung, $c(x)$ die Schallgeschwindigkeit, $\rho(x)$ die Dichte des Mediums, $\beta(x)$ ein Dämpfungskoeffizient und $S(x, t)$ ein Antriebsfunktion, und $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ ist der Berechnungsbereich. Hier ist $x \in \Omega$ die 3D-Raumkoordinate und t die Zeitkoordinate. In dieser Arbeit verwenden wir fettgedruckte Schrift, um Vektoren zu kennzeichnen. In (1) werden Indizes verwendet

zur Kennzeichnung partieller Ableitungen verwendet. In dieser Arbeit ist der

Um eindeutige Lösungen für (1) zu erhalten, müssen wir der Lösung $u(x, t)$ Anfangs- und Randbedingungen auferlegen. In dieser Arbeit verwenden wir ausschließlich homogene Anfangsbedingungen, d. h. $u(x, 0) = u_t(x, 0) = 0$. Wir teilen die Grenze in zwei Teile auf, $\partial \Omega_b$ am Boden und $\partial \Omega_s$ an anderer Stelle, und legen die folgenden Randbedingungen fest:

$$\begin{aligned} \text{Ausfluss erster Ordnung: } & c(x)n \cdot \nabla u + u_t = 0, & x \in \partial \Omega_s \\ \text{Impedanz: } & p(x)\omega u + c(x)n \cdot \nabla u + q(x)u_t = 0, & x \in \partial \Omega_b \end{aligned} \tag{2}$$

wobei n die ausgehende Normale bezeichnet. Die Ausströmungsrandbedingung erster Ordnung auf $\partial \Omega_s$ wird verwendet, um den Bereich abzuschneiden und Reflexionen an künstlichen Grenzen zu minimieren. Die Impedanz-Randbedingung auf $\partial \Omega_b$ ist aus [41] entnommen und wird für teilweise reflektierende Oberflächen (wie z. B. den Boden) verwendet. Die Parameter $p(x)$ und $q(x)$ sind durch $p(x) + q(x)Z^\wedge(x) = 1$ definiert, wobei $Z^\wedge(x)$ die normierte Oberflächenimpedanz ist. Hier verwenden wir eine für niedrige Frequenzen gültige Formel aus [42], die durch

$$Z^\wedge(x) = \frac{\sigma_e(x)}{2\omega\gamma\rho(x)} \left(1 + \frac{\sigma_e(x)}{2\omega\gamma\rho(x)} \right) i, \quad x \in \partial \Omega_b, \tag{3}$$

wobei $\sigma_e(x)$ der effektive Strömungswiderstand der Bodenoberfläche ist, $\gamma = 1,4$ das spezifische Wärmeverhältnis ist und $\omega = 2\pi f$, wobei f die Frequenz ist.

In der vorliegenden Studie besteht die Antriebsfunktion aus einer Einzelpunktquelle, d. h.

$$S(x, t) = \delta(x - x^*)g(t), \tag{4}$$

wobei δ die Dirac-Delta-Funktion ist, x^* die Position der Punktquelle und $g(t)$ das Zeitsignal. Hier verwenden wir rampenförmige harmonische Signale der Form

$$g(t) = \Lambda r(t) \sin(\omega t), \tag{5}$$

wobei Λ die Amplitude und $r(t)$ eine Rampenfunktion ist, die durch

$$r(t) = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi t}{2T_{\text{ramp}}}\right), & 0 \leq t < T_{\text{ramp}}, \\ 1, & t \geq T_{\text{ramp}}, \end{cases} \tag{6}$$

mit $T_{\text{ramp}} = 6/f$ (sechs Perioden Rampenzeit). Um Probleme mit mehreren Quellen, beispielsweise einem Windpark, zu modellieren, lösen wir (1) mit einer Quelle zu einem

und kombinieren die Ergebnisse. Wie wir später sehen werden, ist dies notwendig, um Windeffekte korrekt in das Modell einzubeziehen. Beachten Sie, dass wir keine Phaseninformationen in das Zeitsignal (5) einbeziehen. Dies liegt daran, dass die Phasen der hier betrachteten Quellen (Windkraftanlagen) im Allgemeinen unbekannt sind und wir durch die Lösung von (1) mit jeweils einer Quelle alle möglichen Phasenkombinationen a posteriori unabhängig davon rekonstruieren können.

2.1. Berechnung des Schalldruckpegels

Betrachten wir eine Simulation, bei der alle Quellen gleichzeitig aktiv sind (mit unabhängigen, zufälligen Phasen). Sei $P(x)$ die Zufallsvariable, die als Antwort auf den gesamten quadratischen Mitteldruck an der Empfängerposition x , und sei

$$L(x) = 10 \log_{10} \frac{P(x)}{p_0^2},$$

Berechnungsbereich

Ω ein Kasten mit einer variablen Bodengrenze, um die Geländehöhe zu berücksichtigen. Wir bezeichnen die Grenze von Ω als $\partial \Omega$.

~~K. Mattsson, G. Eriksson, J. Persson et al.~~
Sei $\mathcal{C}(\mathbf{p})$ der entsprechende Schalldruckpegel (SPL) relativ zum Referenzdruck $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Je nach der spezifischen Realisierung der Phasen variiert der SPL erheblich. In dieser Arbeit vernachlässigen wir diese Variation, d. h., wir ignorieren die Auswirkungen der Phasen vollständig, indem wir nur den erwarteten SPL über alle möglichen Phasenkombinationen, den wir aus den einzelnen Simulationen mit jeweils einer Quelle berechnen. Sei $(p_{i,\text{rms}}(\mathbf{x}))^2$,

$i = 1, 2, \dots, N_s$, sei der quadratische Mittelwert des RMS-Drucks (mit einer Punktquelle an \mathbf{x}^*), der über zehn Perioden wie folgt abgetastet wird:

$$(p_{i,rms}(\mathbf{x}))^2 = \frac{f}{10} \int_{t^*}^{t^*+10} (u(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}^*))^2 dt, \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (7)$$

Hier ist $u(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}^*)$ die Lösung mit der Punktquelle am Ort \mathbf{x}^* und N_s die Gesamtzahl der Quellen ist. Wir beginnen die Stichprobenahme bei

$$t^* = T_{Rampe} + \frac{\sup_{\mathbf{x} \in \Omega} |\mathbf{x} - \mathbf{x}^*|}{\inf_{\mathbf{x} \in \Omega} c(\mathbf{x})}, \quad (8)$$

die groß genug ist, um sicherzustellen, dass $u(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}^*)$ an allen Punkten im Raum harmonisch ist, wenn $t > t^*$. Es lässt sich zeigen (Herleitung ausgelassen), dass

$$E[P(\mathbf{x})] = \sum_{i=1}^{N_s} (P_{i,rms}(\mathbf{x}))^2, \quad (9)$$

d. h., der erwartete Gesamtquadratmittelwert des Drucks ist einfach die Summe der Quadratmittelwerte des Drucks bei der Simulation mit jeweils einer Quelle. Dies ist intuitiv, da sich die Wahrscheinlichkeiten konstruktiver und destruktiver Interferenz im Durchschnitt ausgleichen, sodass der erwartete Wert einfach die Summe der einzelnen Quadratmittelwertbeiträge ohne Wechselwirkungsterme ist. Wir definieren den erwarteten SPL als

$$L_{tot}(\mathbf{x}) = 10 \log_{10} \frac{E[P(\mathbf{x})]}{p_0^2} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (P_{i,rms}(\mathbf{x}))^2}{p_0^2} \right\}. \quad (10)$$

Beachten Sie, dass $L_{tot}(\mathbf{x})$ nicht mit $E[L(\mathbf{x})]$ identisch ist. Ersteres wird aus dem erwarteten quadratischen Mittelwert des Schalldrucks definiert und entspricht der üblichen

Art der Angabe des durchschnittlichen Schalldruckpegels bei inkohärenten Quellen, während $E[L(\mathbf{x})]$ der strenge statistische Mittelwert der zufälligen Dezibelwerte ist. In dem Fall, in dem die Quellen mit vergleichbarer Stärke beitragen, gilt $E[L(\mathbf{x})] \approx$

$$L_{tot}(\mathbf{x}) - 2,5 \text{ dB}.$$

Die Streuung von $L(\mathbf{x})$ um seinen Mittelwert hängt davon ab, wie ungleichmäßig die

Quellen an der Empfängerposition \mathbf{x} beitragen. Wenn viele Quellen mit vergleichbarer Stärke beitragen (zum Beispiel weit entfernt vom Windpark) und ihre Phasen unabhängig und gleichmäßig verteilt sind, ist $P(\mathbf{x})$ annähernd exponentiell verteilt. In diesem Fall hat die Verteilung von $L(\mathbf{x})$ eine Standardabweichung

$$sd(L(\mathbf{x})) = 10 \frac{\pi}{\ln 10} \frac{1}{6} \approx 5,57 \text{ dB}, \quad (11)$$

unabhängig vom Mittelwert. Wenn eine oder wenige Quellen dominieren, zum Beispiel

in unmittelbarer Nähe einer Windkraftanlage, weicht die Verteilung von der Exponentialverteilung ab und die Streuung von $L(\mathbf{x})$ ist deutlich geringer. Insbesondere in der unmittelbaren Umgebung einer Anlage wird der SPL fast ausschließlich

von dieser einzelnen Quelle bestimmt, und die Phasen der anderen Anlagen werden irrelevant. Daher liegt innerhalb des Windparks und in der Nähe einzelner Anlagen die

Standardabweichung $sd(L(\mathbf{x}))$ nahe Null.

Anmerkung 1. Im weiteren Verlauf der Arbeit vergleichen wir die erwarteten SPL-Werte $L_{tot}(\mathbf{x})$ aus Simulationen mit Messungen aus realen Windparks. Man könnte argumentieren, dass die Messung mit einer bestimmten Phasen- und wir daher versuchen sollten, diese Kombination auch in den Simulationen zu finden. Wir argumentieren jedoch, dass jedes spezifische Interferenzmuster stark von zeitlichen Schwankungen der Quellen und atmosphärischen Parametern beeinflusst wird, die sich jedoch verringern, da die Messungen über mehrere Minuten erfolgen. Wir betonen, dass die von uns vorgestellten Simulationsergebnisse keine Momentaufnahmen des SPL zu einem bestimmten Zeitpunkt sind, sondern als Mittelwerte über alle möglichen Phasenkombinationen unter den Annahmen unseres Modells betrachtet werden sollten. In der Realität werden lokale Schwankungen des SPL sowohl zeitlich als auch räumlich erheblich sein.

2.2. Windmodellierung

Der Einfluss des Windes wird modelliert, indem $c(\mathbf{x})$ und $\rho(\mathbf{x})$ in (1) durch die effektive Schallgeschwindigkeit und die effektive Dichte [43], definiert als

$$c_{eff}(\mathbf{x}) = c(\mathbf{x}) + s^{\wedge}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{V}(\mathbf{x}) \quad \text{und} \quad \rho_{eff}(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) - \frac{2\rho_0}{c_0} s^{\wedge}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{V}(\mathbf{x}), \quad (12)$$

wobei $s^{\wedge}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}^*}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*|}$ ist der Einheitsvektor in der Schallausbreitungsrichtung,

$\mathbf{V}(\mathbf{x})$ ist der Windvektor, und $c_0 = 340,3 \text{ m/s}$ und $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ sind atmosphärische Referenzwerte. Diese Näherung gilt, wenn sich der größte Teil des Schalls entlang $s^{\wedge}(\mathbf{x})$ ausbreitet, was zutrifft, wenn wir jeweils für eine Quelle lösen und wenn sich sowohl die Quelle als auch der Empfänger in der Nähe des Boden [9,44].

Anmerkung 2. Die Näherung in [43] gilt unter der Annahme, dass die Schwankungen der Dichte und der Schallgeschwindigkeit moderat bleiben und dass die Windgeschwindigkeit viel kleiner ist als die Schallgeschwindigkeit. Diese Bedingungen sind für die in der vorliegenden Studie betrachteten Probleme erfüllt. Für eine allgemeinere und genauere Behandlung von zeitabhängigen 3D-Windeinflüssen muss man stattdessen die linearisierten Euler-Gleichungen in 3D anwenden, wie in [7,45] gezeigt.

2.3. Modelldaten

Um aus Simulationen nützliche und verlässliche Ergebnisse zu erhalten, ist es entscheidend, reale Daten zu verwenden. In unserem Modell müssen wir die folgenden Koeffizienten festlegen sind die Schallgeschwindigkeit $c(\mathbf{x})$, die Dichte $\rho(\mathbf{x})$, die Dämpfung $\beta(\mathbf{x})$ und die

Wind $\mathbf{V}(\mathbf{x})$, den effektiven Strömungswiderstand $\sigma_e(\mathbf{x})$ und die Quellenposition \mathbf{x}^* und Amplitude \hat{A} . Wir verwenden Höhendaten von *Lantmäteriet* [17] (1 m Auflösung), um Ω zu erstellen. Die Obergrenze wird für alle Simulationen.

Für großräumige Freiluftsimulationen ist es besonders wichtig, atmosphärische Daten in das Modell einzubeziehen. In der vorliegenden Studie verwenden wir MEPS-Atmosphärendaten des *Norwegischen Meteorologischen Instituts*, die alle benötigten atmosphärischen Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von 2,5 km auf 65 Höhenstufen bis zu etwa 10 km bereitstellen. Der atmosphärische Dämpfungskoeffizient wird als Funktion von Temperatur, Druck, Feuchte und Frequenz definiert [46]. Die Schallgeschwindigkeit und die Dichte werden aus den Temperatur-, Druck- und Feuchte-Daten gemäß den in [47] dargestellten Formeln berechnet.

Der effektive Strömungswiderstand σ_e für die Bodenrandbedingung ist stark vom Typ der Bodenoberfläche im Berechnungsgebiet

. In dieser Arbeit unterscheiden wir zwischen zwei verschiedenen Arten: hart und halbhart. Wir verwenden Landbedeckungsdaten von Naturvärdsverket [48], die die gesamte Oberfläche Schwedens in mehrere Bodenklassen unterteilt. Wir setzen $\sigma_e = 200.000.000 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ für offensichtlich harte Oberflächen (Wasser, Asphalt usw.) und $\sigma_e = 500.000 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ für den Rest (Waldboden, Ackerflächen usw.). Diese Wahl ist recht konservativ, was möglicherweise zu geringe Bodendämpfung führen. Die Untersuchung der Unsicherheiten, die mit der Modellierung der Bodengrenze allein auf der Grundlage von Daten aus Satellitenbildern und Flugzeug-Laserscans verbunden sind, würde jedoch den Rahmen dieser Studie sprengen.

Wir modellieren die Windkraftanlage in jeder Simulation als Punktquelle, die sich an der Nabe befindet. Die Koordinaten jeder Anlage und ihre Nabenhöhe werden aus den ursprünglichen Schallemissionsberechnungen entnommen (die Grundlage für den Genehmigungsantrag des Windparks).

In der vorliegenden Arbeit konzentrieren wir uns auf die Schallausbreitung bei der Frequenz $f = 1 \text{ Hz}$, der niedrigsten Frequenz, die wir mit der derzeitigen Ausrüstung messen können. Idealerweise sollten die Infraschallmessungen bis 0,1 Hz reichen, um die BPF der neuen, größeren Windkraftanlagen zu erfassen, die voraussichtlich

zwischen 0,2 und 0,5 Hz liegen. Wir werden Messungen an realen Windparks verwenden, um die Quellenamplituden \hat{A} bei 1 Hz zu bestimmen, sodass die gemessenen SPL-Werte so gut wie möglich mit den simulierten SPL-Werten übereinstimmen. Die

von uns angegebenen Schalleistungspegel sollten im Kontext unseres Schallausbreitungsmodells verstanden werden, das eine Vereinfachung der Realität darstellt. Erstens gehen wir

die Annahme, dass alle Turbinen Punktquellen sind, die sich in der Nabe befinden (keine Richtwirkung), und dass sie alle die gleiche Schallleistung abgeben. Die zweite große Unsicherheit sind die atmosphärischen und Bodendaten, die eine begrenzte Auflösung und Genauigkeit aufweisen. Wie wir jedoch in Abschnitt 7.3 zeigen, ist der Einfluss der Atmosphäre in den Entfernungen, in denen wir die Messungen durchführen, relativ gering. Eine detailliertere Analyse der Richtwirkung von Windkraftanlagen im Infraschallbereich und des Ausmaßes der Unsicherheit aufgrund der atmosphärischen Daten würde den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen.

Anmerkung 3. Durch die Kombination von genauen Schallmessungen, aktuellen atmosphärischen Daten und unserem Simulationswerkzeug lassen sich die Schallleistungspegel der Quellen über den gesamten Niederfrequenzbereich bestimmen (unter den Annahmen unseres Modells). Auch hochfrequenter Schall kann mit dieser Technik analysiert werden, wäre jedoch naturgemäß auf einen viel

kleinere Domänen, bedingt durch die starke Absorption in der Atmosphäre und am Boden.

2.4. Energiemethode

Bei linearen Problemen kann die Energiemethode zum Nachweis der Stabilität von PDEs herangezogen werden und ist daher für die Wohlgestelltheit von Bedeutung [49]. Sei

$$(u, v)_{\Omega} = \int_{\Omega} uv \, dx \text{ und } (u, v)_{\partial\Omega} = \int_{\partial\Omega} uv \, dx \quad \forall u, v \in \mathbb{R}, \quad (13)$$

bezeichnen L^2 -Skalarprodukte über dem Definitionsbereich bzw. seiner Randfläche.

Um die folgende Analyse zu vereinfachen, fassen wir Terme zusammen und schreiben die PDE als

$$u_{tt} = a \nabla \cdot (b \nabla u) + \alpha u_t + S(x, t), \quad x \in \Omega, \quad t > 0$$

$$\gamma_1 u + b n \cdot \nabla u + \gamma_2 u_t = 0, \quad x \in \partial\Omega, \quad t > 0, \quad (14)$$

$$u = u_t = 0, \quad x \in \Omega, \quad t = 0,$$

wobei $a = a(x) = c(x)^2 \rho(x)$, $b = b(x) = 1$, $\alpha = \alpha(x) = \beta(x)c(x)^2 \rho(x)$,

und $\gamma_1 = \gamma_1(x)$ und $\gamma_2 = \gamma_2(x)$ bestimmen die Randbedingung. Mit dieser allgemeinen Randbedingung können wir sowohl die Randbedingungen erster Ordnung für den Abfluss ($\gamma_1 = 0$ und $\gamma_2 = \frac{b \cdot \nabla u}{c(x)}$) als auch die Impedanzrandbedingung

Bedingungen ($\gamma_1 = \frac{b \cdot \nabla u}{c(x)}$ und $\gamma_2 = \frac{b \cdot \nabla u}{c(x)}$) in (14) haben wir außerdem die homogenen Anfangsbedingungen.

Die Quelldaten haben keinen Einfluss auf die Stabilität [49], daher setzen wir in der folgenden Stabilitätsanalyse. Durch Multiplikation der PDE (14) mit u_t und $S(t) = 0$

Integration über den Definitionsbereich Ω

$$\left(\begin{matrix} u_t \\ u_t \end{matrix} \right) = (u_t, \nabla \cdot (b \nabla u)) + (u_t, \beta u_t)$$

$$= -(\nabla u_t, b \nabla u)_{\Omega} + (u_t, b n \cdot \nabla u)_{\partial\Omega} + (u_t, \beta u_t)_{\Omega}$$

$$= -(\nabla u_t, b \nabla u)_{\Omega} - (u_t, \gamma_1 u)_{\partial\Omega} - (u_t, \gamma_2 u_t)_{\partial\Omega} + (u_t, \beta u_t)_{\Omega}, \quad (15)$$

wobei im letzten Schritt die Randbedingung eingesetzt wurde. Durch Umstellen der Terme erhält man

$$\frac{d}{dt} E = -2(u_t, \gamma_1 u)_{\partial\Omega} + 2(u_t, \beta u_t)_{\Omega}, \quad (16)$$

wobei E eine Energie ist, die gegeben ist durch

$$E = \frac{1}{2} \int_{\Omega} u_t^2 + (\nabla u, b \nabla u) + (u, \gamma_1 u)_{\partial\Omega} + \int_{\Omega} \beta u^2 \quad (17)$$

Damit E eine gültige mathematische Energie ist, muss sie nicht-negativ sein, was gewährleistet ist, wenn $a > 0$, $b \geq 0$ und $\gamma_1 \geq 0$ ist. Stabilität ist gegeben, wenn die Energie nicht wachsend, d. h., wenn die rechte Seite von (16) nicht positiv

was garantiert ist, wenn $\gamma_2 \geq 0$ und $\beta \leq 0$. Diese Bedingungen sind alle erfüllt für die in unserem Modell verwendeten physikalischen Parameter. Bei linearen PDEs ist Stabilität in Kombination mit der richtigen Anzahl von Randbedingungen eine hinreichende Bedingung für die Wohlgestelltheit [49].

3. Diskretes Modell

Aus Platzgründen verzichten wir auf Details zur räumlichen Diskretisierung. Kurz gesagt berechnen wir zunächst eine Koordinatentransformation des Bereichs Ω in einen Referenzbereich in Form eines Einheitswürfels unter Verwendung linearer transfiniter Interpolation. Anschließend diskretisieren wir den Referenzbereich in ein äquidistantes kartesisches Gitter und approximieren alle räumlichen Operatoren unter Verwendung der gut dokumentierten SBP-SAT-Finite-Differenzen-Methode. Für Einzelheiten verweisen wir auf [6,7,14–16,50–52]. Für die Windparksimulationen verwenden wir SBP-Finite-Differenzen-Operatoren zweiter Ordnung mit Diagonalnorm (abgeleitet in [15]) und eine ausreichend große Anzahl von Gitterpunkten, um in allen Richtungen 10 Punkte pro Wellenlänge bei einer Wellengeschwindigkeit von 330 m/s zu erhalten.

Die SBP-SAT-Methode führt zu einem nachweislich stabilen System von ODE zweiter Ordnung, das durch

$$v_{tt} = Dv + Ev_t + F(t), \quad t > 0,$$

$$v(0) = v_t(0) = 0, \quad t = 0, \quad (18)$$

wobei $v \in \mathbb{R}^N$ der halbdiskrete Lösungsvektor (zeitabhängig) ist, N die Gesamtzahl der Gitterpunkte ist, D und E negative semidefinite $N \times N$ -Matrizen sind und $F(t)$ die diskretisierte Antriebsfunktion ist (siehe [7,16,51]

(für Details). In der vorliegenden Studie verwenden wir SBP-Finite-Differenzen-Operatoren zweiter, vierter und sechster Ordnung mit Diagonalnorm, die in [15].

Anmerkung 5. In [53] wurde gezeigt, dass eine stabile Approximation der Wellengleichung in der Form zweiter Ordnung unter Verwendung von SBP-Finite-Differenzen-Operatoren mit Diagonalnorm und einer Genauigkeit zweiter bzw. vierter Ordnung Konvergenzraten der Ordnung 2 bzw. 4 liefert. Dies wird in Tabelle 1 verifiziert.

3.1. Zeitliche Diskretisierung

Für die Zeitschrittung verwenden wir die folgende explizite Zwei-Schrittmethode:

$$\frac{w_{n+1} - 2w_n + w_{n-1}}{h^2} = Dw + E w_n + \frac{w_{n+1} - w_{n-1}}{2h} + F(t_n), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (19)$$

wobei h eine konstante zeitliche Schrittweite $h = h_n$, $n = 0, 1, 2, \dots$, und w ist, $t = t_n$

eine Näherung von $v(t_n)$ ist. Als iterative Formel geschrieben, erhalten wir

$$\left(I - \frac{h}{2} E \right) w_n = (2I + h^2 D) w_{n-1} - \left(I + \frac{h}{2} E \right) w_{n-2} + h^2 F(t_n), \quad (20)$$

wobei I_N die zeitliche Schrittweite $N \times N$ ist, die aufgrund dessen und die eine ap-

Da die Matrix E diagonal ist, gilt $I_N - hE$ leicht zu invertieren.

Um die Genauigkeit zweiter Ordnung für alle Zeitpunkte beizubehalten, müssen wir auch die anfänglichen Zeitschritte mit Genauigkeit zweiter Ordnung berechnen. Der erste Zeitpunkt

Die erste Stufe wird durch die Anfangsdaten gegeben, d. h. $w_0 = v(0)$, aber die zweite Zeitsstufe

erfordert eine etwas sorgfältigere Betrachtung; hier verwenden wir den modifizierten Differenzansatz. Betrachten wir die Näherung erster Ordnung der ersten Ableitung und ihren Abschneidefehler

$$\frac{v(t_{n+1}) - v(t_n)}{h} = v'(t_n) + \frac{h}{2} v''(t_n) + O(h^2). \quad (21)$$

Unter Verwendung der ODE (18) zur Substitution des Terms $v_{tt}(t_n)$ erhalten wir

$$\frac{v(t_{n+1}) - v(t_n)}{h} = v'(t_n) + \frac{h}{2} (Dv(t_n) + Ev_t(t_n) + F(t_n)) + O(h^2). \quad (22)$$

mit der wir eine auf die zweite Ordnung genaue Näherung der Lösung bei t_1 wie folgt berechnen:

$$w_1 = v(0) + h v_t(0) + \frac{h^2}{2} (Dv(0) + Ev_t(0) + F(0)). \quad (23)$$

Anmerkung 4. Der Quellterm spielt eine entscheidende Rolle im Modell, obwohl er weder die Stabilität noch die Wohlgestelltheit beeinflusst, weshalb er üblicherweise als Null angenommen wird. In den Simulationen behalten wir ein

Bei homogenen Anfangsdaten gilt $w_0 = 0$ und $w_1 = \frac{h}{2} \mathbf{F}(0)$.

Die Stabilitätsgrenze der Zeitschrittformel (20) lässt sich zeigen als proportional zum kleinsten Abstand zwischen zwei benachbarten Gitterpunkten nachweisen. In dieser Arbeit bestimmen wir die Stabilitätsgrenze experimentell und wählen, sofern nicht anders angegeben, den Zeitschritt auf 50 % der Stabilitätsgrenze.

4. Implementierungsdetails

Die numerische Methode wird in einem eigens entwickelten Code unter Verwendung von C++ und CUDA zur GPU-Beschleunigung implementiert. Die gesamte Vor- und Nachbearbeitung erfolgt in Matlab (Gittererzeugung, Einlesen von Daten, Erstellen von Koeffizientenvektoren, Plotten usw.). Wir bezeichnen das gesamte Softwarepaket als SoundSim360.

Die in diesem Artikel vorgestellten Simulationen werden in einer einzigen Nvidia RTX A6000 GPU mit 48 GB internem Speicher und 10.752 CUDA-Kernen. Alle Simulationen werden in einfacher Genauigkeit durchgeführt (die Ergebnisse mit doppelter Genauigkeit sind identisch). Die Implementierung erfolgt matrixfrei, was bedeutet, dass nur wenige Kopien der Lösungsvektoren im Speicher abgelegt werden müssen (die räumlich abhängigen Koeffizienten und die Zeitschrittvektoren). Als Referenz für die Leistungsfähigkeit der GPU-Implementierung: Die Erstellung einer Rauschkarte über ein Gebiet von $15 \times 15 \times 5 \text{ km}^3$, wie in Abb. 12, erfordert etwa 12 Minuten Rechenzeit (24 Simulationen – eine pro Quelle – mit einer Dauer von jeweils etwa 30 Sekunden). Ein Matlab-Code, der spärliche Matrizen auf einer Standard-CPU verwendet, würde etwa 20 Stunden benötigen, um diese Ergebnisse zu erzielen. Im Allgemeinen dauert die Matlab-Implementierung je nach konkretem Problem zwischen 70 und 100 Mal länger als die GPU-Implementierung. Außerdem beansprucht die matrixbasierte Implementierung deutlich mehr Speicher und erfordert mehr Vorverarbeitung zum Aufbau der Matrizen.

5. Verifizierung

Bevor wir uns den Simulationen mit realen Daten zuwenden, überprüfen wir die Genauigkeit und die Implementierung der numerischen Methode durch zwei Verifizierungstests. Zunächst erfolgt ein Vergleich mit einem bekannten Benchmark-Problem und anschließend eine Konvergenzstudie mit physikalisch relevanten Daten.

5.1. Benchmark

Wir betrachten zwei der in [54] vorgestellten 10-Hz-Benchmark-Probleme, die als Fall 2 und Fall 4 bezeichnet werden. Diese Probleme bestehen aus einer einzelnen harmonischen Punktquelle bei $z = 5 \text{ m}$, einer flachen Topografie und einem nicht konstanten Schallgeschwindigkeitsprofil. Für Fall 2 ist das Schallgeschwindigkeitsprofil definiert als

$$c(z) = c_0 + 0.1z, \tag{24}$$

wobei $c_0 = 343 \text{ m/s}$ und $z \geq 0$. Dieses Profil führt zu erheblichen Abwärtsrefraktion auf allen Höhen. Das Profil von Fall 4 ist definiert als

$$c(z) = \begin{cases} 0.1, & 0 \leq z < 100, \\ -0.1, & 100 \leq z < 300, \\ 0, & z \geq 300. \end{cases} \tag{25}$$

und $c(0) = c_0$. Beim Profil von Fall 4 tritt eine Abwärtsrefraktion für die ersten 100 m, dann eine Aufwärtsrefraktion bis 300 m und anschließend eine konstante

Atmosphäre durchgeführt. Die Dichte wird auf $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ und die Dämpfung auf $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ dB/km}$ festgelegt (für die betrachteten Entfernungen vernachlässigbar). Die normierte Oberflächenimpedanz (bei $z = 0 \text{ m}$) wird auf $Z^{\wedge} = 38,79 + 38,41i$ festgelegt.

Wir simulieren Fall 2 und Fall 4 mit SoundSim360 und berechnen den Übertragungsverlust bei $z = 1 \text{ m}$ für beide Fälle wie folgt:

$$TL(r) = -20 \log_{10} \frac{p_{rms}(r)}{p_{free}}, \tag{26}$$

wobei $p_{rms}(r)$ der Effektivwert des berechneten Druckfeldes in Entfernung r von der Quelle und p_{free} der Effektivwert des Freifelddrucks in 1 m Entfernung (sphärische Symmetrie) ist. Die Obergrenze des Berechnungsbereichs ist ausreichend hoch gewählt, um sicherzustellen, dass sie den Übertragungsverlust am Boden nicht beeinflusst. In beiden Fällen wenden wir unsere Diskretisierungsmethode unter Verwendung von SBP-Operatoren 6. Ordnung mit 20 Gitterpunkten pro Wellenlänge (bezogen auf eine Wellengeschwindigkeit von 330 m/s) und einem Zeitschritt von 1% der Stabilitätsgrenze an. In

Abb. 2 stellen wir den Übertragungsverlust bis zu $r = 10000 \text{ m}$ für Fall 2 und Fall 4. Ein visueller Vergleich zeigt, dass unsere Ergebnisse mit dem in [54] angegebenen Referenzwert.

Um sicherzustellen, dass unsere Referenzlösungen korrekt sind, simulieren wir die Probleme auch mit 10 Punkten pro Wellenlänge und einem Zeitschritt von 2% der Stabilitätsgrenze. Wir stellen dann fest, dass die Lösungen bis auf etwa fünf Dezimalstellen mit den Lösungen in Abb. 2 übereinstimmen. Da die Diskretisierung nachweislich konsistent und stabil ist, gilt der Lax-Äquivalenzsatz, der die Konvergenz garantiert [55]. Daher können wir schlussfolgern, dass die Ergebnisse in Abb. 2 korrekt sind.

5.2. Konvergenzstudie

Obwohl der Benchmark in Abschnitt 5.1 ein guter Test für die Implementierung von Refraktion und Randbedingungen ist, berücksichtigt er nicht alle für Langstreckensimulationen relevanten physikalischen Aspekte. Es handelt sich um ein zweidimensionales Problem in zylindrischen Koordinaten, das beispielsweise keine 3D-Atmosphären oder die Auswirkungen der Topografie testet. Um unsere Methode weiter zu verifizieren, führen wir einen Konvergenztest an einem 3D-Problem durch, das enger mit Simulationen mit realen Daten verbunden ist. Leider lassen sich analytische Lösungen in geschlossener Form für die Wellengleichung zweiter Ordnung mit allgemeinen Koeffizienten nur schwer ableiten, insbesondere bei komplizierten Geometrien. Stattdessen verwenden wir eine synthetisch erzeugte Referenzlösung. Betrachten wir den Bereich $x, y, z \in [0, 1600] \times [0, 1600] \times [H(x, y), 800] \text{ m}^3$

dargestellt in Abb. 3. Die Höhe (Geländehöhe) ergibt sich aus

$$H(x, y) = H_c e^{-\frac{(x-x_c)^2}{r^2} - \frac{(y-y_c)^2}{r^2}}, \tag{27}$$

d. h. ein Gauß-Profil mit einer Höhe von $H_c = 100 \text{ m}$, zentriert bei $[x, y] = [x_c, y_c]$ [900, 700], mit einer Breite von $r = 200 \text{ m}$. Eine Punktquelle mit $f = 1 \text{ Hz}$ befindet sich bei $[x_s, y_s, z_s]$, wobei $x_s = y_s = 800 \text{ m}$ und $z_s = H(x_s, y_s) + 125 \approx 185,65$

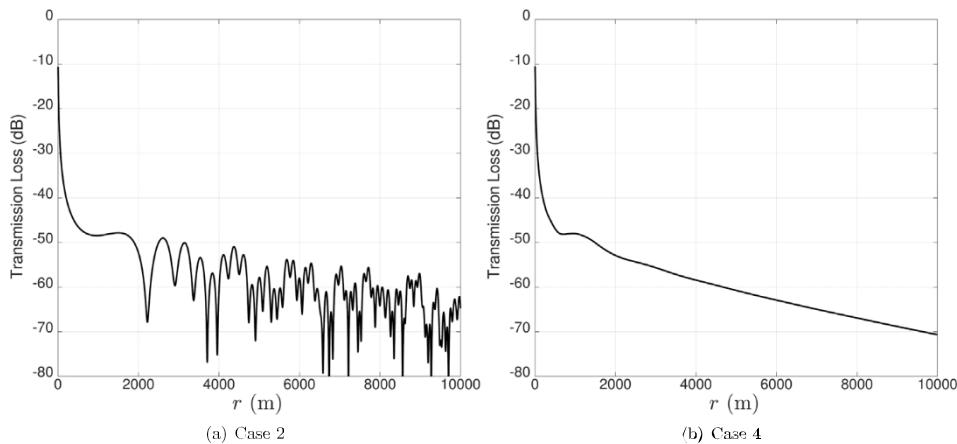


Abb. 2. Übertragungsverlust in 1 m Entfernung als Funktion der Entfernung für (a) Fall 2 und (b) Fall 4 der Schallgeschwindigkeitsprofile.

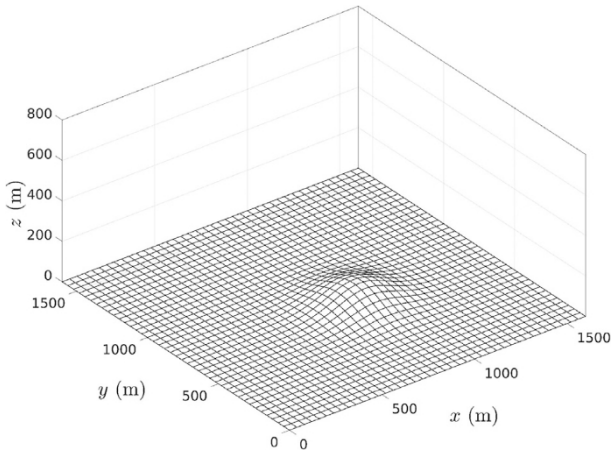


Abb. 3. Berechnungsbereich (zeigt nur Gitterpunkte am Boden).

m. Die Mediumparameter (Wellengeschwindigkeit, Dichte und Dämpfung) sind als Funktionen der Höhe (Entfernung vom Boden) angegeben und in Abb. 4 dargestellt. Diese Profile wurden aus einem typischen Nachtprofil abgeleitet, das an ein Polynom vierter Ordnung angepasst wurde (um eine glatte Kurve zu gewährleisten).

Die Referenzlösung wird durch Simulation bis $t = 1,8$ Sekunden unter Verwendung von Operatoren sechster Ordnung auf einem Gitter mit $901 \times 901 \times 451 \approx 366 \cdot 10^6$

Freiheitsgraden (DOF), siehe Abb. 5.

Der Zeitschritt wird auf 1 % der Stabilitätsgrenze festgelegt, um sicherzustellen, dass der zeitliche Fehler vernachlässigbar ist. Wie in Abschnitt 5.1 überprüfen wir, ob diese Referenzlösung ausreichend verfeinert ist, indem wir sie mit der Lösung auf einem gröberen Gitter vergleichen, und stellen fest, dass die Unterschiede gering sind. Somit kann diese hochauflösende Referenzlösung als Ersatz für analytische Lösungen dienen, wenn sie mit weniger genauen Näherungen verglichen wird. Hier bewerten wir das Konvergenzverhalten von SBP-Operatoren zweiter und vierter Ordnung auf Gittern mit 3x, 6x und 10x größeren räumlichen Schrittweiten.

Wir bewerten die Genauigkeit der Schemata anhand des relativen

L_2 -Fehler, der durch

$$e_p^{(N)} = \frac{\|v_p^{(N)} - v_{ref}\|_2}{\|v_{ref}\|_2} \quad (28)$$

wobei $v_p^{(N)}$ die Lösung der Ordnung p mit N Freiheitsgraden ist und v_{ref} die auf das kleinere Gitter beschränkte Referenzlösung ist. Für zwei Lösungen mit unterschiedlicher Anzahl von Freiheitsgraden N_1 und N_2 schätzen wir die Konvergenzrate wie folgt

$$q_p = \frac{\log\left(\frac{e_p^{(N_1)}}{e_p^{(N_2)}}\right)}{\log\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{1/3}} \quad (29)$$

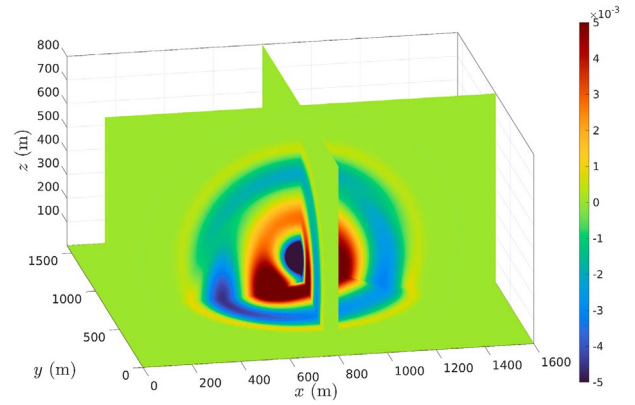


Abb. 5. Die Referenzlösung (bei $t = 1,8$).

Tabelle 1

Fehler und Konvergenzraten von SBP-Operatoren zweiter und vierter Ordnung im Vergleich zu einer hochauflösenden Referenzlösung, die mit SBP-Operatoren sechster Ordnung ermittelt wurde.

| DOF | $\log_{10}(\epsilon_2)$ | q_2 | $\log_{10}(\epsilon_4)$ | q_4 |
|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| 3,8e5 | -0,56 | - | -0,54 | - |
| 1,7e6 | -1,03 | 2,17 | -1,01 | 2,16 |
| 1,4e7 | -1,81 | 2,59 | -2,23 | 4,07 |

In Tabelle 1 sind die Konvergenzraten für genaue SBP-Operatoren zweiter und vierter Ordnung dargestellt, die zeigen, dass wir mit zunehmender Gitterfeinheit die erwarteten Konvergenzraten erhalten.

6. Infrasschallmessungen

Die Bedeutung der Atmosphäre kann nicht genug betont werden, wenn es um die Schallausbreitung geht, aber auch um die von modernen Windkraftanlagen erzeugten Schallleistungspegel. Es besteht ein großer Unterschied zwischen dem Tag

sowie die atmosphärischen Bedingungen in der Nacht, insbesondere in bewaldeten Gebieten

[56], wo sich viele der neuen Windparks in Schweden befinden. Es gibt zudem saisonale Schwankungen der atmosphärischen Bedingungen [9], insbesondere über der Ostsee [57], die sowohl Offshore- als auch Onshore-Windparks betreffen.

Die Messung von Infrasschall unterscheidet sich grundlegend von der Messung hörbarer Schallwellen und erfordert sorgfältig kalibrierte Niederfrequenzmessgeräte. Die in dieser Studie verwendeten Geräte werden im Folgenden in Abschnitt 6.1 beschrieben. Aufgrund von Aufgrund der großen Größe der Quelle (Windkraftanlagen) und der langen Wellenlänge des 1-Hz-Schalls (mehrere hundert Meter) sollten Empfänger nicht platziert werden

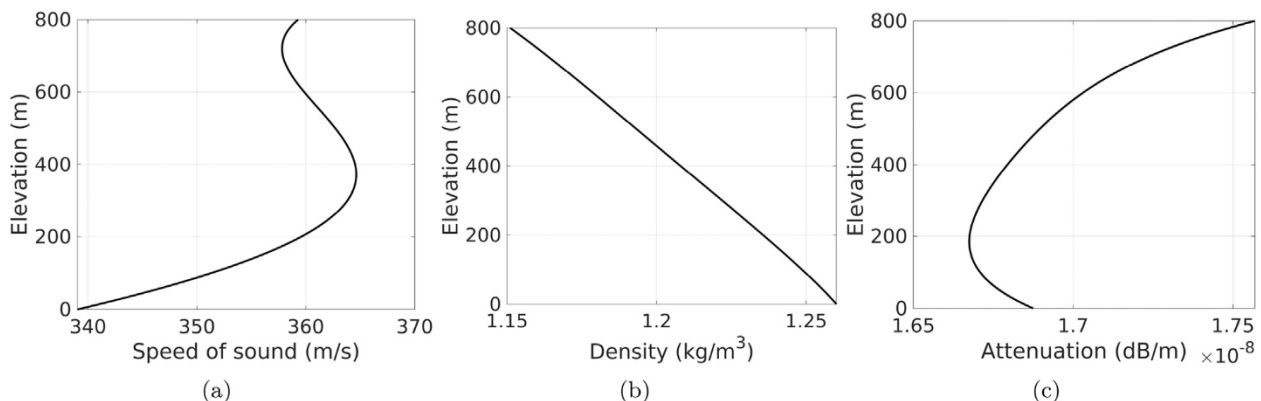


Abb. 4. Für die Konvergenzstudie verwendete atmosphärische Daten: (a) Schallgeschwindigkeit, (b) Luftdichte und (c) akustische Dämpfung.



Abb. 6. Infraschallmessung am Målarberget am 16. Dezember 2024.

in unmittelbarer Nähe der Turbinen platziert werden, wo die Punktquellen-Näherung weniger gültig ist. Umgekehrt sollten Messungen auch nicht zu weit entfernt durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das aufgezeichnete Signal von dem betreffenden Windpark stammt, und um Modellierungsfehler im Zusammenhang mit atmosphärischen Effekten zu minimieren. Dementsprechend wurden die Messungen in einer Entfernung von etwa 500 m bis 2 km von der nächsten Turbine durchgeführt.

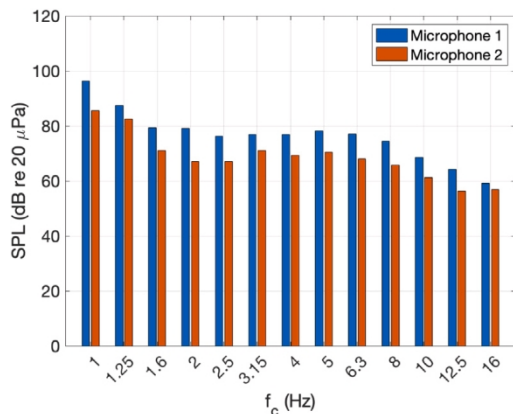
Tabelle 2
Der gemessene Schalldruckpegel (SPL) im 1-Hz-Drittoktavband, Windpark Målarberget.

| Messung | Mikrofon 1 | Mikrofon 2 |
|-----------------------------|------------|------------|
| 26.10.2023 (13:00 Uhr MESZ) | 96,3 dB | 85,6 dB |
| 23.10.2024 (11:00 Uhr MESZ) | 91,6 dB | 99,3 dB |
| 16.12.2024 (12:00 MESZ) | 115,5 dB | – |

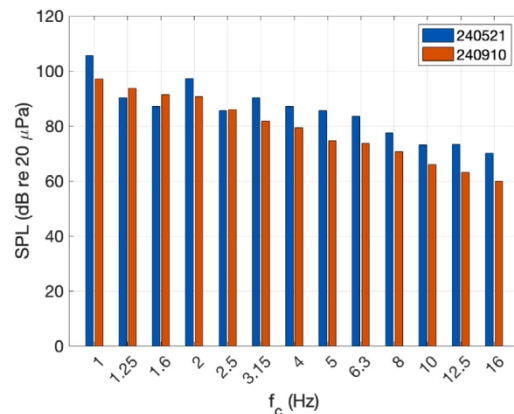
Infraschall um 1 Hz weist im Vergleich zu hörbarem Schall über 100 Hz besondere Eigenschaften auf. Aufgrund seiner langen Wellenlänge ist er weniger empfindlich gegenüber Unsicherheiten bei der Boden- und atmosphärischen Dämpfung sowie gegenüber Turbulenzen in der atmosphärischen Grenzschicht oder der Vegetation. Moderne Windkraftanlagen sind starke Emittenten in diesem Frequenzbereich und erzeugen Pegel, die deutlich über den typischen Hintergrundpegeln liegen, wie in Abb. 8 dargestellt. Diese Eigenschaften rechtfertigen unsere Messstrategie und stützen die anschließende Analyse der Schalleistungspegel von Windkraftanlagen.

6.1. Infraschall-Messgeräte

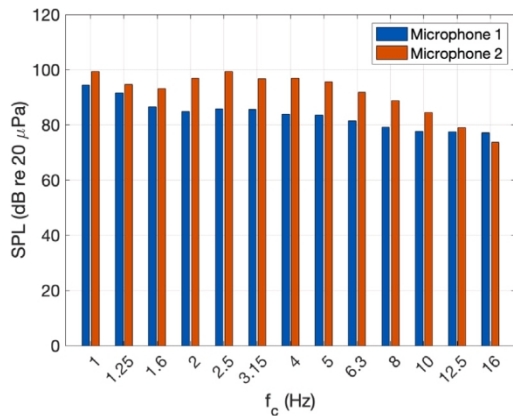
Die genaue Messung von Infraschall bis hinunter zu 1 Hz erfordert Instrumente, die nachweislich kalibriert sind. Eine relative Kalibrierung kann in einem Gewölbe durchgeführt werden, wie beispielsweise in einer der CTBTO-zertifizierten Infraschallstationen. Wir führten die Kalibrierung bei NORSAR in Bezug auf eines ihrer Hyperion-Mikrofone an deren Station in Elverum durch. In der vorliegenden Studie wurde ein 65-mm-Lidström-Mikrofon des schwedischen Herstellers Gargnäs Electronics als Schalldrucksensor verwendet, das bei NORSAR kalibriert wurde. Das



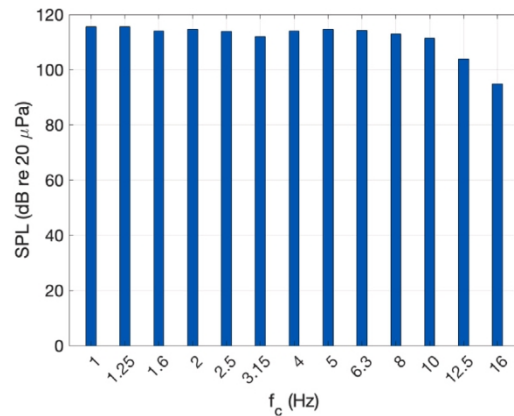
(a) Målarberget 2023-10-26



(b) Lervik 2024-05-21 and 2024-09-10



(c) Målarberget 2024-10-23



(d) Målarberget 2024-12-16

Abb. 7. Infraschallmessungen (Dritt-Oktav-Bänder, Mittenfrequenzen f_c 1–16 Hz) im Windpark Målarberget: (a) 26.10.2023 (13:00 MESZ), (c) 23.10.2024 (11:00 MESZ), (d) 16.12.2024 (12:00 Uhr MESZ); und (b) Lervik 21.05.2024 (15:00 Uhr MESZ), 10.09.2024 (15:00 Uhr MESZ). Die Abb. 9–16 zeigen die Wetterdaten.

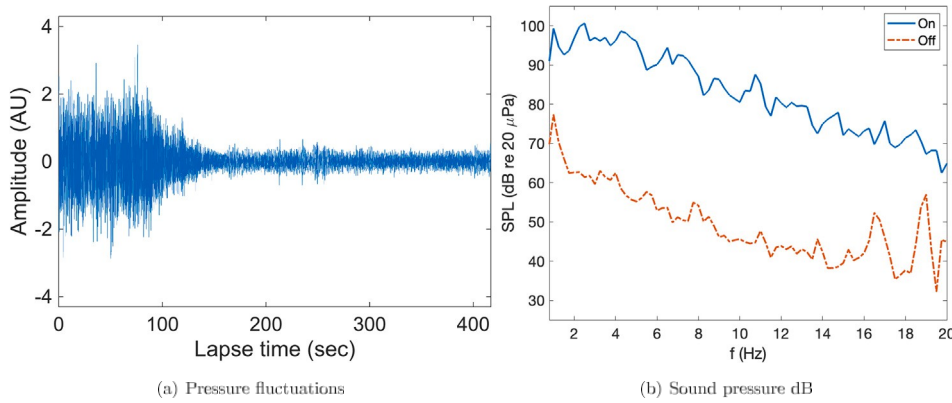


Abb. 8. (a) Zeitverlauf der Druckschwankungen, (b) kontinuierliches Druckspektrum am Standort Målarberget am 23.10.2024, Mikrofon 2. Bei eingeschalteter und ausgeschalteter Anlage. Der Fall mit eingeschalteter Turbine wurde anhand des Zeitraums von 10–60 s geschätzt, während der Fall mit ausgeschalteter Turbine dem Zeitraum von 276–373 s der Zeitreihe entnommen wurde.

Lidström-Mikrofone wurden Anfang der 1980er Jahre in Schweden entwickelt, um beispielsweise Hubschrauber zu erkennen. Sie sind speziell für die Erfassung von Niederfrequenzschall ausgelegt und eignen sich gut zur Erfassung von Infraschallimpulsen bis hinunter zu 1 Hz. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Leistungsfähigkeit des Mikrofons findet sich in [58]. Das Datenerfassungssystem wurde mit einer Abtastfrequenz von 1060 Hz konfiguriert, und um die Zuverlässigkeit der Daten zu erhöhen, wurde das Mikrofon mit einem speziellen Metallwindschutz vor Windstörungen abgeschirmt, wodurch unerwünschte Windgeräusche wirksam reduziert wurden. In Abb. 6 wird das Lidström-Mikrofon zur Messung von Infraschall am Målarberget am 16.12.2024 verwendet, und die Ergebnisse dieser Messung sind in

Abb. 7 und 14 dargestellt. Der Schalldruckpegel (SPL) in dB ist relativ zu 20 µPa.

Anmerkung 6. Idealerweise sollten die Infraschallmessungen bis 0,1 Hz reichen, um die BPF der neuen, größeren Windkraftanlagen zu erfassen, die voraussichtlich zwischen 0,2 und 0,5 Hz liegen wird. Das Lidström-Mikrofon ist jedoch nur bis 1 Hz genau. In einem zukünftigen Projekt werden wir empfindlichere Infraschallmikrofone wie Hyperion einsetzen, um Infraschall bis hinunter zu 0,1 Hz genau zu messen.

6.2. Messergebnisse

Wir haben dreimal Messungen im Windpark Målarberget durchgeführt: am 26.10.2023 um 13:00 Uhr MESZ, am 23.10.2024 um 11:00 Uhr MESZ und am 12.12.2024

16, 12:00 Uhr MESZ sowie zweimal im Windpark Lervik: am 21.05.2024 um 15:00 Uhr MESZ und am 10.09.2024 um 15:00 Uhr MESZ. Am 26.10.2023 und am 23.10.2024 setzten wir zwei Mikrofone an verschiedenen Standorten im Windpark Målarberget ein, bei den übrigen Gelegenheiten jeweils ein Mikrofon. Die Lage der Messpunkte im Verhältnis zu den Windkraftanlagen ist in den Abb. 12, 13, 14, 17 und 18 dargestellt.

Der Windpark Målarberget besteht aus 27 Windkraftanlagen des Typs Vestas V150-4,2 MW mit einer Nabenhöhe von 125 m (Gesamthöhe 125 + 75 = 200 m) und wurde 2021 in Betrieb genommen. Der Windpark Lervik besteht aus 7 Windkraftanlagen des Typs SG170-6,6 MW mit einer Nabenhöhe von 115 m (Gesamthöhe 115+85=200 m) und wurde 2024 in Betrieb genommen. Die

Messergebnisse, ausgedrückt in dB relativ zu 20 µPa, sind in Abb. 7 dargestellt. Der Vollständigkeit halber zeigen wir die

Ergebnisse bis

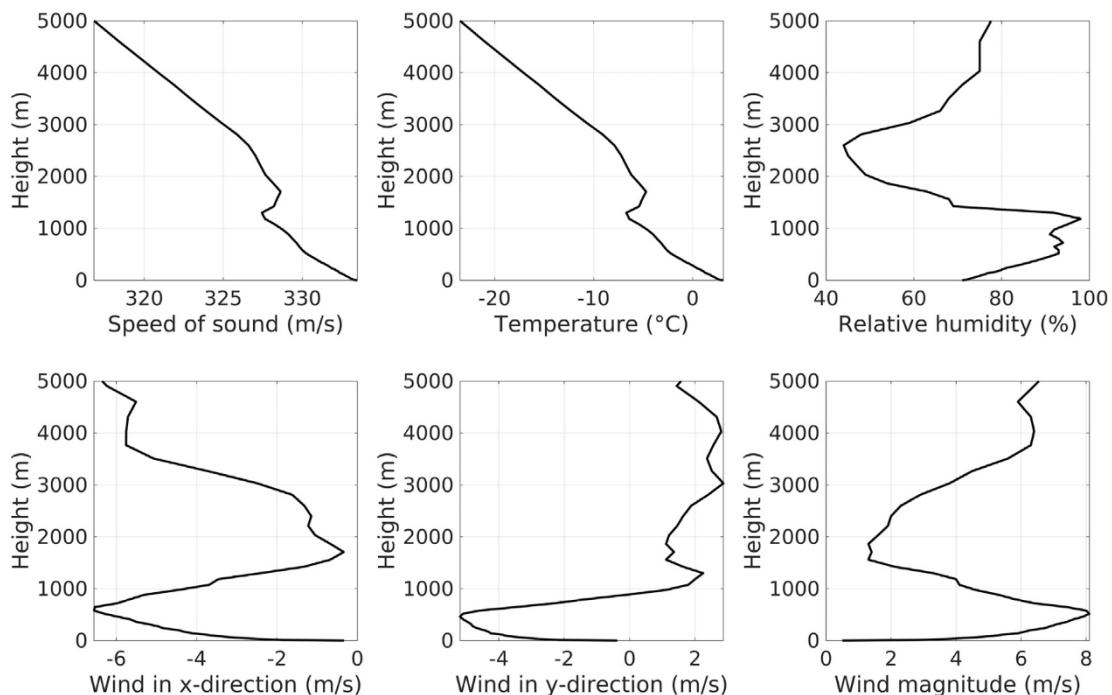


Abb. 9. Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Målarberget am 26.10.2023 (13:00 Uhr MESZ).

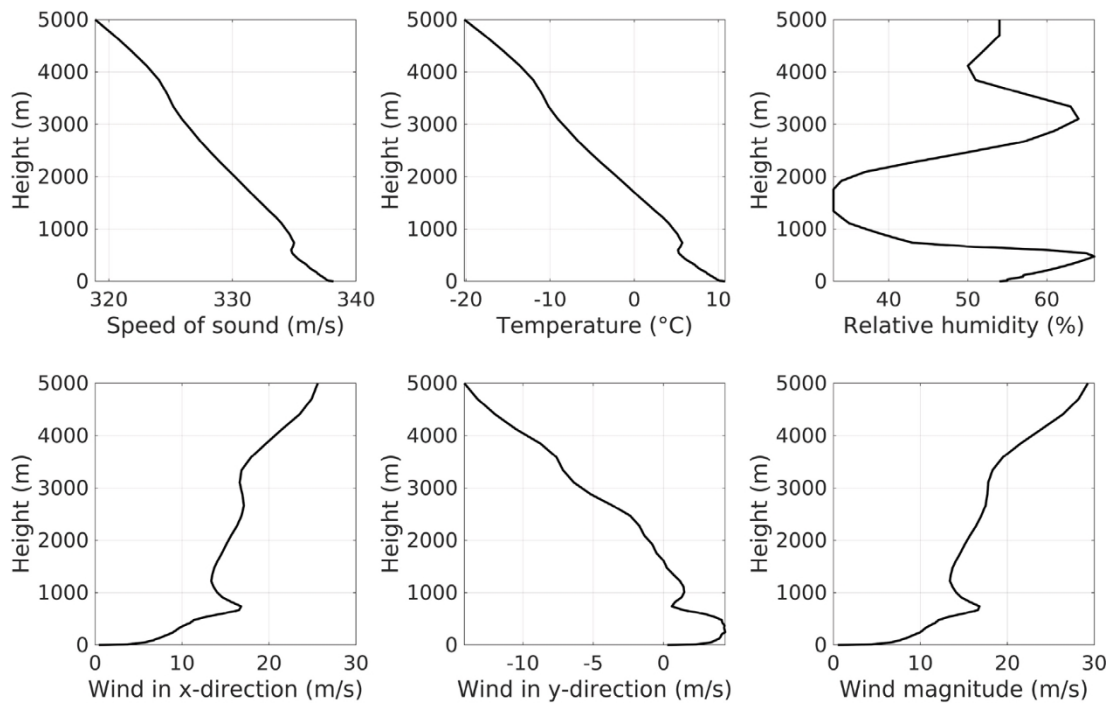


Abb. 10. Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Målarberget am 23.10.2024 (11:00 Uhr MESZ).

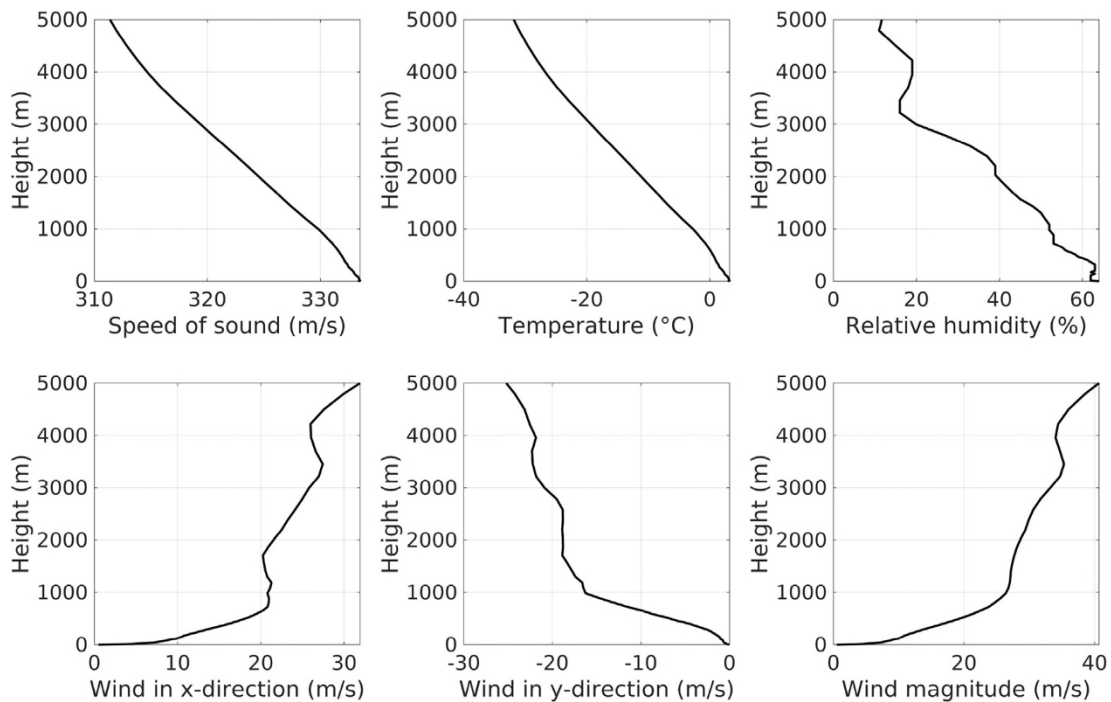


Abb. 11. Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Målarberget am 16.12.2024 (12:00 Uhr MESZ).

das 16-Hz-Drittoktavband, aber wir werden uns in den folgenden Abschnitten auf das 1-Hz-Band konzentrieren.

Um sicherzustellen, dass die gemessenen Infraschallpegel nicht durch Hintergrundgeräusche verursacht wurden, führten wir am 23.10.2024 im Windpark Målarberget während einer vollständigen Abschaltung der Anlage kontinuierliche Messungen durch. Abb. 8 zeigt die an diesem Tag an der Mikrofonposition

Position 2 an diesem Tag aufgezeichnet wurden und den Zeitraum erfassen, in dem die Turbinen allmählich zum Stillstand kamen. Die Aufzeichnung begann um 11:50 Uhr MESZ und deckt den Übergang vom Vollbetrieb zur vollständigen Abschaltung ab. Etwa 80 Sekunden nach Beginn der Messung begannen die Turbinen langsamer zu laufen und kamen nach etwa 150 Sekunden vollständig zum Stillstand. Während des Betriebs weist das Signal höhere Energiepegel auf, während nach der Abschaltung die Amplitude

nimmt rasch ab und stabilisiert sich auf einem deutlich niedrigeren Hintergrundniveau. Diese Beobachtungen bestätigen, dass der erhöhte Infraschall direkt auf den Betrieb der Windkraftanlagen zurückzuführen ist.

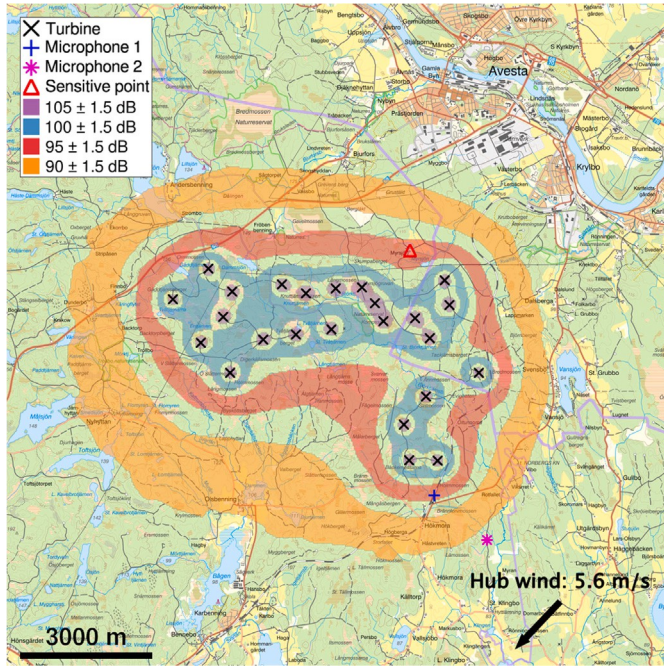


Abb. 12. Infraschall-Simulation (1 Hz) am Målarberget am 26.10.2023 (13:00 Uhr MESZ), basierend auf zwei Messungen (Mikrofon 1 (96,3 dB) und Mikrofon 2 (85,6 dB)). Hier sind die simulierten dB-Pegel dargestellt. Der empfindliche Punkt steht für ein nahegelegenes Wohnhaus (94,7 dB). Karte von Lantmåteriet [59]. Die Wetterdaten sind in Abb. 9 dargestellt.

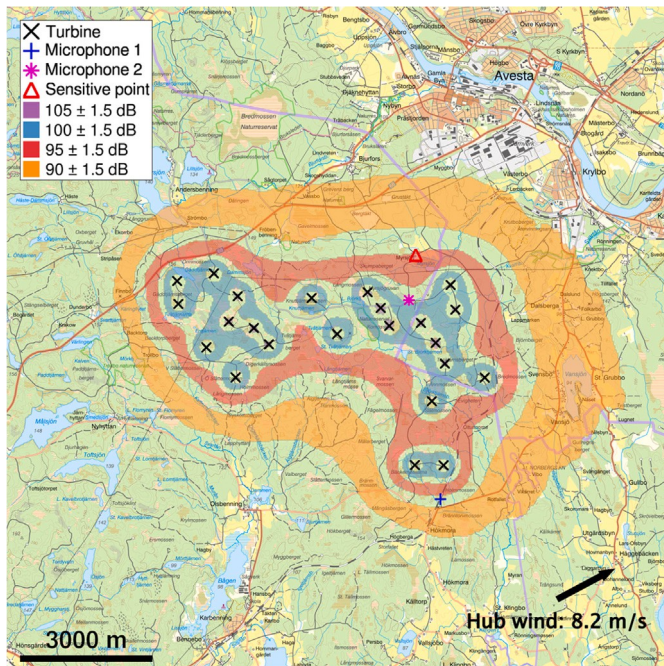


Abb. 13. Infraschallsimulation (1 Hz) in Målårlberget am 23.10.2024 (11:00 Uhr MESZ), basierend auf zwei Messungen (Mikrofon 1 (91,6 dB) und Mikrofon 2 (99,3 dB)). Hier sind die simulierten dB-Pegel dargestellt. Der empfindliche Punkt steht für ein nahegelegenes Wohnhaus (93,8). Karte von Lantmåteriet [59]. Die Wetterdaten sind in Abb. 10 dargestellt.

7. Simulation von Infraschall

Der erste Schwerpunkt der vorliegenden Studie liegt auf der Validierung des Simulationswerkzeugs anhand genauer Infraschallmessungen. Der zweite Schwerpunkt besteht darin, die Schalleistungspegel im Infraschallbereich für einige moderne Windkraftanlagentypen zu erfassen und den Einfluss der Atmosphäre zu untersuchen. In der vorliegenden Studie betrachten wir ausschließlich den 1-Hz-Infraschall.

Um die Schalleistungspegel der Windkraftanlagen zum Zeitpunkt einer bestimmten Messung zu berechnen, gehen wir wie folgt vor:

1. Laden der Topografie- und Bodentypdaten für das Untersuchungsgebiet.
2. Laden der atmosphärischen Daten für den spezifischen Zeitpunkt der Messung.
3. Laden der aktiven Windkraftanlagen zum Zeitpunkt der Messungen (häufig sind einige Anlagen wegen Wartungsarbeiten abgeschaltet).
4. Lösen des Optimierungsproblems

$$\min_{\Lambda} \sum_r (L_{\text{meas},r} - L_{\text{tot},\Lambda}(x_r))^2, \tag{30}$$

wobei N_r die Anzahl der Empfangspunkte ist, $L_{\text{meas},r}$ der gemessene Schalldruckpegel am Empfangspunkt x_r ist und $L_{\text{tot},\Lambda}(x_r)$ der gesamte simulierte Schalldruckpegel (definiert durch (10)) am Empfangspunkt x_r mit der Amplitude Λ ist.

Der Schalleistungspegel in Dezibel wird dann aus Λ unter Verwendung der Standarddefinition für das Freifeld berechnet. Da wir annehmen, dass alle Quellen gleich sind, ist die Lösung von (30) unkompliziert. Durch Erhöhung der Schalleistungspegel der

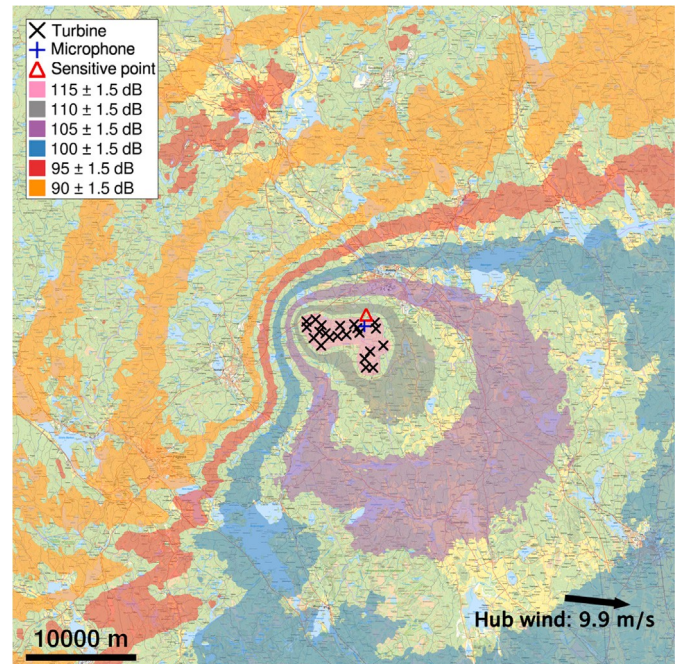


Abb. 14. Simulation des Infraschalls (1 Hz) von „“ am Målårlberget am 16.12.2024 (12:00 Uhr MESZ), basierend auf Messungen (115,0 dB). Hier sind die dB-Pegel dargestellt. Der empfindliche Punkt steht für ein nahegelegenes Wohnhaus (112,1 dB). Karte von Lantmåteriet [59]. Die Wetterdaten sind in Abb. 11 dargestellt.

Tabelle 3

Die berechneten Schalleistungspegel und der simulierte Schalldruckpegel im 1-Hz-Drittoktavband im Windpark Målårlberget.

| Messung | Schalleistungspegel | Mikrofon 1 | Mikrofon 2 | Messpunkt |
|-----------------------------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 26.10.2023 (13:00 Uhr MESZ) | 155,0 dB | 94,2 dB | 87,6 dB | 94,7 dB |
| 23.10.2024 (11:00 MESZ) | 153,7 dB | 92,8 dB | 98,1 dB | 93,8 dB |
| 16.12.2024 (12:00 Uhr) | 172,6 dB | 115,5 dB | - | 112,1 dB |

Die Quellen führen lediglich zu einer Erhöhung von $L_{tot,r}$ (A) um denselben Betrag, sodass für jede Messung nur eine Simulation mit jeder Quelle erforderlich ist.

das Optimierungsproblem (30) für die Schalleistungspegel wie in Abschnitt 7 beschrieben und berechnen (simulieren) Lärmkarten für die gesamte Region.

Ein Ausschnitt der von uns verwendeten Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Mälärberget zum Zeitpunkt der Messungen ist in den Abb. 9–11 dargestellt.

7.1. Simulation von Infraschall im Windpark Mälärberget

Der gemessene 1-Hz-Schalldruckpegel an den Empfangspunkten für die drei separaten Messungen ist in Tabelle 2 dargestellt. Auf der Grundlage der Messungen

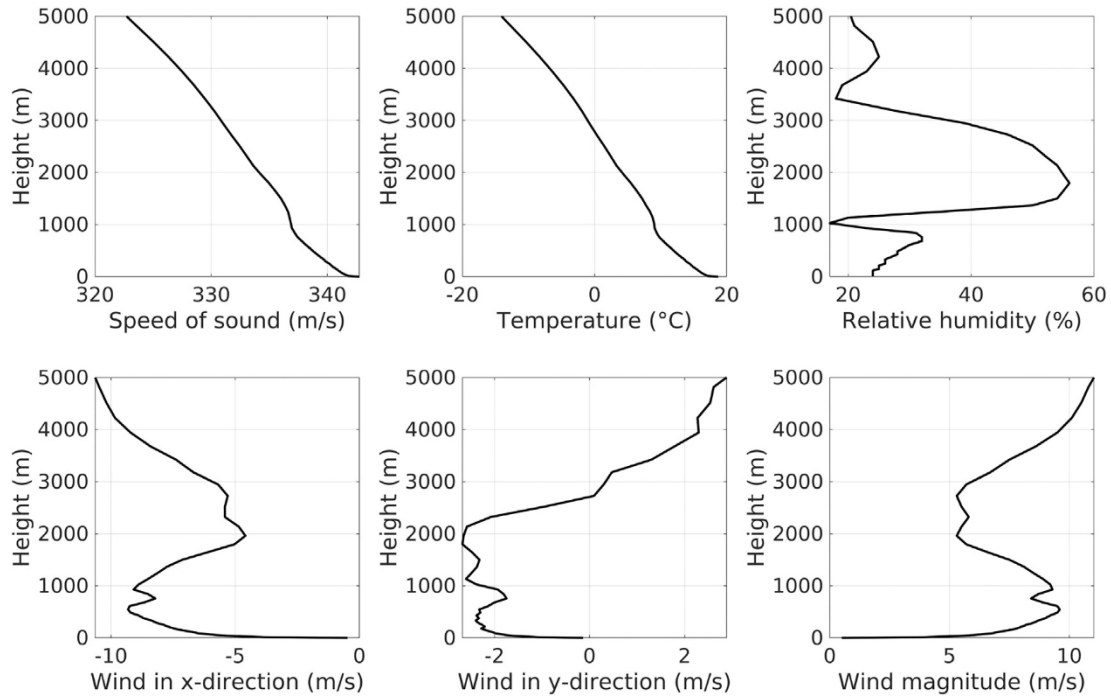


Abb. 15. Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Lervik am 21.05.2024 (15:00 Uhr MESZ).

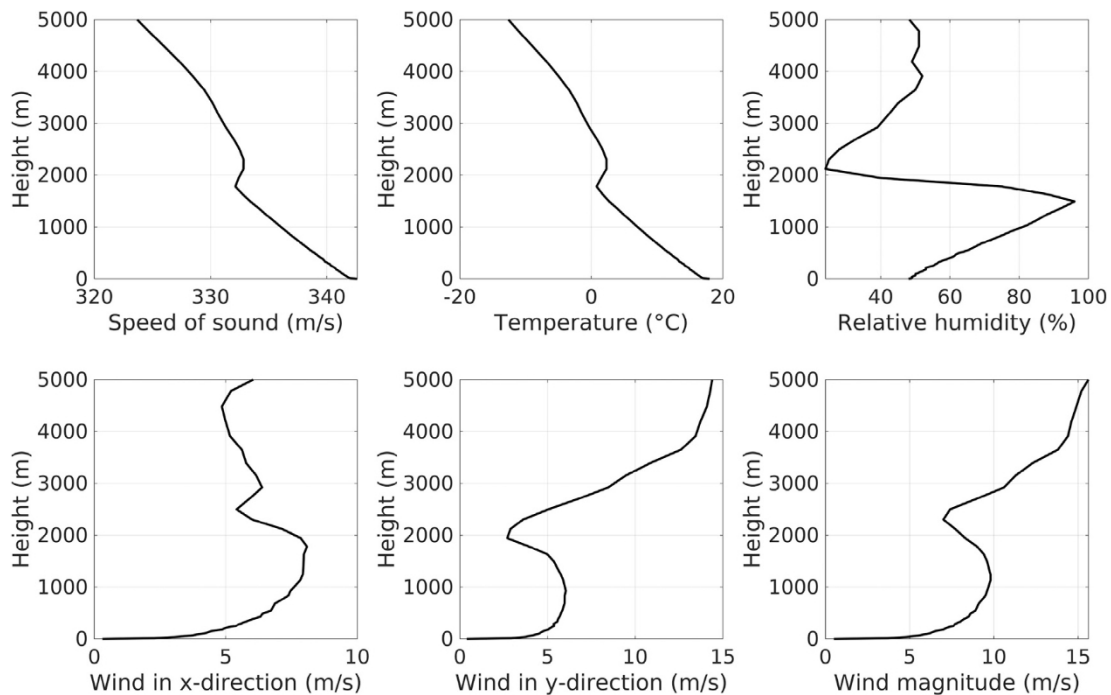


Abb. 16. Wetterdaten (Schallgeschwindigkeit, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wind in x- und y-Richtung) im Zentrum des Windparks Lervik am 10.09.2024

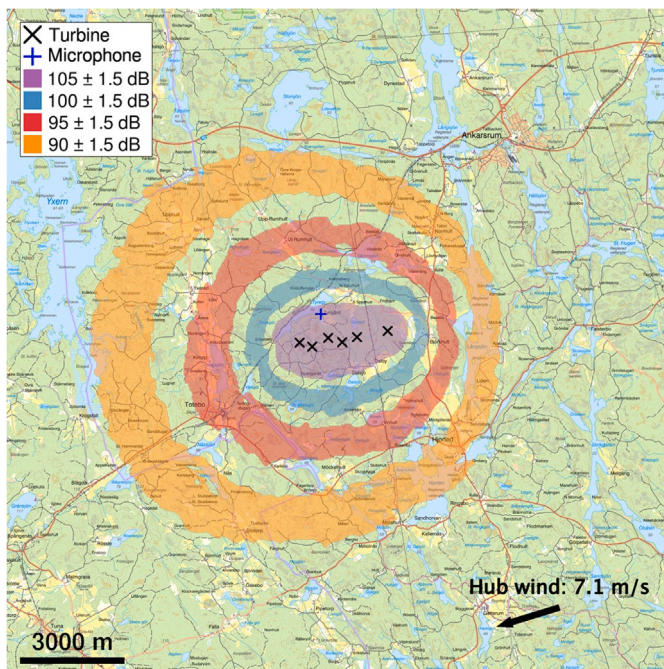


Abb. 17. Infraschall-Simulation (1 Hz) in Lervik am 21.05.2024 (15:00 Uhr MESZ), basierend auf einer Messung (105,6 dB). Messort an einem nahegelegenen Wohnhaus. Hier sind die dB-Pegel dargestellt. Karte von Lantmäteriet [59]. Die Wetterdaten sind in Abb. 15 dargestellt.

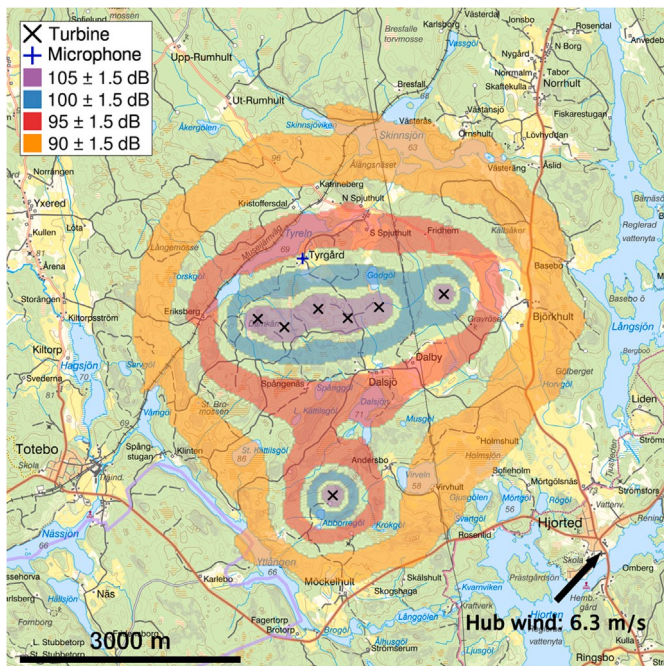


Abb. 18. Infraschallsimulation (1 Hz) in Lervik am 10.09.2024 (15:00 Uhr MESZ), basierend auf einer Messung (97,1 dB). Messort: ein nahegelegenes Wohnhaus. Hier werden die dB-Pegel dargestellt. Karte von Lantmäteriet [59]. Die Wetterdaten sind in Abb. 16 dargestellt.

Die Lärmkarten, die auf den abgeleiteten Schalleistungspegeln der Quellen basieren, sind in den Abbildungen 12, 13 und 14 dargestellt, jeweils eine pro Messung. Beachten Sie die unterschiedlichen räumlichen Maßstäbe in den Abbildungen. In die Lärmkarten haben wir die Windrichtung und -stärke an der Nabe sowie die Standorte der Messpunkte und eines empfindlichen Punktes (der

Tabelle 4

Der gemessene Schalldruckpegel im 1-Hz-Drittoktavband im Windpark Lervik sowie die ermittelten Schalleistungspegel der Windkraftanlagen.

| Messung | Mikrofon | Schalleistungspegel |
|-----------------------------|----------|---------------------|
| 21.05.2024 (15:00 Uhr MESZ) | 105,6 dB | 164,5 dB |
| 10.09.2024 (15:00 Uhr MESZ) | 97,1 dB | 156,2 dB |

die Position eines nahegelegenen Wohnhauses). Die berechneten Schalleistungspegel und simulierten Schalldruckpegel (an den interessierenden Punkten) sind in Tabelle 3 dargestellt.

7.2. Simulation des Infraschalls im Windpark Lervik

Für die Messdaten aus Lervik führen wir das gleiche Verfahren durch, wie in Abschnitt 7.1 beschrieben. Die Wetterdaten am Zentrum des Windparks Lervik für die beiden Messungen sind in den Abb. 15 und 16 dargestellt. Die auf den abgeleiteten Schalleistungspegeln basierenden Lärmkarten sind in den Abb. 17 und 18 dargestellt, einschließlich der Lage eines nahegelegenen Wohnhauses (dem Messpunkt). Der Schalldruckpegel (SPL) im 1-Hz-Drittoktavband am Empfangspunkt für jede Messung ist in Tabelle 4 zusammen mit den mit SoundSim360 ermittelten Schalleistungspegeln der Windkraftanlagen dargestellt. Beachten Sie, dass in den Fällen mit nur einem Empfangspunkt die Messungen und Simulationen exakt übereinstimmen.

7.3. Simulation des Infraschalls in den Windparks Tvinnesgheda und Karskröv

Bei Genehmigungsanträgen für Windparks ist es gängige Praxis, von einer vereinfachten Atmosphäre mit Rückenwindbedingungen in alle Richtungen auszugehen. In der Realität ist die Atmosphäre jedoch alles andere als konstant, und ihr starker Einfluss auf die Schallausbreitung (zumindest für hörbaren Schall) ist gut belegt. Um die Bedeutung der atmosphärischen Bedingungen für die Infraschallausbreitung zu veranschaulichen, berechnen wir mit SoundSim360 den Schalldruckpegel bei 1 Hz rund um die Windparks Tvinnesgheda und Karskröv (außerhalb der Stadt Åseda, Schweden) für vier verschiedene atmosphärische Profile. Die atmosphärischen Parameter, angegeben als Funktionen der Höhe, sind in Abb. 19 dargestellt. Die Wetterdaten wurden am 31.03.2023, kurz vor der Frühlings-Tagundnachtgleiche, vom Zentrum des Windparks Målarberget erfasst: Das Tagesprofil entspricht 16:00 Uhr und das Nachtprofil 04:00 Uhr. Sowohl für die Tages- als auch für die Nachtatmosphäre wurden die Windgeschwindigkeiten auf 8 m/s bzw. 1 m/s in 10 m Höhe skaliert, was vier unterschiedliche atmosphärische Profile ergab.

Der Windpark Tvinnesgheda besteht aus 47 Vestas V150-4,3-MW-Windkraftanlagen, und der Windpark Karskröv besteht aus 20 Vestas V150-4,5-MW-Windkraftanlagen. Beide Anlagentypen haben eine Nabhöhe von 116 m und eine Gesamthöhe von $116 + 75 = 191$ m. Tvinnesgheda und Karskröv nahmen ihren Betrieb im Jahr 2022 bzw. 2023 auf. Abb. 20 zeigt den simulierten Schalleistungspegel für atmosphärische Profile bei Tag und Nacht, wobei der Wind in 10 m Höhe auf 1 m/s bzw. 8 m/s skaliert ist. Der Schalleistungspegel (bei 1 Hz) ist festgelegt auf 153,7 dB, ermittelt anhand von Messungen, die am 23.10.2024 im Windpark Målarberget durchgeführt wurden. Es wurden fünf Messpunkte (A–E) berücksichtigt, die nahegelegenen Wohnhäusern und Ortschaften in unterschiedlicher Entfernung zu den Windparks entsprechen. Die Schalldruckpegel (1 Hz) an diesen Punkten sind in Tabelle 5 für die vier verschiedenen atmosphärischen Profile zusammen mit der Entfernung zur nächsten Windkraftanlage aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass atmosphärische Bedingungen den SPL (bei 1 Hz) im Fernfeld erheblich beeinflussen können. Die größten Schwankungen treten zwischen der Tagesatmosphäre mit 1 m/s Rückenwind (in 10 m Höhe) und der Nachtatmosphäre mit 8 m/s Rückenwind auf: Am Messpunkt A beträgt der Unterschied 3,8 dB, während er am Punkt E 14,5 dB erreicht.

Anmerkung 7. Es ist zu beachten, dass die gemessenen Schalleistungspegel im Windpark Målarberget im Bereich von 153,7–172,1 dB liegen (siehe Tabelle 3). Die Verwendung eines Schalleistungspegels von 172,1 dB anstelle von 153,7 dB erhöht den SPL an den empfindlichen Punkten um 18,4 dB im Vergleich zu den in Tabelle 5 aufgeführten Werten. Das nächtliche Atmosphärenprofil mit einem Rückenwind von 8 m/s in 10 m Höhe entspricht einer stark refraktiven Atmosphäre (siehe Abb. 20), die ein Wellenleiterverhalten hervorruft, im krassen Gegensatz zum Tagesprofil

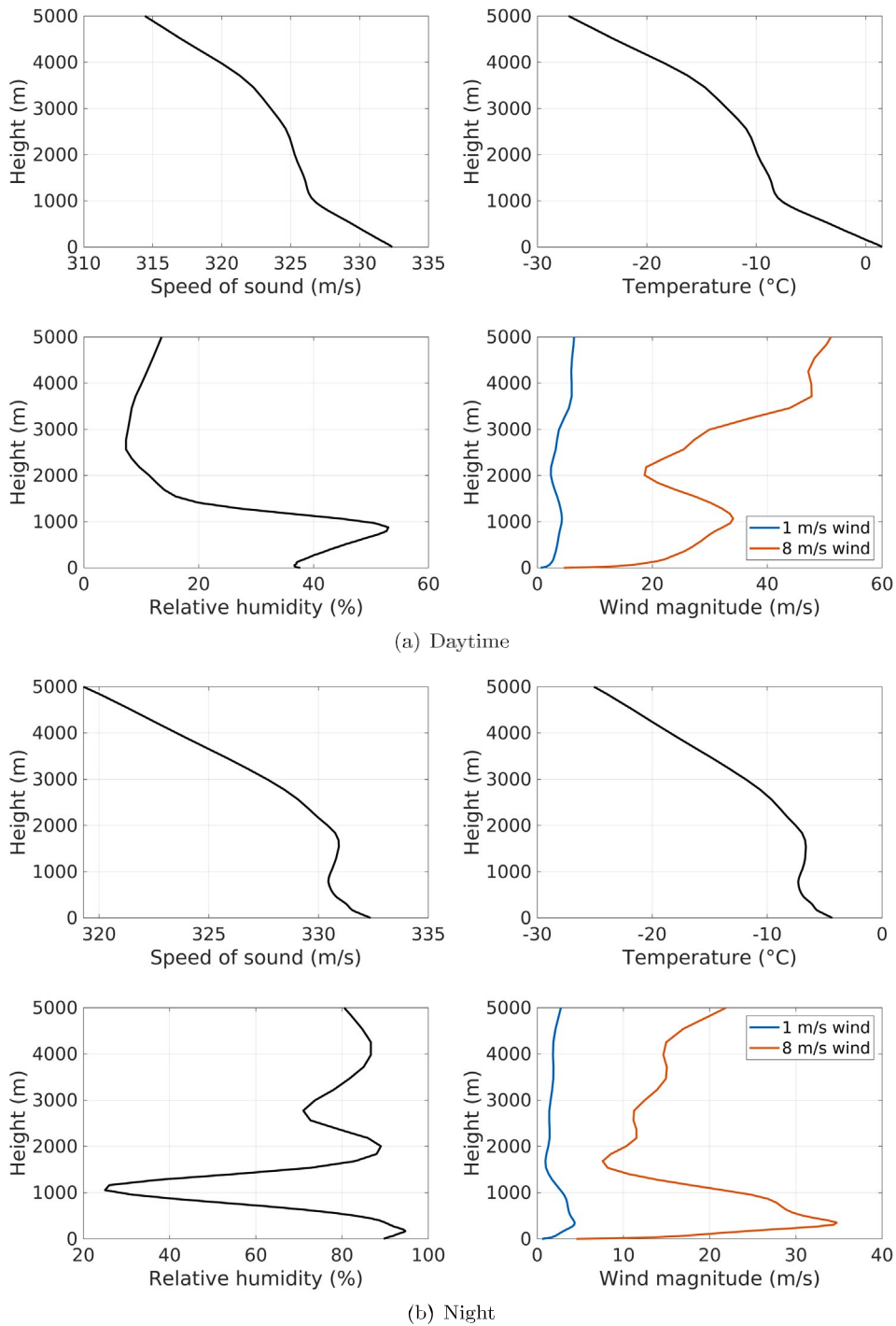


Abb. 19. Wetterdaten, die den Unterschied zwischen (a) tagsüber (16.00 Uhr) und (b) nachts (04.00 Uhr) am 31. März 2023 am Standort des Windparks Mälärberget zeigen. Die Windgeschwindigkeiten wurden auf 8 m/s bzw. 1 m/s in 10 m Höhe skaliert.

mit einem Rückenwind von 1 m/s in 10 m Höhe, der deutlich schwächere Refraktionseffekte aufweist. Das Tagesprofil mit einem Rückenwind von 8 m/s in 10 m Höhe führt zudem zu einem Wellenleiterverhalten, was den langsamen Abfall des Schalldruckpegels erklärt.

8. Schlussfolgerungen

Wir haben ein hochpräzises Simulationswerkzeug für die Ausbreitung von Niederfrequenzschall in großen und komplexen dreidimensionalen Bereichen vorgestellt. Die Methode wurde anhand von Benchmarks überprüft und mit

Infraschallmessungen aus mehreren modernen Windparks validiert, was sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Genauigkeit belegt. Die Ergebnisse unterstreichen die entscheidende Rolle realistischer atmosphärischer Daten, die einbezogen werden müssen, um vertrauenswürdige Vorhersagen zur Schallausbreitung über große Entfernungen zu erhalten.

Diese Studie zeigt zudem, dass moderne, groß dimensionierte Windkraftanlagen Infraschallpegel erzeugen, die deutlich höher sind als die für ältere, kleinere Anlagen gemeldeten Werte. Diese Erkenntnisse verbessern das Verständnis der akustischen Eigenschaften zeitgenössischer Windkraftanlagen und liefern wertvolle Anhaltspunkte für Umweltverträglichkeitsprüfungen und politische Entscheidungen.

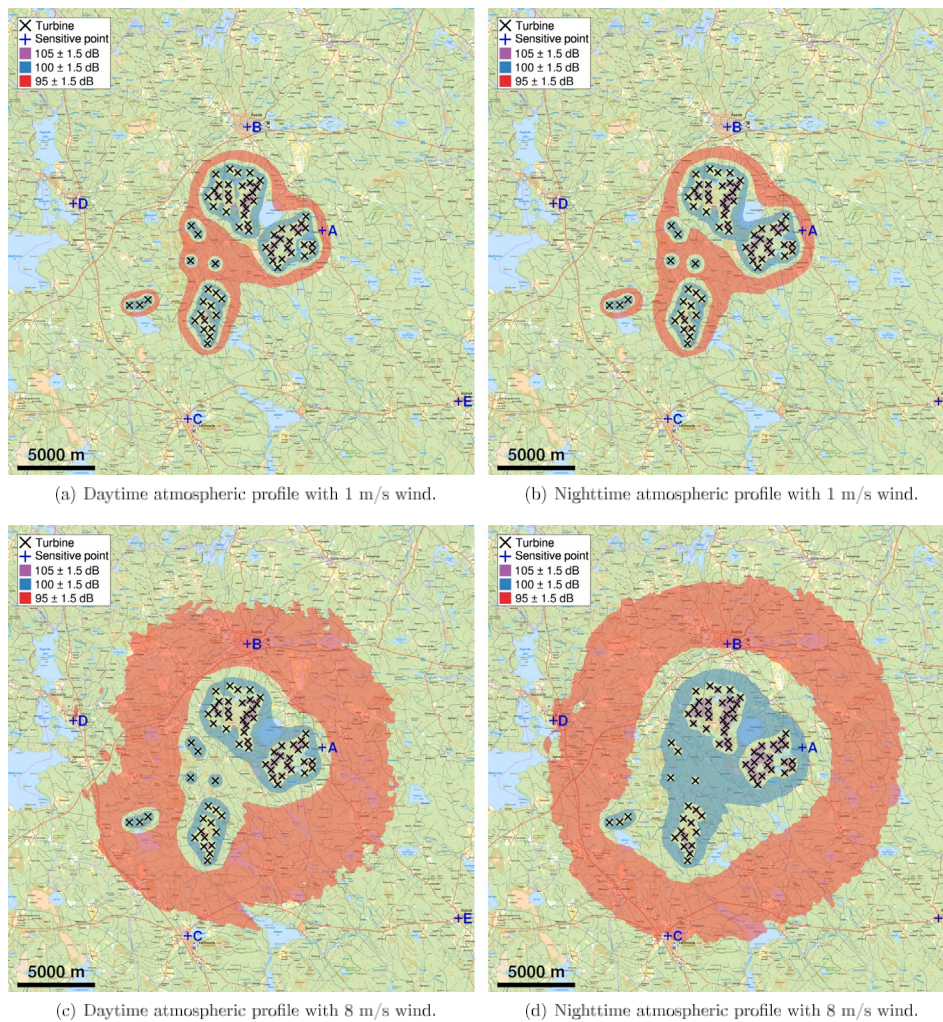


Abb. 20. SPL bei 1 Hz rund um die Windparks Tvinnesgheda und Karskröv unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen (a)–(d). Es werden Tages- und Nachtprofile betrachtet, wobei der Wind in 10 m Höhe auf 8 m/s bzw. 1 m/s skaliert ist. Die SPL-Werte an fünf sensiblen Punkten (A–E) in der Nähe von Wohngebieten und Ortschaften sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Karten stammen von Lantmäteriet [59].

Tabelle 5

Simulierte SPL an fünf empfindlichen Punkten (A–E) in der Umgebung der Windparks Tvinnesgheda und Karskröv für atmosphärische Profile bei Tag und Nacht mit Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und 8 m/s in 10 m Höhe. Die entsprechenden Wetterdaten sind in Abb. 19 dargestellt. Die Entfernungen von jedem Punkt zur nächsten Windkraftanlage sind angegeben.

| Atmosphäre | Punkt A | Punkt B | Punkt C | Punkt D | Punkt E |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Tagesprofil 1 m/s | 95,2 dB | 88,7 dB | 82,6 dB | 81,2 dB | 76,7 dB |
| Tagesprofil 8 m/s | 97,5 dB | 94,6 dB | 92,9 dB | 93,3 dB | 91,1 dB |
| Nachtprofil 1 m/s | 95,8 dB | 90,2 dB | 85,1 dB | 84,1 dB | 80,1 dB |
| Nachtprofil 8 m/s | 99,0 dB | 96,3 dB | 93,5 dB | 93,6 dB | 91,2 dB |
| Die nächstgelegene Turbine | 1085 m | 2924 m | 5005 m | 7478 m | 13.460 m |

Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Erweiterung der Messmöglichkeiten unter Verwendung hochempfindlicher Infrachallmikrofone wie Hyperion konzentrieren, um Frequenzen bis hinunter zu 0,1 Hz zu erfassen, sowie auf die Untersuchung der Richtwirkung von Windkraftanlagenlärm im Niederfrequenzbereich.

Schließlich wird die Ausbreitung von Niederfrequenzschall in städtischen Umgebungen untersucht, insbesondere im Hinblick auf die Übertragung durch Gebäudefassaden bei hohen Außenlärmpegeln, was ein potenzielles Risiko für die Umweltgesundheit darstellen kann. Diese Entwicklungen werden

die Anwendbarkeit von SoundSim360 in der Umweltakustik und seine Relevanz für die Bewertung potenzieller gesundheitlicher Auswirkungen stärken.

CRedit-Erklärung zum Autorenbeitrag

Ken Mattsson: Verfassen – Überprüfung & Bearbeitung, Verfassen – Originalentwurf, Validierung, Betreuung, Ressourcen, Projektverwaltung, Methodik, Untersuchung, Einwerbung von Fördermitteln, Formale Analyse, Konzeption. **Gustav Eriksson:** Verfassen – Überprüfung & Bearbeitung, Verfassen – Originalentwurf, Visualisierung, Validierung, Software, Methodik, Untersuchung, Formale Analyse, Konzeption. **Leif Persson:** Verfassen – Überprüfung und Bearbeitung, Untersuchung, Datenkuratierung. **José Chilo:** Verfassen – Überprüfung und Bearbeitung, Ressourcen, Untersuchung, Datenkuratierung. **Kourosh Tatar:** Verfassen – Überprüfung und Bearbeitung, Ressourcen, Untersuchung, Datenkuratierung.

Erklärung zu Interessenkonflikten

Die Autoren geben folgende finanzielle Interessen/persönliche Beziehungen an, die als potenzielle Interessenkonflikte angesehen werden könnten:

Ken Mattsson gibt an, dass finanzielle Unterstützung vom schwedischen Forschungsrat gewährt wurde. Ken Mattsson gibt außerdem an, dass finanzielle Unterstützung

vom schwedischen Forschungsrat Formas bereitgestellt wurde. Gustav Eriksson berichtet, dass finanzielle Unterstützung vom schwedischen Forschungsrat Formas bereitgestellt wurde. Gustav Eriksson berichtet zudem, dass finanzielle Unterstützung vom schwedischen Forschungsrat bereitgestellt wurde. Falls weitere Autoren vorhanden sind, erklären diese, dass ihnen keine konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönlichen Beziehungen bekannt sind, die den Anschein erwecken könnten, die in diesem Artikel beschriebene Arbeit beeinflusst zu haben.

Danksagungen

Gustav Eriksson wurde von , dem Schwedischen Forschungsrat (Förderkennzeichen 2021-05830 VR) und FORMAS (Förderkennzeichen 2022-00843) unterstützt. Ken Mattsson wurde teilweise von , dem Schwedischen Forschungsrat (Förderkennzeichen 2021-05830 VR) und FORMAS (Förderkennzeichen 2022-00843) unterstützt.

Wir danken dem Team von NORSAR für die Möglichkeit, die Mikrofonkalibrierung durchzuführen, insbesondere Jon Magnus Christensen und Tormod Kvaerna.

Verfügbarkeit der Daten

Die Daten werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Referenzen

- [1] Recio A, Linares C, Banegas JR, Diaz J. Auswirkungen von Straßenverkehrslärm auf die kardiovaskuläre, respiratorische und metabolische Gesundheit: ein integratives Modell biologischer Mechanismen. *Environ Res* 2016;146:359–70.
- [2] Pirrera S, De Valck E, Cluydts R. Feldstudie zu den Auswirkungen von nächtlichem Straßenverkehrslärm auf den Schlaf: die Bedeutung der Lärmbeurteilung im Innen- und Außenbereich, der Lage der Schlafzimmer s und nächtlicher Lärmstörungen. *Sci Total Environ* 2014;500:84–90.
- [3] Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S. Akustische und nicht-akustische Auswirkungen von Lärm auf die Gesundheit. *The Lancet* 2014;383:1325–32.
- [4] Stansfeld S, Matheson M. Lärmbelastung: nicht-auditive Auswirkungen auf die Gesundheit. *Br Med Bull* 2003;68:243–57.
- [5] Kunchur MN. Das menschliche Hörsystem und Audio. *Appl Acoust* 2023;211:109507.
- [6] Almqvist M, Karasalo I, Mattsson K. Ausbreitung von Schall in der Atmosphäre über großräumigen unregelmäßigen Geländesituationen. *J Sci Comput* 2014;61:369–97.
- [7] Rydin Y, Mattsson K, Werpers J. Hochpräzise Schallausbreitung in einer variierenden 3D-Atmosphäre. *J Sci Comput* 2018;77:1278–302.
- [8] Larsson C. Atmosphärische Absorptionsbedingungen für die horizontale Schallausbreitung. *J Sci Comput Appl Acoust* 1997;50:231–45.
- [9] Öhlund O, Larsson C. Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung von Windkraftanlagen. *Appl Acoust* 2015;89:34–41.
- [10] Pierce AD. *Akustik: Eine Einführung in ihre physikalischen Grundlagen und Anwendungen*. Springer; 2019.
- [11] Mattsson K, Nordström J. Summation by parts operators für Finite-Differenzen-Näherungen von zweiten Ableitungen. *J Comput Phys* 2004;199:503–40.
- [12] Mattsson K, Nordström J. Finite-Differenzen-Verfahren höherer Ordnung für die Wellenausbreitung in diskontinuierlichen Medien. *J Comput Phys* 2006;220:249–69.
- [13] Mattsson K, Ham F, Iaccarino G. Stabile und genaue Wellenausbreitung in diskontinuierlichen Medien. *J Comput Phys* 2008;227:8753–67.
- [14] Mattsson K, Ham F, Iaccarino G. Stabile Randbedingungen für das Wellengleichungssystem in zweiter Ordnung. *J Sci Comput* 2009;41:366–83.
- [15] Mattsson K. Teilungssummierungsoperatoren für Finite-Differenzen-Näherungen von zweiten Ableitungen mit variablen Koeffizienten. *J Sci Comput* 2012;51:650–82.
- [16] Stiernström V, Almqvist M, Mattsson K. Randoptimierte Teilungssummierungsoperatoren für Finite-Differenzen-Näherungen von zweiten Ableitungen mit variablen Koeffizienten. *J Comput Phys* 2023;491:112376.
- [17] Lantmateriet. *Terrain Model Download*, Gitter 1+; 2021. <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/geodataprodukter/produktlista/markhoyjmodell-nedladdning-grid-1/>.
- [18] Pichon AL, Ceranna L, Vergoz J. Einbeziehung numerischer Modellierung in Schätzungen der Erkennungsfähigkeit des IMS-Infraschallnetzes. *J Geophys Res Atmos* 2012;117.
- [19] Tope LJ, Kim JW, Spence P. Direkte numerische Simulationen der Ausbreitung von Infraschall über große Entfernungen: Implikationen für die Schätzung von Quellspektren. *J Acoust Soc Am* 2024;155:465–78.
- [20] Pilger C, Gaebler P, Ceranna L, Pichon AL, Vergoz J, Perttu A, Tailpied D, Taisne B. Infraschall- und seismoakustische Signaturen des Super-Shear-Erdbebens von Sulawesi. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2019;19:2811–25. 28. September 2018.
- [21] Turquet A, Brissaud Q, Alvizuri C, Näsholm SP, Pichon AL, Kero J. Ermittlung seismischer Quelleneigenschaften anhand von seismischen und Infraschalldaten: das Minenbeben von 2020 in Kiruna (), Schweden, mit einer Magnitude von 4,1. *Geophys Res Lett* 2024;51.
- [22] Toney L, Fee D, Schmandt B, Bishop JW. Untersuchung der Infraschallausbreitung bei hoher r und räumlicher Auflösung unter Verwendung eines nodalen seismischen Arrays. *J Geophys Res Solid Earth* 2023;128.
- [23] Blixt EM, Näsholm SP, Gibbons SJ, Evers LG, Charlton-Perez AJ, Orsolini YJ, Kvaerna T. Schätzung troposphärischer und stratosphärischer Winde anhand von Infraschall aus Explosionen. *J Acoust Soc Am* 2019;146:973–82.
- [24] Wilson DK, Shaw MJ, Ostashev VE, Muhlestein MB, Alter RE, Swearingen ME, McComas SL. Numerische Modellierung der Ausbreitung von mesoskaligem Infraschall in der Arktis. *J Acoust Soc Am* 2022;151:138–57.
- [25] Hupe P, Pilger C, Pichon AL, Ceranna L. Untersuchung atmosphärischer Wellen und der Dynamik der mittleren Atmosphäre mithilfe von Infraschall. *J Acoust Soc Am* 2024;155:A201.
- [26] Ambrose SE, Rand RW, Krogh CME. Akustische Untersuchung von Windkraftanlagen: Infraschall und tieffrequente Geräusche – eine Fallstudie. *Bull Sci Technol Soc* 2012;32:128–41.
- [27] Salt AN, Hullar TE. Reaktionen des Ohrs auf niederfrequente Geräusche, Infraschall und Windkraftanlagen. *Hear Res* 2010;268:12–21.
- [28] Salt AN, Kaltenbach JA. Infraschall von Windkraftanlagen könnte Menschen beeinträchtigen. *Bull Sci Technol Soc* 2011;31:296–302.
- [29] Salt AN, Lichtenhan JT. Wie wirkt sich Windkraftanlagenlärm auf Menschen aus? *Acoust. Today* 2014;10:20–8.
- [30] Pluess M, Assary E, Lionetti F, Lester KJ, Krapohl E, Aron EN, Aron A. Umweltsensibilität bei Kindern: Entwicklung der Skala für hochsensible Kinder und Identifizierung von Sensibilitätsgruppen. *Translational Psychiatry* 2018;54:51–70.
- [31] Lionetti F, Aron A, Aron EN, Burns GL, Jagiellowicz J, Pluess M. Löwenzahn, Hulsen und Orchideen: Belege für die Existenz von wenig sensiblen, mittel-sensiblen und hochsensiblen Personen. *Transl Psychiatry* 2018;8:24.
- [32] Weichenberger M, Bauer M, Kühler R, Hensel J, Forlim CG, Ihlenfeld A, Itermann B, Gallinat J, Koch C, Kühn S. Veränderte kortikale und subkortikale Konnektivität durch Infraschall nahe der Hörschwelle – Erkenntnisse aus der fMRT. *PLoS One* 2017;12:1–19.
- [33] Forlim CG, Ascone L, Koch C, Kühn S. Durch experimentelle Exposition gegenüber unhörbarem Infraschall induzierte Veränderungen des Ruhezustandsnetzwerks und Zusammenhänge mit selbstberichteter Lärmempfindlichkeit und Lärmbelastung. *Scientific Reports* 2024;14:24555.
- [34] Danielsson AA, Landström U. Blutdruckveränderungen beim Menschen bei Exposition gegenüber Infraschall. *Acta Med Scand* 1985;217:531–5.
- [35] Tolvanen A, Routavaara H, Jokikokko M, Rana P. Wie weit werden Vögel, Fledermäuse und Landwirbeltiere durch den Ausbau der Onshore-Windenergie verdrängt? – eine systematische und metaanalytische Übersicht. *Biol Conserv* 2023;288:110382.
- [36] Marshall NS, Cho G, Toelle BG, Tonin R, Bartlett DJ, Rozario ALD, Evans CA, Cowie CT, Janev O, Whitfield CR, Glozier N, Walker BE, Killeck R, Welgampola MS, Phillips CL, Marks GB, Grunstein RR. Die gesundheitlichen Auswirkungen von 72 Stunden simuliertem Infraschall von Windkraftanlagen: eine doppelblinde, randomisierte Crossover-Studie an geräuschempfindlichen, gesunden Erwachsenen aus der „ . *Environ Health Perspect* 2023;131:037012.
- [37] Majjala PP, Kurki I, Vainio L, Pakarinen S, Kuuramo C, Lukander K, Virkkala J, Tiippana K, Stiecker EA, Sainio M. Belastung, Wahrnehmung und physiologische Auswirkungen von Infraschall durch Windkraftanlagen auf die Gesundheit. *J Acoust Soc Am* 2021;149:2238–48.
- [38] Schäffer B, Pieren R, Schlittmeier SJ, Brink M. Auswirkungen verschiedener Spektralverläufe und Amplitudenmodulationen von Breitbandrauschen auf Belastungsreaktionen in einem kontrollierten Hörtest. *Int J Environ Res Public Health* 2018;15.
- [39] Virjonen P, Hongisto V, Radun J. Belastungsbewertung von periodisch amplitudenmoduliertem Breitbandgeräusch. *J Acoust Soc Am* 2019;146:4159–70.
- [40] Kelley ND, McKenna HE, Hemphill RR, Etter CL, Garrett RL, Linn NC. Akustischer Lärm im Zusammenhang mit der MOD-1-Windkraftanlage: seine Quelle, Auswirkungen und Kontrolle, *Technischer Bericht* „ , Solar Energy Research Institute (SERI) 1985, Golden, CO (Vereinigte Staaten).
- [41] Parakkal S, Gilbert KE, Di X, Bass HE. Eine verallgemeinerte Polarkoordinatenmethode für die Schallausbreitung über großflächiges unregelmäßiges Gelände. *J Acoust Soc Am* 2010;128:2573–80.
- [42] Attenborough K. Akustische Impedanzmodelle für Bodenoberflächen im Freien. *J Sound Vib* 1985;99:521–44.
- [43] Ostashev V, Wilson D. *Akustik in sich bewegenden inhomogenen Medien*. CRC Press; 2015.
- [44] Salomons E. *Computational Atmospheric Acoustics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2001.
- [45] Hornikx M, Dohmen M, Conen K, van Hooff T, Blocken B. Der Einfluss des Windes auf die Schallausbreitung in städtischen Gebieten: Vorhersagen für typische Stadtabschnitte. *Build Environ* 2018;144:519–31.
- [46] I.O. für Normung, Akustik: Schalldämpfung bei der Schallausbreitung im Freien 1993, Internationale Organisation für Normung.
- [47] Ostashev VE, Wilson DK. Akustik in sich bewegenden inhomogenen Medien. *J Acoust Soc Am* 1999;105:2067.
- [48] Naturvårdsverket. *Nationella marktäckedata (NMD) 2023/2018 – Produktbeschreibung, Ausgabe 1.1*; 2025. <https://www.naturvardsverket.se/verktyg-och-tjanster/kartor-och-kartjanster/nationella-marktackedata/>.
- [49] Gustafsson B, Kreiss H-O, Oliger J. *Zeitabhängige Probleme und Differenzverfahren*. 2013, 2.
- [50] Virta K, Mattsson K. Ausbreitung akustischer Wellen in komplizierten Geometrien und heterogenen Medien. *J Sci Comput* 2014;61:90–118.
- [51] Petersson NA, O'Reilly O, Sjögreen B, Bydlon S. Diskretisierung singularer Punktquellen bei hyperbolischen Wellenausbreitungsproblemen. *J Comput Phys* 2016;321:532–55.
- [52] Almqvist M, Dunham EM. Nicht-steife Rand- und Schnittstellenstrafen für Finite-Differenzen-Näherungen mit schmaler Schablone des Laplace-Operators auf gekrümmten Multiblock- -Gittern. *J Comput Phys* 2020;408:109294.
- [53] Svärd M, Nordström J. Über die Konvergenzraten von energiestabilen Finite-Differenzen- sverfahren. *J Comput Phys* 2019;397:108819.
- [54] Attenborough K, Taherzadeh S, Bass HE, Di X, Raspet R, Becker GR, Güdesen A, Chrestman A, Daigle GA, L'Espérance A, Gabillet Y, Gilbert KE, Li YL, White MJ, Naz P, Noble JM, van Hoof HAJM. Benchmark-Fälle für smodelle zur Schallausbreitung im Freien. *J Acoust Soc Am* 1995;97:173–91.
- [55] Lax P, Richtmyer R. Untersuchung der Stabilität linearer Finite-Differenzen-Gleichungen. *Commun Pure Appl Math* 1956;IX:267–93.

- [56] Arnqvist J, Olivares-Espinosa H, Carlén I. Für die Windenergie relevante Eigenschaften von Turbulenzen über borealen Wäldern, In: *Journal of Physics: Conference Series* 2767; (2024) 092096.
- [57] Hallgren C, Arnqvist J, Nilsson E, Ivanell S, Shapkalijevski M, Thomasson A, Pettersson H, Sahlée E. Klassifizierung und Eigenschaften nicht-idealisierter Küstenwindprofile – eine Beobachtungsstudie. *Wind Energy Sci* 2022;7:1183–207.
- [58] Liszka L. Infrschall: eine Zusammenfassung von 35 Jahren Infrschallforschung, wissenschaftlicher Bericht des IRF (). Schwedisches Institut für Weltraumphysik; 2008.
- [59] Lantmateriet, Karte 1:(50) 000, Raster, 2018, <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/karta-150-000-nedladdning-raster/>.