Simulation der Ausbreitung von Schallsignalen bewegter Quellen unter Berücksichtigung von Abstandsänderung, Doppler-Effekt und frequenzunabhängiger Bodenreflexion am Beispiel von Windkraftanlagen

André Jakob[1], Michael Radny[1], Rudi Volz[2]

[1] *Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13505 Berlin, E-Mail:andre.jakob@beuth-hochschule.de*
[2] *Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU), 14410 Potsdam, E-Mail: Rudi.Volz@LfU.Brandenburg.de*

Einleitung

Es wurde ein Verfahren entworfen, das es erlaubt, ein beliebiges zeit-diskretes Signal, das von einer sich auf einer beliebig vorgebbaren Raumkurve bewegenden Quelle abgestrahlt wird, am Ort eines feststehenden Empfängers zu simulieren. Dabei wird sowohl die entfernungsabhängige Pegelabnahme berücksichtigt als auch der Doppler-Effekt durch die sich relativ zum Empfänger bewegenden Quelle. Zusätzlich wurde die Bodenreflexion mit reell und über der Frequenz konstant vorgebbarem Reflexionsfaktor berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren mit einer Modifikation und mit Einschränkungen auch für sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegende Quellen verwendet werden kann. Hier wird anhand des Verfahrens erläutert, wie sich die drei Phänomene Abstandsänderung, Doppler-Effekt und Bodenreflexion auf die empfangenen Geräusche auswirken. Als Beispiel wurden u. a. drei um ein gemeinsames Zentrum kreisende Monopolquellen im Maßstab einer Windkraftanlage simuliert, um die Auswirkungen der Quellenbewegung und der Bodenreflexion im Hinblick auf Amplituden- und Frequenzmodulation sowie Klangfärbung am Empfängerort zu untersuchen. Weitere Einflüsse durch Windprofile und Temperaturschichtungen auf dem Ausbreitungsweg und Richtcharakteristiken der Quellen wurden zunächst nicht berücksichtigt.

Motivation für diese Arbeit waren Fragen wie: Was ist deutlicher hörbar: Amplitudenmodulation (AM) aufgrund der abstandsabhängigen Pegelabnahme zum Beobachter oder Frequenzmodulation (FM) aufgrund der unterschiedlichen Relativgeschwindigkeiten zum Beobachter? Wie „spielen" beide Effekte zusammen? Wie klingt der Einfluss der Bodenreflexion?

Modellannahmen

Die derzeitigen Annahmen für das noch relativ einfache Modell lauten:

1) homogenes nicht-dispersives Medium, d. h. Wellengeschwindigkeit orts- und frequenz**un**abhängig, kein Wind, keine Temperaturschichtungen, etc.,
2) keine frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung,
3) Abstrahlung aller Quellen kugelförmig,
4) Empfänger ortsfest mit Kugelcharakteristik (mono, keine HRTF),
5) Bodenreflexion reell und frequenz**un**abhängig.

Berechnungsmethode

Die Berechnung des Signals am Empfänger beinhaltet folgende Schritte (vgl. auch Kap. 12.4 in [1]):

1) Vorgabe I: beliebiges zeit-diskretes („digitales") Signal $sig_{src}(n)$ mit Abtastrate f_s,
2) Vorgabe II: Koordinaten beliebiger Bahnkurve, „ein Ort für jedes Sample": $x_{src}(n)$, $y_{src}(n)$, $z_{src}(n)$,
3) Vorgabe III: Koordinaten des ortsfesten Empfängers: $x_{rec}(n)$=konst , $y_{rec}(n)$=konst , $z_{rec}(n)$=konst,
4) Abstand Quelle-Empfänger in jedem Zeitschritt wird ermittelt: $dist(n)$,
5) Ankunftszeit jedes „Samples" beim Empfänger wird ermittelt: $t_{rec}(n)$. Empfängersignal liegt nicht-äquidistant vor: $sig_{rec}(t_{rec}(n))$,
6) Gewichtung der Empfangssamples entsprechend Abstand: $sig_{rec}(t_{rec}(n))/dist(n)$,
7) Gewichtung der Empfangssamples entsprechend Dopplerverstärkung: $sig_{rec}(t_{rec}(n))\cdot 1/(1\text{-}v(n)/c)^2$,
8) Spline-Interpolation auf äquidistante Zeitschritte, Nullen am Anfang voranstellen: $sig_{rec}(n)$,
9) Umweg durch Bodenreflexion bestimmen, weiter wie 5) bis 8), Gewichtung mit Reflexionsfaktor R, Addition zum Direktschall.

Anmerkung zu 7): Hier wurde die Doppler-Verstärkung („konvektive Verstärkung") wie in [2] berücksichtigt, die in [3] als Approximation für geringe Quellengeschwindigkeiten der in [4] hergeleiteten Gleichungen angegeben wird. Die hier mit $v(n)$ bezeichnete Geschwindigkeit ist die momentane Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Empfänger. Mit der Machzahl M und dem Winkel $\theta(n)$ zwischen Quelle-Empfänger-Strecke und Quellen-Geschwindigkeitsvektor lässt sich der Doppler-Verstärkungsfaktor wie in [2,3,4] auch in der Form $1/(1\text{-}M\cdot\cos(\theta(n)))^2$ ausdrücken.

Abbildung 1 zeigt rechts oben eine Veranschaulichung des Verfahrens (blau: äquidistantes Quellsignal, rot: nicht-äquidistantes Empfängersignal, gelb: äquidistant interpoliertes Empfängersignal). Zusätzlich sind für den vorliegenden Überflug der Quelle Diagramme für den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum Empfänger sowie die Schallankunftszeit und die sich ergebende Frequenzverschiebung gezeigt.

Ergebnisse geradlinige gleichförmige Bewegung

Abbildung 2 zeigt ein Simulationsergebnis für einen Überflug mit einer bandbegrenzten Rauschschallquelle. In dieser Simulationen wurde nur die Pegelabnahme durch das Ab-

standsgesetz und die Frequenzverschiebung durch den Dopplereffekt berücksichtigt, nicht aber die Doppler-Verstärkung und die Bodenreflexion. Man erkennt im Spektrogramm des Empfängersignals die sich ergebende Frequenzveränderung bzw. das „Aufspreizen“ und „Zusammenstauchen“ der Frequenzen über der Zeit und den entfernungsabhängigen Amplitudenverlauf.

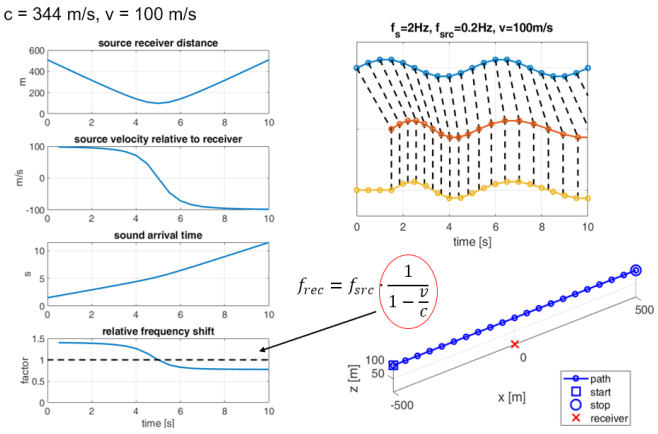

Abbildung 1: Veranschaulichung des Verfahrens

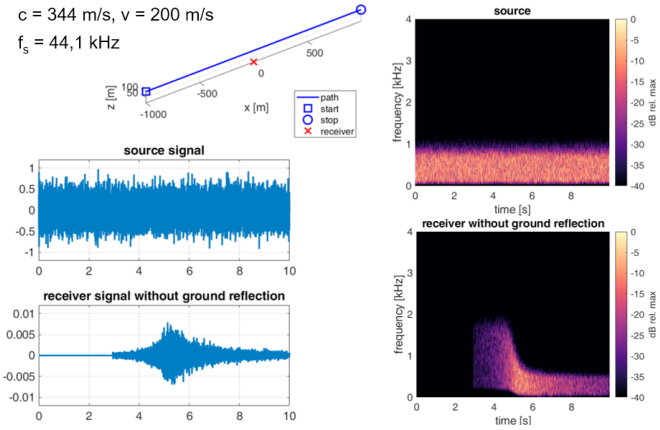

Abbildung 2: simulierter Überflug Rauschschallquelle ohne Doppler-Verstärkung und Bodenreflexion

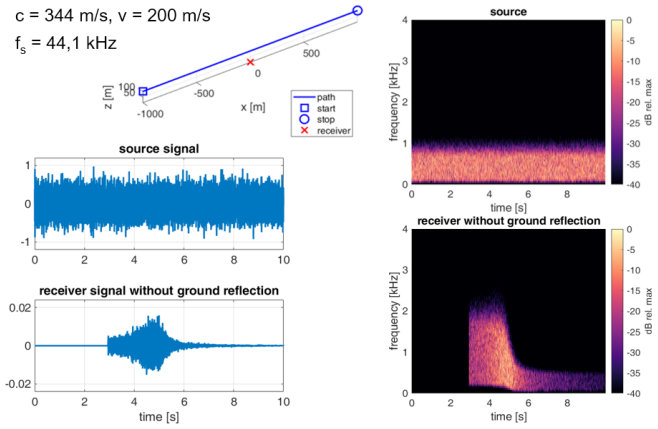

Abbildung 3: simulierter Überflug Rauschschallquelle mit Doppler-Verstärkung, ohne Bodenreflexion

In Abbildung 3 wurde zusätzlich die Doppler-Verstärkung berücksichtigt, die sowohl zu einer zeitlichen (Vor)-Verschiebung des Amplitudenmaximums als auch zu einem höherem Maximum führt und zu unterschiedlichen Amplituden der Signale der sich relativ zum Empfänger hin- und von ihm wegbewegenden Quelle. In Abbildung 4 schließlich wurde noch die Bodenreflexion mit R=1 und einer Empfängerhöhe von 1,7 m über Boden berücksichtigt. Es ergibt sich das übliche Interferenzmuster („Kammfilter-Effekt“), das auch subjektiv zu einer deutlichen Klangfärbung führt.

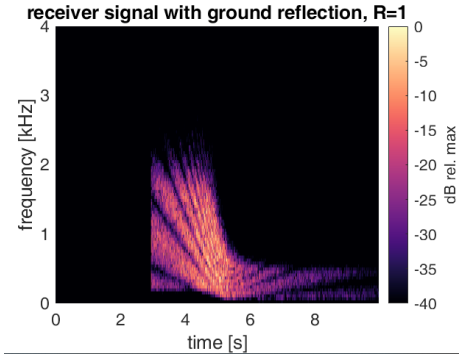

Abbildung 4: simulierter Überflug Rauschschallquelle mit Doppler-Verstärkung und Bodenreflexion

Grenzen des Verfahrens

Limitierender Faktor des Verfahrens ist vor allem die Abtastrate des Signals bzw. genauer die halbe Abtastrate. Abbildung 5 gibt die bekannte Formel für die Frequenzverschiebung durch den Doppler-Effekt grafisch wieder. Bei hier angenommener Abtastrate von 44,1 kHz könnte sich also z. B. eine Schallquelle, die eine Frequenz von 3 kHz aussendet, mit bis zu 297 m/s nähern, bevor das Abtasttheorem verletzt würde. Eine sich entfernende Quelle ist unkritisch, da die Empfängerfrequenzen mit steigender Quellengeschwindigkeit gegen Null streben. Mit dem Diagramm erklärt sich auch das zuvor erwähnte „Aufspreizen“ und „Zusammenstauchen“ der Frequenzen sehr einfach.

Oberhalb der Schallgeschwindigkeit liefert die Doppler-Formel negative Empfängerfrequenzen, die sich als Zeitinversion des Signals interpretieren lassen („$\sin(-\omega \cdot t) = \sin(-t \cdot \omega)$“). Das bedeutet im vorliegenden 3 kHz-Beispiel, dass das Abtasttheorem auch eingehalten wird, wenn sich die Quelle mit mehr als ca. 391 m/s nähert. Lediglich im bei jedem Überschallvorbeiflug auftretenden Übergangsbereich, dessen Breite stark von den auftretenden Frequenzen abhängt, wird das Abtasttheorem kurzzeitig verletzt.

Methode bei Überschall

Beim Überschallvorbeiflug kommen stets zwei Schallanteile gleichzeitig an: Die Signalanteile der sich entfernenden Quelle und die noch nacheilenden Signalanteile der sich mit Überschall eben „schneller als der Schall“ nähernden Quelle. Dadurch können nicht mehr einfach alle Signalwerte auf die Zielzeitachse interpoliert werden. Vielmehr müssen die beiden Anteile getrennt interpoliert und anschließend addiert werden. Ein einfache Methode dies zu lösen, ist es, das Quellensignal nach steigenden und fallenden Ankunftszeiten zu unterteilen. Abbildung 6 veranschaulicht das Problem und dessen Lösung.

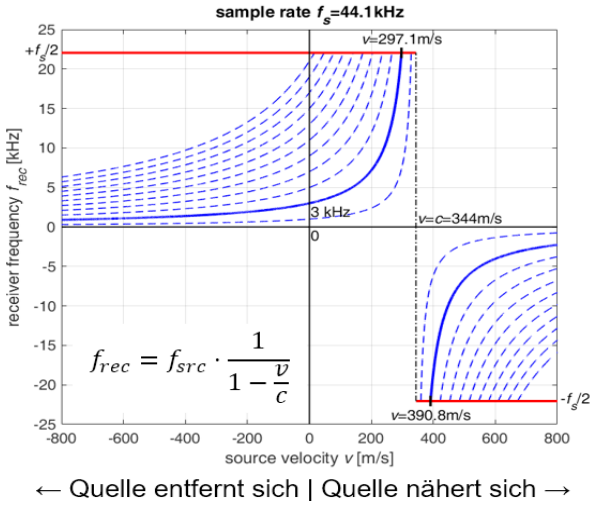

Abbildung 5: Frequenzverschiebung Doppler-Effekt

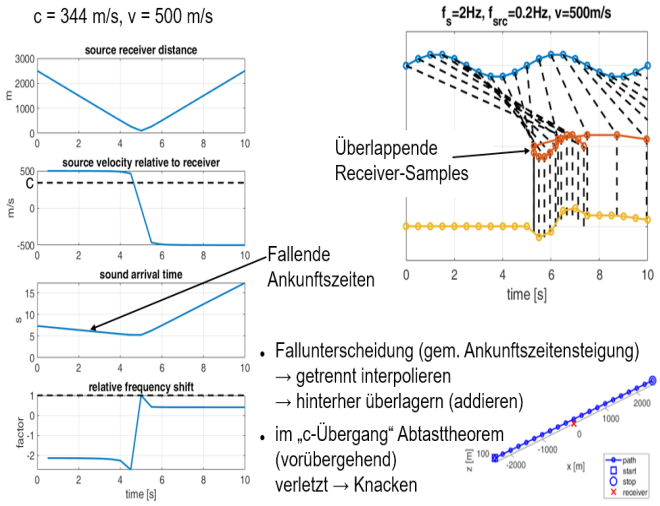

Abbildung 6: Veranschaulichung Methode bei Überschall

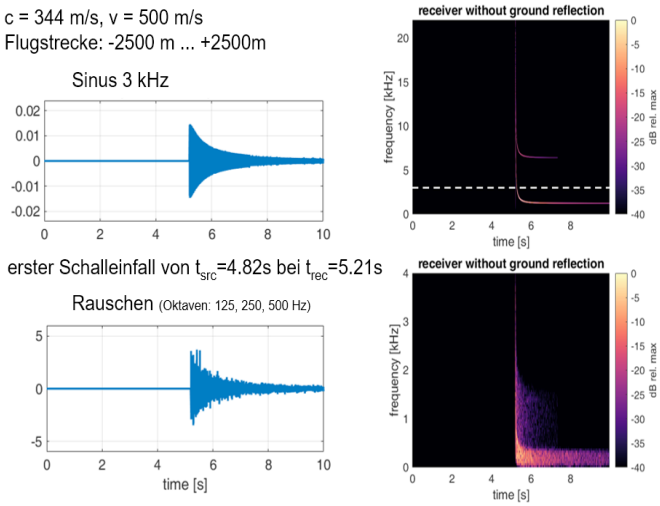

Abbildung 7: Simulationsergebnisse bei Überschall (ohne Bodenreflexion, ohne Doppler-Verstärkung)

Abbildung 7 zeigt zwei prinzipielle Beispiele für Überschallflüge, bei denen keine Bodenreflexion berücksichtigt wurde und auch keine Doppler-Verstärkung, da für letzteres die zuvor angesprochene Approximation nicht mehr gültig ist und zu unendlich hohen Pegeln führen würde. Aber man erkennt das plötzliche Einsetzen des Schalls mit unendlich hohen und damit das Abtasttheorem verletzenden Frequenzen sowie die jeweils zwei Schallanteile, von denen der höherfrequente Anteil quasi rückwärts „abgespielt“ wird.

Drei Quellen im Maßstab einer WKA

Für die Simulation von drei Quellen, die um ein gemeinsames Zentrum kreisen, wurde eine Geometrie gewählt, die auch bei einer Windkraftanlage (WKA) vorkommen kann: Nabenhöhe 150 m („Zentrum“), Radius des Rotors 60 m („Quellenpositionen“) mit 15 Umdrehungen pro Minute (0,25 Hz bzw. 4 s pro Umdrehung). Letzteres ergibt Umfangsgeschwindigkeiten, also Quellengeschwindigkeiten, von ca. 94 m/s bzw. 340 km/h. Der Empfänger befindet sich wie zuvor in 1,7 m Höhe über Boden und in der Rotorebene, da dort die Abstands- und Relativgeschwindigkeitsänderungen am größten sind. Für die Quellen wurden Rauschsignale generiert, die ein Terzspektrum aufweisen, wie das Emissionsspektrum aus [5]. Allerdings muss angemerkt werden, dass dieses Spektrum bereits eine komplette WKA enthält, also bereits alle Quellen und Bewegungen und damit auch bereits z. B. die Frequenzverschiebungen. Das in [5] A-bewertet angegebene Terzpegelspektrum wurde zunächst in unbewertete Pegel umgerechnet und damit die Signale, für jede der drei Quellen getrennt, erzeugt.

Abbildung 8 zeigt zunächst die Ergebnisse für eine einzige Quelle auf kreisförmiger Bahn. Der Empfänger befindet sich 500 m in horizontaler Entfernung vom gedachten Turm. Deutlich sind in den Spektrogrammen (ohne und mit Bodenreflexion) Modulationen zu erkennen – sowohl in der Frequenz als auch in der Amplitude.

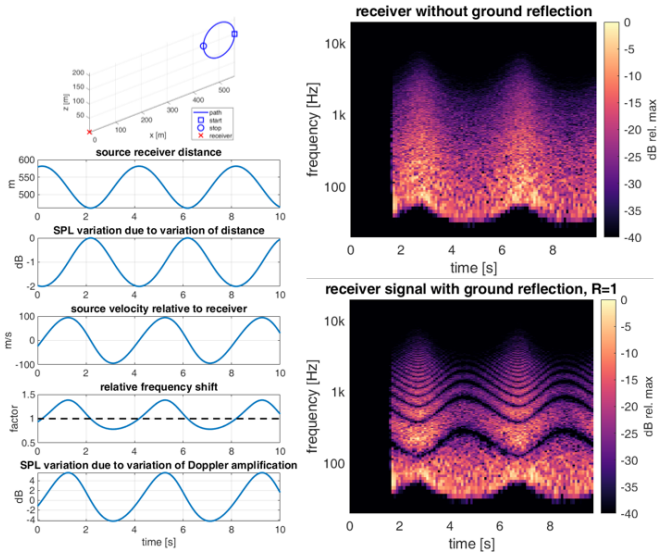

Abbildung 8: Simulation einer einzelnen Quelle auf kreisförmiger Bahn

In den linken Diagrammen ist oben die Entfernung der Quelle vom Empfänger dargestellt und darunter der sich nur aus dem Abstandsgesetz ergebenden Pegelunterschied. D. h. in diesem Falle wird die Quelle vom entferntesten Punkt 2 dB leiser empfangen als vom nächsten Punkt. Die Stärke dieser Modulation ist vom Rotor-Radius r_{rot} und vom Abstand des Empfängers von der Rotornabe r_{nab} abhängig und wird mit wachsendem Abstand gemäß $20 \cdot \log_{10}((r_{nab}+r_{rot})/(r_{nab}-r_{rot}))$

kleiner. In den unteren drei Diagrammen links in Abbildung 8 ist zunächst die Relativgeschwindigkeit, darunter der sich daraus ergebende Frequenzfaktor und ganz unten die Pegeländerung durch den Doppler-Faktor dargestellt. Die beiden Pegeländerungen – durch Abstand und durch Doppler-Effekt – sind sendeseitig (hier dargestellt) um eine Viertel-Rotorumdrehung zueinander verschoben. Die maximale Pegeländerung durch den Doppler-Faktor ist deutlich höher (ca. -4 dB bis +5 dB) als die maximale Pegeländerung durch den Abstand – und sie ist nicht vom Abstand zum Empfänger abhängig.

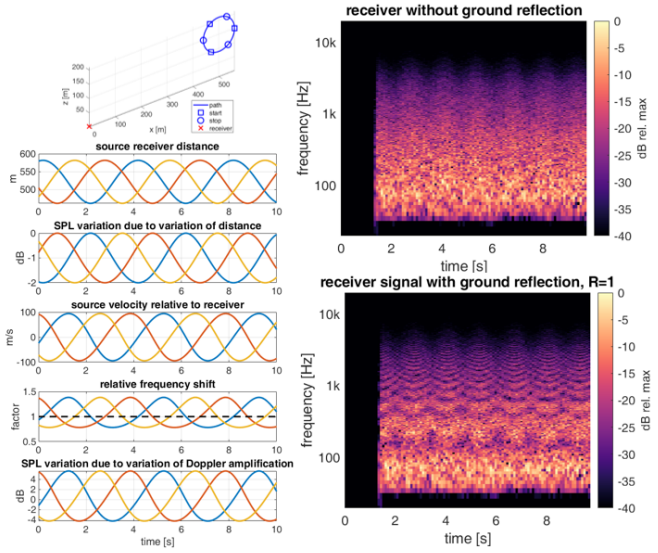

Abbildung 9: Simulation von drei Quellen auf kreisförmiger Bahn

Bei drei Quellen ist die Modulation in den Spektrogrammen des resultierenden Signals in Abbildung 9 deutlich schwächer ausgeprägt. Dies liegt daran, dass sich die modulierenden Wirkungen der jeweils drei Kurven in den Diagrammen links in Abbildung 9 zum Teil aufheben.

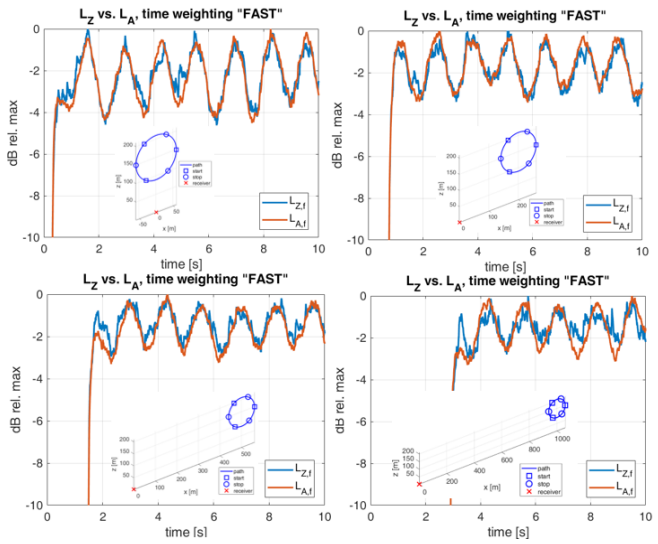

Abbildung 10: Fast-bewerte Summenpegel (dB(A), dB(Z)) bezogen auf jeweilige Maximalwerte bei Horizontalabständen 0 m, 200 m, 500 m, 1000 m

Um eine Abschätzung der verbleibenden Amplitudenmodulationen bei verschiedenen Abständen zu erhalten, wurden die am Empfänger bei verschiedenen Horizontalabständen gewonnenen Signale A-bewertet, gleichgerichtet und mit „fast“ zeit-bewertet. Abbildung 10 zeigt die resultierenden Pegelverläufe. Alle Pegel sind auch hier auf den jeweils auftretenden Maximalwert normiert. Direkt unterhalb der drei Quellen ist eine etwas höhere Amplitudenmodulation als bei den anderen Abständen zu erkennen, weil hier noch die Pegeländerung durch das Abstandsgesetz eine Rolle spielt. Mit zunehmender Entfernung nimmt dieser Einfluss rasch ab, und es verbleibt der Einfluss des Doppler-Faktors auf die Amplitudenmodulation.

Abschließende Bemerkungen und Ausblick

Das vorliegende Modell lässt Untersuchungen an bewegten Schallquellen im Hinblick auf Abstand, Doppler-Effekt und Bodenreflexion zu. Beim Doppler-Effekt werden sowohl die Frequenzverschiebung als auch die Verstärkung berücksichtigt. Zudem können in der Simulation alle Effekte einzeln ein- und ausgeschaltet werden, um deren Einfluss verstehen und auch anhören zu können. Einen erheblichen Einfluss auf den Klang bewegter Quellen hat neben dem Doppler-Effekt auch die Bodenreflexion.

Die Untersuchungen an dem WKA-Model mit drei Quellen zeigte, dass neben der Frequenzmodulation eine deutliche Amplitudenmodulation auftritt, die weniger durch die Abstandsvariation erzeugt wird sondern mehr durch die Doppler-Verstärkung.

Neben den untersuchten Effekten spielen weitere Effekte eine Rolle, die u. U. einen erheblichen Einfluss auf den Klangcharakter und die Modulationen haben können. U. a. sollen in Zukunft folgende Aspekte in der Simulation mitberücksichtigt werden: frequenzabhängige Richtcharakteristik, Bodenreflexion und Ausbreitungsdämpfung sowie Wind und Temperaturschichtungen. Eine binaurale Erweiterung der Simulation mit entsprechenden HRTF bzw. HRIR ist ebenso angedacht wie eine Anpassung der Doppler-Verstärkung an höhere Quellengeschwindigkeiten gemäß [4].

Literatur

[1] Vorländer, M.: Auralization - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, 2nd ed., Springer, 2020

[2] Pies, K., Martinez, S., Pies, D., Fennel, F., Ferreira, A.-K., Malekko, A.: Amplitudenmodulation – Wirkung auf den Menschen, Richtcharakteristik und Dopplereffekt, Lärmbekämpfung Bd. 14 (2019) Nr. 5

[3] Meng, F., Behler, G., Vorländer, M.: A Synthesis Model for a Moving Sound Source Based on Beamforming, Acta Acustica United with Acustica, Vol. 104 (2018) 351 – 362

[4] P. M. Morse, K. U. Ingard: Theoretical acoustics. Princeton University Press, 1968. Chap.11, 717–732.

[5] Untersuchungsbericht Nr. 452‘460, int. 562.2432, Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik, 2010