Modellierung der Schallabstrahlung des Turmes einer Windenergieanlage

Mirco Jonkeren, Jasmin Hörmeyer, Tobias Bohne, Raimund Rolfes
Leibniz Universität Hannover - Institut für Statik und Dynamik, 30167 Hannover, Deutschland,
Email: mirco.jonkeren@web.de, j.hoermeyer@isd.uni-hannover.de

Einleitung

Durch den fortschreitenden Ausbau der Windenergie an Land rücken potenzielle Standorte für Windenergieanlagen zunehmend in die Nähe urbaner Gebiete. Die Folge ist eine steigende Schallemission in den menschlichen Wohnraum, was zu zunehmenden Debatten über die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber der Windenergie an Land führt.
Die Schallabstrahlung einer Windenergieanlage kann im Entwurfsstadium mit Hilfe eines numerischen Simulationsmodells abgeschätzt werden. Aufgrund der Komplexität ist eine Zerlegung in Teilmodelle unvermeidlich, welche schließlich zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden. Dieses wird im Rahmen des Verbundprojektes „WEA-Akzeptanz - Von der Schallquelle zur psychoakustischen Bewertung“ entwickelt und verknüpft unter realistischen atmosphärischen Bedingungen die physikalische Schallentstehung, -abstrahlung und -ausbreitung mit der psychoakustischen Bewertung am Immissionsort.
Im Rahmen dieses Beitrages wird die Körperschallabstrahlung des Turmes einer Windenergieanlage mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) anhand einzelner Anregungsfrequenzen simuliert. Das erarbeitete Simulationsmodell stellt somit die Schnittstelle zwischen strukturdynamischer Simulation und einem Modell zur Berechnung der Schallausbreitung im Fernfeld unter meteorologischen Einflüssen dar.

Problembeschreibung

Das entstehende Schallfeld wird innerhalb der linearen Akustik beschrieben, da durch die betrachteten Turmschwingungen lediglich kleine Änderungen der Zustandsvariablen um ihren Ruhewert auftreten. Beschrieben werden kann dies im Zeitbereich durch den komplexen Schalldruck p mithilfe der Wellengleichung:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0. \tag{1}$$

In diesem Beitrag wird die akustische Wellengleichung mithilfe der FEM im Frequenzbereich gelöst. Entsprechend ergibt sich zur Beschreibung des Schallfeldes die Helmholtzgleichung:

$$\Delta p + k^2 p = 0, \tag{2}$$

$$\text{mit} \qquad k = \frac{\omega}{c} - j\alpha. \tag{3}$$

Enthalten in der komplexwertigen Wellenzahl k stellt die Schallgeschwindigkeit c in dieser Betrachtung neben der Kreisfrequenz ω eine konstante Größe dar. Begründet ist dies darin, dass atmosphärische Einflüsse, wie beispielsweise die Refraktion oder Turbulenzen, erst in größerer Entfernung zur Schallquelle eine relevante Rolle einnehmen.[8] Die Absorption des Schalls in der Atmosphäre ist jedoch relevant und wird mithilfe des Dämpfungskoeffizienten α im Dämpfungsmodell nach Bass, Sutherland, Zuckerwar, Blackstock und Hester [1] beschrieben.

Modellentwicklung

Physikalisch betrachtet handelt es sich um die Schallabstrahlung in das Freifeld. Aus Sicht der Numerik, stellt dieses Problem eine Randwertaufgabe dar, in der mit der Helmholtzgleichung eine lineare, inhomogene, elliptische, partielle Differentialgleichung 2. Ordnung gelöst wird. Im Hinblick auf den zu lösenden Definitionsbereich lässt sich die Schallabstrahlung in das Freifeld als Außenraumproblem einordnen, da sich der Definitionsbereich bis in das Unendliche erstreckt.[5] Dies ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Zum Lösen dieser Randwertaufgabe ist es notwendig entsprechende Randbedingungen vorzugeben. Da die Berechnung des Schallfeldes bis in das Unendliche praktisch nicht möglich ist, treten im Hinblick auf das zu lösende Problem sowohl Randbedingungen am inneren Rand Γ_i als auch Bedingungen am äußeren Rand Γ_a auf.

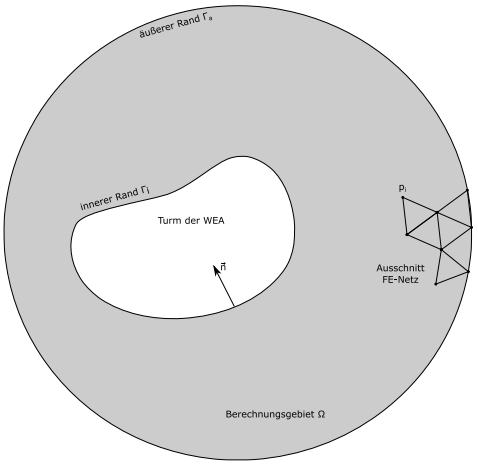


Abbildung 1: Darstellung des zu lösenden Außenraumproblems. Berechnungsgebiet Ω um den Turm der Windenergieanlage mit dem inneren Rand Γ_i und dem äußeren Rand Γ_a. Der Schalldruck p_i als zu berechnende Größe des diskretisierten Gebietes. In Anlehnung an: [4][5]

Randbedingung am inneren Rand

Mithilfe der Neumann-Randbedingung wird allgemein die Ableitung des Funktionswertes auf dem Rand angegeben. Im betrachteten Fall also die Normalenableitung des Schalldruckes. Mithilfe dieser Randbedingung lässt sich beispielsweise die Schallschnelle in Normalenrichtung v_n

oder durch deren Integration auch die Verschiebung der Randfläche in Normalenrichtung u_n definieren:[3]

$$\frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = \nabla p \cdot \vec{n} = -j\omega\rho v_n = \omega^2 \rho u_n. \tag{4}$$

Beschrieben werden kann hiermit die schallharte Wand (indem $v_n = 0$ gilt) oder es können Oberflächenverschiebungen und -geschwindigkeiten auf den Rand einer gegebenen Struktur angegeben werden. Vernachlässigt wird dabei die Rückwirkung des Schalles auf die Strukturschwingungen. Dies ist jedoch bei großen Strukturmassen und Fluiden geringer Dichte zulässig.[3] Die berechneten Oberflächenverschiebungen des Turmes der Windenergieanlage sind dabei aus der strukturdynamischen Berechnung des Projektpartners *Senvion GmbH* zur Verfügung gestellt worden. Aus der Bewegungsdifferentialgleichung eines n-Massenschwingers (mit der Massenmatrix $\mathbf{M}$, Dämpfungsmatrix $\mathbf{B}$, Steifigkeitsmatrix $\mathbf{K}$ und dem Anregungsvektor $\vec{f}$) lässt sich über den komplex-exponentiellen Ansatz der Vektor der Knotenverschiebungen $\vec{u}$ im eingeschwungenen Zustand als partikuläre Lösung der Differentialgleichung bestimmen.

$$\vec{u} = [-\omega^2\mathbf{M} + j\omega\mathbf{B} + \mathbf{K}]^{-1}\vec{f} \tag{5}$$

Der Verschiebungsvektor $\vec{u}$ ist komplexwertig und besitzt entsprechend den Real- sowie Imaginärteil der Schwingungsantwort.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{re,1} \\ \vdots \\ u_{re,n} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} u_{im,1} \\ \vdots \\ u_{im,n} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Mithilfe dieser Informationen lassen sich der Betrag und das Argument der komplexen Verschiebung bestimmen:

$$\vec{u} = \vec{u}_{re} + j \cdot \vec{u}_{im} = |\vec{u}| \cdot e^{j\vec{\Phi}}. \tag{7}$$

Diese Informationen lassen sich nun für jeden Knoten in das FE-Modell importieren. Vom Projektpartner *Senvion GmbH* sind dabei die Werte für Amplitude sowie Phase der Knotenverschiebungen separat in ihren x-, y- sowie z-Anteilen an den entsprechend Knotenkoordinaten (x, y, z) berechnet worden.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\vec{u}_x|(x,y,z) \cdot e^{j\cdot\vec{\phi}_x(x,y,z)} \\ |\vec{u}_y|(x,y,z) \cdot e^{j\cdot\vec{\phi}_y(x,y,z)} \\ |\vec{u}_z|(x,y,z) \cdot e^{j\cdot\vec{\phi}_z(x,y,z)} \end{bmatrix} \tag{8}$$

Es stehen als Importdaten somit die Verschiebungen eines Knoten in die jeweiligen drei Raumkoordinaten und dessen Knotennummer zur Verfügung. Über diese Nummer lassen sich die Verschiebungen den Knotenkoordinaten der importierten Oberflächengeometrie zuordnen, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt.
Zwischen diesen diskreten Knotenverschiebungen wird seitens der verwendeten Software linear interpoliert, auch wenn die berechneten Verschiebungen der Elementknoten auf quadratischen Ansatzfunktionen basieren. Dies ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

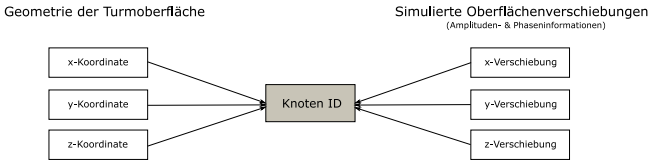


Abbildung 2: Zuordnung der simulierten Oberflächenverschiebungen zu den Knotenkoordinaten der importierten Geometrie der Turmoberfläche.

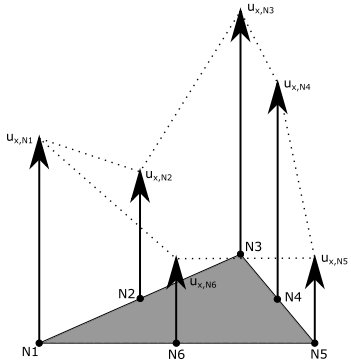


Abbildung 3: Aufbringen der Oberflächenverschiebungen an den einzelnen Knoten des FE-Netzes. Zwischen diesen wird mithilfe einer Interpolationsfunktion linear interpoliert.

Randbedingung am äußeren Rand
Für die Definition des äußeren Randes Γ_a muss beachtet werden, dass für das bis ins Unendliche reichende Rechengebiet die Sommerfeldsche Abstrahlbedingung gelten muss. Diese Bedingung ist bei der Verwendung der FEM zunächst nicht erfüllt, weshalb für den äußeren Rand auch entsprechende Bedingungen definiert werden müssen. Dabei wird im vorliegenden Beitrag die Methode der Perfectly Matched Layer (PML) gewählt. Die Grundidee der PML ist dabei, dass in diesem zusätzlichen Rechengebiet der Schall nach Eintreten ideal absorbiert wird. Durch Angleichen der Schallfeldimpedanzen an der Grenze zwischen dem Berechnungsgebiet und dem Randgebiet findet keine Reflexion statt. Somit ist es möglich, ein reflexionsfreies Eintreten der Schallwellen in das PML-Gebiet zu realisieren.[7]

Diskretisierung
Bei der Diskretisierung sind die zwei Bereiche des Berechnungsgebietes zu differenzieren:

- Gebiet der Schallausbreitung (Luftgebiet)
- Randgebiet der Perfectly Matched Layer

Das Gebiet der Ausbreitung des Luftschalls wird mithilfe von unstrukturierten Tetraederelementen 2. Ordnung diskretisiert. Die unstrukturierte Vernetzung begründet sich dabei auf der zunächst unbekannten Ausbreitungsrichtung der Schallwellen im dreidimensionalen Raum.
Bei der Berechnung akustischer Schallwellen ist darauf zu achten, dass die Wellenlänge des Schalls ausreichend genau abgebildet wird. Aus diesem Grund wird die maximale Elementgröße im vorliegenden Simulationsmodell anhand des Parameters „Elemente pro Wellenlänge“ definiert. Im Zielkonflikt zwischen Ergebnisgenauigkeit und der benötigten Rechenkapazitäten wird basierend auf ei-

ner durchgeführten Netzkonvergenzstudie und der daraus mithilfe der Richardson-Interpolation berechneten netzunabhängigen Größe des Schalldruckpegels eine maximale Größe der finiten Elemente von $\lambda/8$ festgelegt (siehe Abbildung 4).

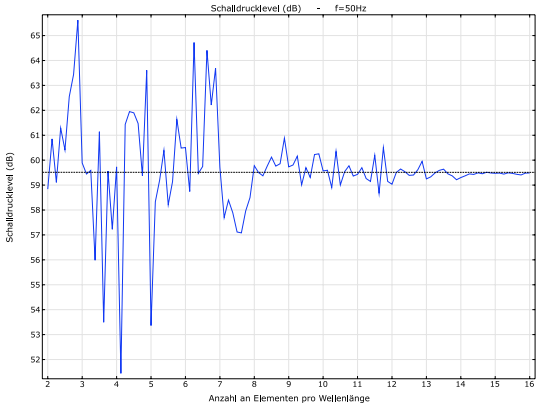


Abbildung 4: Verlauf des Schalldruckpegels in einem Auswertungspunkt bei Durchführung einer Netzkonvergenzstudie. Betrachteter Bereich der maximalen Elementgröße: $h = \lambda/2$ bis $\lambda/16$. Schrittweite: $\Delta h = 0.125$ Element/λ. Anregungsfrequenz: $f = 50\,Hz$.

Im zu berechnenden Randgebiet der Perfectly Matched Layer wird im Vergleich zum Luftgebiet ein strukturiertes Netz genutzt. Um eine vollständige Absorption im vorliegenden Modell zu gewährleisten, wird das Randgebiet der PML mit zehn Elementen diskretisiert, die sich gleichmäßig auf die Breite des PML-Gebietes verteilen.

Modellverifizierung

Das erstellte Simulationsmodell wird mithilfe der Richtcharakteristik eines schallabstrahlenden finiten Zylinders auf Plausibilität untersucht. Hierzu werden die geometrischen Verhältnisse des Turmes an die eines Referenzmodells angepasst und die Schallabstrahlung anhand der jeweiligen Richtcharakteristik untersucht. Als Referenz wird dazu die semianalytische Methode von Williams, Parke, Moran und Sherman genutzt.[9] Iterationsfehler sowie Diskretisierungsfehler werden gesondert mithilfe der bereits genannten netzunabhängigen Größe des Schalldruckpegels analysiert. Für weitere Informationen sei auf [6] hingewiesen.

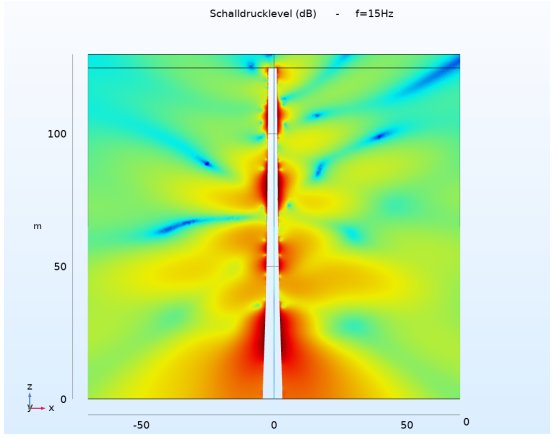
Ergebnisse der Abstrahlungssimulation

Nachdem die Randbedingungen in die schwache Form der Helmholtzgleichung eingesetzt sind wird das entstandene Gleichungssystem iterativ gelöst.

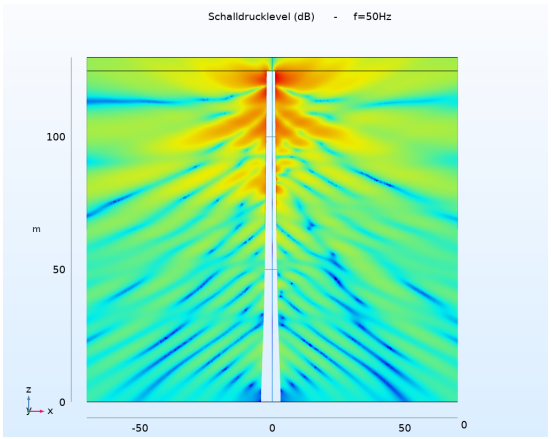
Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt mithilfe des Schalldruckpegels. Zu beachten gilt, dass die berechnete Schallabstrahlung von der simulierten Anregung abhängt. Diese sowie die berechneten Anregungsfrequenzen sind vom Projektpartner *Senvion GmbH* künstlich erzeugt worden und erlauben keine Rückschlüsse auf den realen Betrieb. Eine Deutung hinsichtlich der realen Betriebsbedingungen einer Windenergieanlage ist aus diesem Grund nicht möglich.

In Abbildung 5 ist ein Vergleich der Schallabstrahlung zwischen den Anregungsfrequenzen $f = 15\,Hz$ sowie $f = 50\,Hz$ abgebildet. Das Luftgebiet ist in diesem Fall vollständig von einer PML umschlossen.

Dabei lässt sich grundlegend eine Richtcharakteristik einer Dipolquelle erkennen. Dies basiert auf den simulierten Anregungskräften, die den Turm verstärkt zu Schwingungen in Längsrichtung anregen. Aufgrund der sich verändernden Turmgeometrie und zwei unterschiedlichen Turmmaterialien, ist eine mit der Höhe veränderliche Schallabstrahlung zu identifizieren. Während in unmittelbarer Nähe zum Turm starke lokale Unterschiede des Schalldruckpegels entstehen, ist mit zunehmender Entfernung ein sich homogenisierendes Schallfeld zu erkennen. Dies ist unter anderen von der Anregungsfrequenz abhängig. Mit steigender Frequenz bildet sich eine komplexere Schwingform aus und Interferenzerscheinungen besitzen aufgrund der kürzeren Wellenlänge in unmittelbarer Nähe zum Turm eine größere Relevanz.



(a)

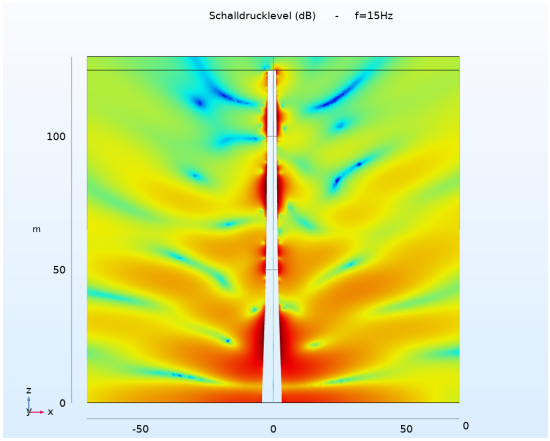


(b)

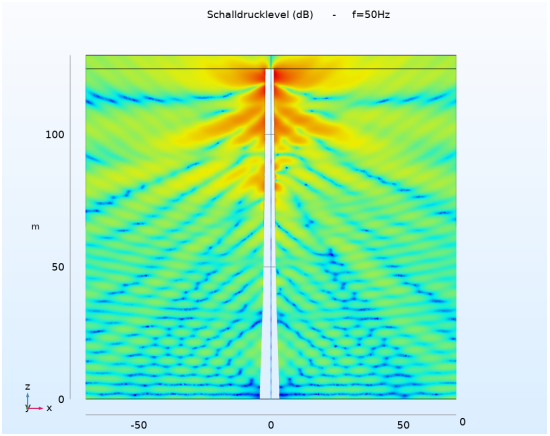
Abbildung 5: Vergleich des simulierten Schalldruckpegels der beiden Anregungsfrequenzen $f = 15\,Hz$ (a) und $f = 50\,Hz$ (b). Oberflächenschwingungen wurden künstlich erzeugt, sodass die dargestellten Ergebnisse keinen Rückschluss auf den Betrieb einer realen Anlage erlauben.

Die Modellierung des Erdbodens durch die Definition einer PML entspricht nicht den in realen Umgebungen vorliegenden Bodenverhältnissen und bildet somit den Extremfall einer vollständigen Absorption ab. Zum Vergleich werden diese beiden Anregungsfrequenzen ebenfalls mit dem Extremfall der vollständigen Reflexion durch eine schallharte Wand simuliert. Die in der Rea-

lität vorherrschende Absorption bzw. Reflexion des Erdbodens liegt zwischen diesen beiden Extremfällen. Wie in Abbildung 6 zu erkennen, sind durch die vollständige Reflexion am Erdboden vermehrt Interferenzmuster zu erkennen, die insbesondere bei höheren Frequenzen, aufgrund der kürzeren Wellenlänge, an Bedeutung gewinnen. Es findet somit neben der horizontalen Schallausbreitung auch eine zunehmende vertikale Ausbreitung statt.



(a)



(b)

Abbildung 6: Vergleich des simulierten Schalldruckpegels der beiden Anregungsfrequenzen $f = 15\,Hz$ (a) und $f = 50\,Hz$ (b) mit vollständiger Reflexion am Erdboden. Oberflächenschwingungen wurden künstlich erzeugt, sodass die dargestellten Ergebnisse keinen Rückschluss auf den Betrieb einer realen Anlage erlauben.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein numerisches Simulationsmodell vorgestellt, welches die Berechnung der Körperschallabstrahlung vom Turm einer Windenergieanlage ermöglicht. Dieses Modell bildet die Schnittstelle zwischen strukturdynamischer Berechnung der Turmschwingungen und der Schallausbreitung ins Fernfeld unter meteorologischen Bedingungen. Beschrieben wurde hierzu insbesondere die Definition der Randbedingungen für das zu lösende Randwertproblem. Es konnte dabei gezeigt werden, dass ein Aufbringen von Verschiebungen in einzelne Knoten eines importierten FE-Netzes einer realen Turmgeometrie möglich ist und somit simulierte Oberflächenverschiebungen als Neumann-Randbedingung auf die Turmoberfläche aufgebracht werden können. Im vorliegenden Modell wird die Absorption des Schalles durch die Atmosphäre berücksichtigt.
Um zukünftig Aussagen über die Schallausbreitung während des realen Betriebes tätigen zu können, bedarf es einer Ausweitung auf vollständige Frequenzspektren. Auch ist die Erweiterung durch die Körperschallabstrahlung des Maschinenhauses und des Rotors sowie die aeroakustische Schallentstehung notwendig.

Danksagung

Das Institut für Statik und Dynamik ist Teil des Zentrums für Windenergieforschung „ForWind“. Die Forschungsaktivitäten der Leibniz Universität Hannover im Rahmen des Projektes „WEA-Akzeptanz“ werden zusammen mit dem Verbundpartner Senvion GmbH durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Bundestages (FKZ 0324134A) gefördert. Die Autoren möchten sich für diese Unterstützung beim Zuwendungsgeber herzlich bedanken. Weitere Informationen können der Projekthomepage `www.wea-akzeptanz.uni-hannover.de` entnommen werden.

Literatur

[1] Bass, H.E. et al.: Atmospheric absorption of sound: Further developments. The Journal of the Acoustical Society of America 97.1 (1995), 680-683

[2] Blackstock, D.T.: Fundamentals of physical acoustics. Wiley, New York, 2000

[3] Franck, A.: Finite-Elemente-Methoden, Lösungsalgorithmen und Werkzeuge für die akustische Simulationstechnik. Logos-Verlag, Berlin, 2009

[4] Giljohann, D.: Finite-Elemente-Methoden für die Schallausbreitung ins Freifeld. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996

[5] Hampel, S.: Numerische Simulation der Schallausbreitung unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse. Braunschweiger Schriften zur Mechanik, Braunschweig, 2006, URL: `http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00009616`

[6] Jonkeren, M.: Berechnungsprozess für 3D-Schallabstrahlungssimulation rund um eine Windenergieanlage (WEA), 2019

[7] Lerch, R., Sessler, G. M., Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer, Berlin, 2009

[8] Öhlund, O., Larsson, C.: Meteorological effects on wind turbine sound propagation. Applied Acoustics 89 (2015), 34-41

[9] Williams, W. et al.: Acoustic Radiation from a Finite Cylinder. The Journal of Acoustical Society of America 36.12 (1964), 2316-2322