Ein numerisches Modell zur Vorhersage der Schallausbreitung von Windenergieanlagen unter Berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse

Jasmin Hörmeyer[1], Tobias Bohne[1], Raimund Rolfes[1]

[1] *Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik, 30167 Hannover, Deutschland*

Email: j.hoermeyer@isd.uni-hannover.de

Einleitung

Der Ausbau der Windenergie an Land im Zuge der Energiewende führt zu einer erhöhten Lärmbelastung für angrenzende Bewohner. Um die Akzeptanz von Windenergieanlagen bei der betroffenen Bevölkerung zu steigern, wird im Verbundforschungsprojekt „WEA-Akzeptanz“ ein akustisches Gesamtmodell entwickelt. Dieses Gesamtmodell soll die vollständige Übertragungskette von der Schallentstehung an der Anlage über die Schallausbreitung in der Atmosphäre bis hin zur Schallimmission und psychoakustischen Bewertung des Schallereignisses darstellen.

Die Notwendigkeit eines akustischen Ausbreitungsmodells basiert zum einen auf der steigenden Anzahl von Windenergieanlagen (WEA) an Land und dem geringer werdenden Abstand zur angrenzenden Wohnbebauung, zum anderen auf dem atmosphärischen Einfluss auf die Schallausbreitung. Neben meteorologischen und topografischen Einflussgrößen sind hierbei geometrische Effekte von hoher Relevanz, welche sich besonders bei großer Entfernung von Quelle zu Empfänger auswirken. Mit Hilfe eines solchen Modells kann während der Planungsphase einer neuen WEA bereits die Schallausbreitung vorhergesagt und explizit an Standort und atmosphärische Bedingungen angepasst werden.

Aufgrund der komplexen Gegebenheiten werden in diesem Beitrag relevante Einflussgrößen und Effekte sowie die Implementierung in numerische Berechnungsverfahren diskutiert. Es wird ein vereinfachtes numerisches Modell für die Schallausbreitung in der Atmosphäre vorgestellt. Anhand des Modells kann anschließend die Übertragbarkeit von einer niedrigen zu einer hohen Schallquelle, sowie der atmosphärische Einfluss bei großen Entfernungen untersucht werden um in Zukunft eine Ausweitung des Modells auf Windenergieanlagen realisieren zu können.

Modellanforderungen

Die komplexen Umgebungsbedingungen in der Atmosphäre bilden die Anforderungen an das Schallausbreitungsmodell. Neben meteorologischen Bedingungen, wie Temperaturänderungen, Windgeschwindigkeiten, Turbulenzen, Luftfeuchtigkeit, spielen die Topografie sowie die Bodenbedingungen und der Bodenbewuchs eine entscheidende Rolle in der Schallausbreitung. Diese Einflussgrößen führen zu einer Entstehung von geometrischen Effekten in der Atmosphäre, welche insbesondere die Schallausbreitung über große Entfernungen beeinflussen.

Die Brechung von Schallwellen, infolge von Temperatur- oder Windeinfluss, ist einer dieser geometrischen Effekte und wird in diesem Beitrag fokussiert. In Abbildung 1 ist dieser Effekt durch Schallstrahlen visualisiert. Mit steigender Temperatur nimmt die Schallgeschwindigkeit zu, was zur Folge hat, dass eine Refraktion der Schallwellen entsteht. Bei normaler Wetterlage nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab, wodurch die Schallwellen nach oben gebrochen werden und sich folglich in Bodennähe geometrische Schattenzonen ausbilden. Im Falle einer Inversionswetterlage, dreht sich das Temperaturprofil um, die Temperatur steigt mit zunehmender Höhe. Demnach werden die Schallwellen bei dieser Wetterlage nach unten gebrochen, welches in Bodennähe zu höheren Schalldruckpegeln und Reflexionen führt.

Bei Auftreten von Wind wird die Schallgeschwindigkeit c mit der Windgeschwindigkeit v_w, welche mit der Höhe ansteigt, überlagert und es bildet sich die effektive Schallgeschwindigkeit c_{eff}. Entsprechend wird die Windgeschwindigkeit in Windrichtung zur Schallgeschwindigkeit addiert und entgegen der Windrichtung subtrahiert. Dies hat zur Folge, dass in Windrichtung die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt und die Schallwellen nach unten gebrochen werden. Es entstehen Reflexionen am Boden und höhere Schalldruckpegel in Bodennähe. Entgegen der Windrichtung nimmt die Schallgeschwindigkeit hingegen mit der Höhe ab, die Schallwellen werden nach oben gebrochen, wodurch geometrische Schattenzonen gebildet werden.

Weitere geometrische Effekte sind unter anderem die Streuung von Schallwellen infolge von atmosphärischer Turbulenz sowie die Beugung von Schallwellen in geometrische Schattenzonen.

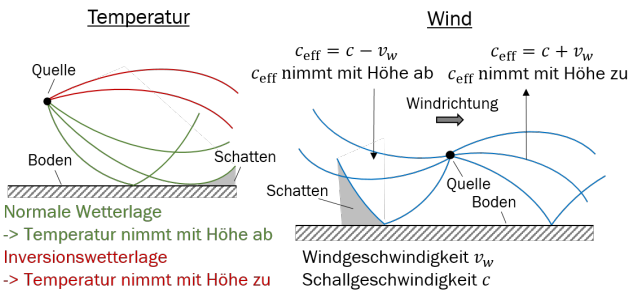

Abbildung 1: Brechung der Schallwellen infolge von Temperatur- und Windeinfluss

Numerisches Berechnungsverfahren

Für die Implementierung der zuvor genannten Modellanforderungen und geometrischen Effekten ist die

PE-Methode (Parabolic Equation Method) eine geeignete Wahl. Die PE-Methode ist eine numerische Methode für die Berechnung des Schallfeldes einer Monopolquelle. Die Berechnung des Schallfeldes erfolgt durch Lösen parabolischer Gleichungen. Diese Gleichungen folgen aus der Wellengleichung durch Vernachlässigung des Einflusses großer Winkel, welches dazu führt, dass die Genauigkeit der Ergebnisse auf einen Bereich innerhalb eines Winkels reduziert ist. Da in dem hier vorgestellten Modell der Fokus auf die Schallausbreitung in größerer Entfernung liegt, ist diese Einschränkung nicht relevant.
Im Allgemeinen bedient sich das Modell der linearen Akustik mit der Annahme, dass Druckschwankungen der Schallwelle im Vergleich zum atmosphärischen Druck klein sind. Grundlage der PE-Methode sind die in Gleichung 1 gegebene Massenerhaltung sowie die in Gleichung 2 aufgeführte Impulserhaltung der Navier-Stokes-Gleichungen.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho v) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p \tag{2}$$

Hieraus lässt sich die in Gleichung 3 angegebene Wellengleichung ableiten. Die zeitunabhängige Form der Wellengleichung wird als Helmholtz-Gleichung bezeichnet und ist unter Gleichung 4 aufgeführt.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \qquad k = \omega / c \tag{4}$$

Für das zweidimensionale Modell der PE-Methode wird die Helmholtz-Gleichung von 3D auf 2D durch Annahme der Axialsymmetrie reduziert. Daraus folgt die Gleichung 5.

$$\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + k_{\text{eff}}^2 \cdot q = 0 \tag{5}$$

$$k_{\text{eff}} = \omega / c_{\text{eff}}, \qquad c_{\text{eff}} = c_0 \pm v_w$$

Die in dieser Gleichung verwendeten Koordinaten sind in Abbildung 2 dargestellt. Durch die Annahme der Axialsymmetrie und der Reduktion der Helmholtz-Gleichung folgt, dass keine Variation des Schalldrucks mit dem Winkel φ erfolgt, wodurch die Näherung des atmosphärischen Windes mit der effektiven Schallgeschwindigkeit gültig ist. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass das Modell von einer Punktschallquelle angeregt wird. Das Berechnungsgebiet des Schallfeldes $q(r, z)$ ist ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt. Die Diskretisierung und Berechnung erfolgt über die Finite Differenzen Methode. Die Gittergröße, Δz und Δr, sollte hierbei kleiner als $1/10\lambda$ ($\lambda = c/f$ = Wellenlänge) sein. Die Berechnung beginnt an Position $q(0, z)$ und wird schrittweise in positive Ausbreitungsrichtung extrapoliert mit $q(r, z) \rightarrow (r + \Delta r, z)$. Die Wellenzahl k in der Helmholtz-Gleichung ist eine Funktion der Höhe z und unabhängig von der Ausbreitungsrichtung r, wodurch die Schallgeschwindigkeit höhenabhängig variiert und somit auch Refraktionen implementiert werden können. Das Berechnungsgebiet ist

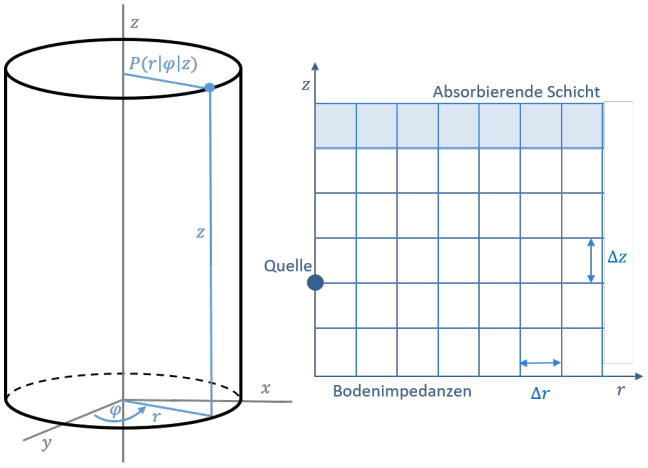

Abbildung 2: Darstellung der Zylinderkoordinaten (links) und des Berechnungsgebietes (rechts)

am oberen Rand anhand einer künstlich absorbierenden Schicht und am unteren Rand anhand Bodenimpedanzen begrenzt.

Schallausbreitungsmodell

Für das Schallausbreitungsmodell werden zwei Modelle, welche sich in der Höhe der Schallquelle unterscheiden, verwendet. In Abbildung 3 sind beide Modelle visualisiert. Das *Modell A* hat eine Quellhöhe von $H_{SL} = 1,70\,\text{m}$, das *Modell B* eine Quellhöhe von $H_{SH} = 100\,\text{m}$, welches eine WEA repräsentiert. Der Schalldruckpegel wird in beiden Modellen jeweils in einer Höhe von $H_R = 1,70\,\text{m}$ ermittelt. Das Ausbreitungsgebiet erstreckt sich über eine Distanz von $R = 1000\,\text{m}$. Die Simulationen werden jeweils bei einer Frequenz von $f = 500\,\text{Hz}$ durchgeführt.
In den Modellen wird die effektive Schallgeschwindigkeit eingesetzt, wobei die Windgeschwindigkeit als logarithmischen Profil berücksichtigt wird, welche sich wie in Gleichung 6 angegeben, berechnet. Anhand des Refraktionsfaktors b kann die Ausrichtung der Brechung der Schallwellen bestimmt werden. Entsprechend werden bei $b = -1\,\text{m/s}$ die Schallwellen nach oben gebrochen (entgegen der Windrichtung), bzw. bei $b = +1\,\text{m/s}$ erfolgt eine Schallbrechung nach unten (in Windrichtung).

$$c_{\text{eff}}(z) = c_0 + v_w(z) = c_0 + b \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0} + 1\right) \tag{6}$$

Verifzierung des Modells

Für die Verifizierung wird das *Modell A* mit der Quellhöhe von $H_{SL} = 1,70\,\text{m}$ verwendet. Die Verifizierung der Schallausbreitung erfolgt durch einen Vergleich der Schallpegelabnahme von Simulationsmodell und DIN ISO 9613-2. Die DIN ISO 9613-2 dient der Berechnung der Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Diese Norm ist für niedrige Schallquellen ausgelegt, welches Grund für die Verwendung des *Modells A* in der Verifizierung ist. In dem Diagramm in Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Schallpegelabnahme ΔSPL über

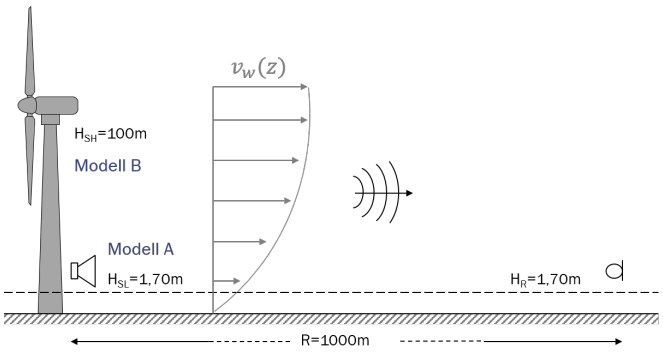

Abbildung 3: Darstellung von *Modell A* und *Modell B* für die Simulation der Schallausbreitung

die Distanz dargestellt. Es ist deutlich, dass die Ergebnisse beider Methoden eine starke Übereinstimmung haben, sodass das Modell berechnet mit der PE-Methode (PE-Modell) als verifiziert gilt.

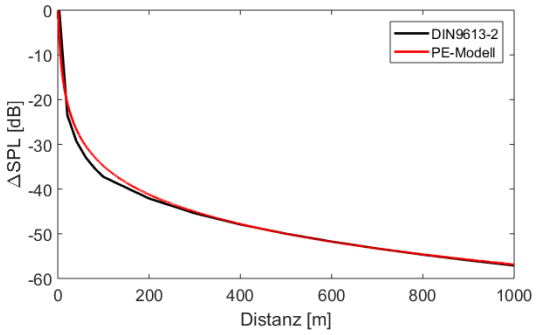

Abbildung 4: Verifizierung des PE-Modells mit Hilfe der DIN ISO 9613-2: ΔSPL über die Distanz bei Quellhöhe $H_{SL} = 1,70\,\mathrm{m}$.

Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation des *Modells A* sind in Abbildung 5 dargestellt. Im mittleren Bild ist hierbei die Schallausbreitung ohne Einfluss von Refraktion dargestellt und es ist ein gleichmäßiger Abfall des Schallpegels in Ausbreitungsrichtung zu erkennen. Die keulenartige Charakteristik ist auf Interferenzen infolge von Bodenreflexionen zurückzuführen. Das obere Bild zeigt die Schallausbreitung entgegen der Windrichtung, was eine Refraktion der Schallwellen nach oben zur Folge hat. Es bildet sich hier bereits nach kurzer Distanz (ca. 200 m) eine geometrische Schattenzone aus, welche aufgrund von Schallbeugung und Schallstreuung in der Realität einer geringeren Ausprägung unterliegt. Im unteren Bild ist die Schallausbreitung in Windrichtung, mit einer Refraktion nach unten aufgeführt. Infolge dessen entstehen Reflexionen am Boden und die Dämpfung des Schallpegels fällt geringer aus.
Im Diagramm in Abbildung 6 ist hierzu der Schallpegel über die Distanz dargestellt. Ohne Refraktion erfolgt eine gleichmäßige Schallpegelabnahme mit der Distanz. Bei Refraktion nach oben ist eine sehr starke Abnahme des Schallpegels nach kurzer Distanz zu erkennen, welches die geometrische Schattenzone wiedergibt. Bei einer Refraktion nach unten sind im Diagramm Unregelmäßigkeiten aufgrund der Bodenreflexionen deutlich. Im Mittel ist der Schallpegel in diesem Fall am Höchsten.

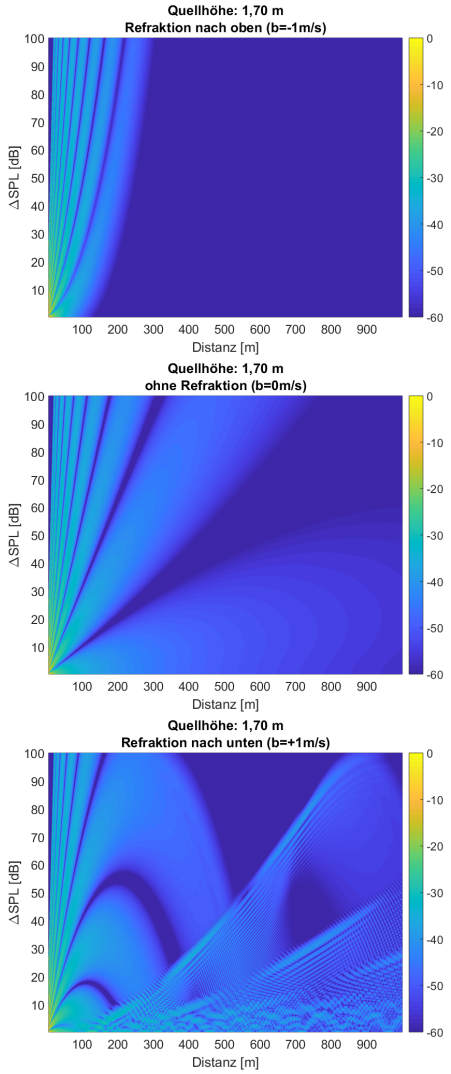

Abbildung 5: Schallpegelabfall ΔSPL des *Modells A* bei Quellhöhe $H_{SL} = 1,70\,\mathrm{m}$. Oberes Bild: Refraktion nach oben, mittleres Bild: ohne Refrakion, unteres Bild: Refraktion nach unten.

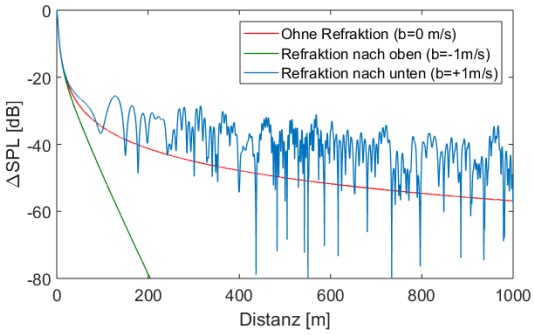

Abbildung 6: Schallpegelabfall des *Modells A*: ΔSPL über die Distanz bei Quellhöhe $H_{SL} = 1,70\,\mathrm{m}$.

Im *Modell B* sind aufgrund der höheren Quellposition deutliche Unterschiede in den Ergebnissen zu erkennen,

welche in Abbildung 7 dargestellt sind. In der mittleren Abbildung, der Schallausbreitung ohne Einfluss von Refraktion, ist wie auch im *Modell A* ein gleichmäßiger Schallpegelabfall deutlich. Dieses spiegelt ebenfalls das Diagramm in Abbildung 8 wider. Wie auch im *Modell A* ist im oberen Bild der Abbildung 7 (Refraktion nach oben) die Entstehung des Schattenbereiches deutlich, jedoch zeigen Abbildung 7 und 8, dass dieser Schattenbereich erst mit größerer Distanz (ca. 400 m) entsteht. Selbiges zeigt sich im unteren Bild der Abbildung 7 bei der Refraktion nach unten (Schallausbreitung in Windrichtung). Hier treten die Bodenreflexionen ebenfalls erst mit größerer Distanz (ca. 800 m) ein, welches, wie im Diagramm in Abbildung 8 zu sehen ist, einen Anstieg des Schallpegels in größer werdenden Distanz zur Folge hat.

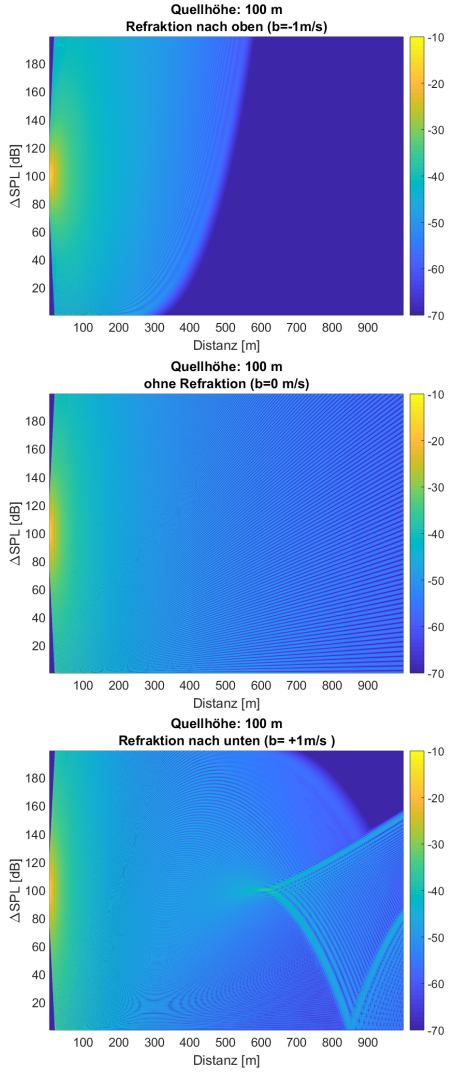

Abbildung 7: Schallpegelabfall ΔSPL des *Modells B* bei Quellhöhe $H_{SH} = 100$ m. Oberes Bild: Refraktion nach oben, mittleres Bild: ohne Refrakion, unteres Bild: Refraktion nach unten.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Vergleich der niedrigen Schallquelle im *Modell A* mit der hohen Schallquelle im *Modell B* zeigt deutliche Änderungen in der Schallausbreitung, wenn Refraktionen

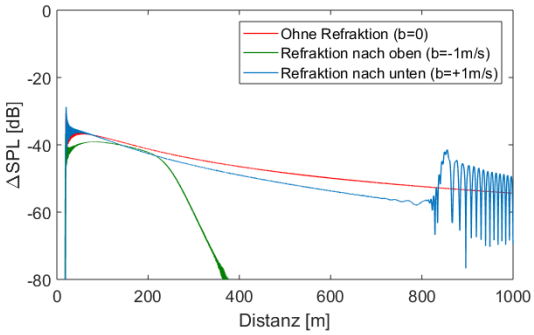

Abbildung 8: Schallpegelabfall des *Modells B*: ΔSPL über die Distanz bei Quellhöhe $H_{SH} = 100$ m.

infolge von Wind vorhanden sind. Aufgrund der höheren Schallquelle im *Modell B* und somit der veränderten geometrischen Bedingungen folgt, dass entgegen der Windrichtung und einer Refraktion nach oben, die geometrische Schattenzone erst bei größerer Distanz ausgebildet wird. Ebenfalls entstehen in diesem Modell in Windrichtung, und einer Refraktion nach unten, die Bodenreflexionen erst in größerer Distanz, welches einen Anstieg des Schalldruckpegels zur Folge hat. In Bezug auf Windenergieanlagen ist dieses Ergebnis von großem Interesse, da infolge der Refraktionen nach unten der Pegelanstieg in größerer Distanz, die angrenzende Wohnbebauung betreffen kann.

Das hier vorgestellte PE-Modell wird in Zukunft erweitert, um die standortbezogene Schallausbreitung von Windenergieanlagen zu prognostizieren. Hierfür werden unter anderem reale meteorologische Szenarien, atmosphärische Turbulenz, Nachlaufströmungen und Richtcharakteristik einer WEA sowie die Topografie in das Modell implementiert. Nebenher werden Feldmessungen im Rahmen des Projektes „WEA-Akzeptanz“ stattfinden, mit Hilfe derer das Modell validiert wird.

Projektförderung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des Projektes „WEA-Akzeptanz“ entstanden, welches vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* (BMWi) und vom *Projektträger Jülich* (PTJ) finanziert wird. Darüber hinaus ist das Institut für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover Teil des Zentrums für Windenergieforschung *ForWind*.

Literatur

[1] Ingard, U.: A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation. The Journal of the Acoustical Society of America 25 (1953), 405-411

[2] Salomons, E.M.: Computational Atmospheric Acousics. Springer Science+Business Media Verlag, Dordrecht, 2001

[3] West, M., Gilbert, K., Sack, R.A.: A Tutorial on the Parabolic Equaion (PE) Model Used for Long Range Sound Propagaion in the Atmosphere. Applied Acoustics 37 (1992), 31-49