

Infraschall aus physikalischer, biologischer und medizinischer Sicht

Prof Dr. Thomas J. Feuerstein

Physikalische Aspekte:

Wellen sind sich wiederholende Schwingungen. Ton und Klang bestehen aus periodischen Schwingungen, Geräusch und Knall aus nicht-periodischen („Periode“: s.u.). Letztere ändern sich zusätzlich in ihren Ausschlägen („Amplituden“, „Schalldruckverlauf“: s.u.) im Zeitverlauf. Beim einzelnen Knall nimmt die Amplitude mit der Zeit ab, beim Geräusch nicht. Infraschall (definiert als Schallfrequenz < 20 Hz; „Hz“: s.u.) entspricht einem Knall, wenn er pulsierend auftritt; Infraschall aus Windkraftanlagen pulsiert typischerweise (wenn das Rotorblatt am Betonmast vorbeistreicht, wird die Luft dazwischen komprimiert). Ansonsten ist Infraschall meistens ein Geräusch.

Eine Periode hat - physikalisch - mit einer gleichförmigen Kreisbewegung zu tun. Wenn eine solche in ihrem zeitlichen Verlauf nach oben und unten aufgezeichnet wird, entstehen Sinusschwingungen; sie kennzeichnen Töne. Ein Klang besteht aus mehreren unterschiedlichen Sinusschwingungen mit Einzelfrequenzen in ganzzahligem Verhältnis.

Sinusförmige Verdichtungen und Verdünnungen der Luftmoleküle repräsentieren den Schalldruckverlauf eines Tons: Diese Druckwelle, also kleine Zunahmen und Abnahmen des Luftdrucks, repräsentiert eine longitudinale Welle, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Zu- und Abnahmen des Luftdrucks werden durch empfindliche Messgeräte, wie Mikrobarometer, quantifiziert.

Bei Longitudinalwellen breiten sich Verdichtungen und Verdünnungen in Längsrichtung, bei einer Transversalwelle hingegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aus. Eine Transversalwelle hat demnach Wellenberge und Wellentäler.

Wenn die Luftdruckschwankungen einer longitudinalen Schallwelle senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung - räumlich oder zeitlich - aufgetragen werden, entsteht das Bild einer Transversalwelle, wobei der Charakter der Longitudinalwelle jedoch erhalten bleibt. Die Wellenlänge λ ist der räumliche Abstand einer einzelnen Schwingung bis zu ihrer Wiederholung.

Eine einzelne Schwingung der Länge λ braucht die Schwingungszeit T , bis sie sich innerhalb der Welle wiederholt. Wenn $T = 1$ Sekunde dauert, ist Frequenz der Welle $\nu = 1$ Hz. Aus dem Quotienten Geschwindigkeit = Weg / Zeit ergibt sich die Wellengeschwindigkeit $c = \lambda/T$. Die Wellengeschwindigkeit des Schalls, c_{Schall} , beträgt 340 m/s; bei einer (nicht hörbaren) Frequenz von $\nu = 1$ Hz beträgt die Wellenlänge des Schalls also 340 m. Bei der (hörbaren) Frequenz von $\nu = 1.000$ Hz ist $\lambda = 34$ cm; bei einer (nicht hörbaren) Frequenz von $\nu = 20.000$ Hz beträgt $\lambda = 1.7$ cm.

Jeder Klang und jedes Geräusch kann in einfache sinusförmige Schwingungen zerlegt werden (Fourier-Analyse, Fourier-Transformation); die hieraus errechnete Komponente mit der höchsten Amplitude ist die wesentliche Geräusch-Frequenz.

Lauter Schallphänomene haben hohe Amplituden, leise niedrige (zum Lautstärke-Maß „dB“ und seiner Frequenz-Abhängigkeit: s.u.). Hohe (grelle) Schallphänomene weisen hohe Frequenzen auf, niedrige (dumpfe) niedrige. Eine Sopranistin singt also in höheren Frequenzen als ein Bass.

Bewegt sich ein Wellenerreger zu einem Beobachter hin, so stellt dieser eine höhere Frequenz, also eine Abnahme/Zunahme der Wellenlänge, fest (Doppler-Effekt). Bei einer Weg-Bewegung gilt das Gegenteil.

Schallwellen übertragen Energie: Energieübertragung pro Zeit heißt Leistung (P); ihre Einheit ist das Watt [W] = $[\text{kg} * \text{m}^2 * \text{s}^{-3}]$. Leistung (P) pro Fläche (A) heißt Leistungsdichte; sie nimmt bei kugelför-

miger Ausbreitung auf der Oberfläche mit dem Quadrat des Kugelradius (r^2) ab. Die Schallintensität oder Schallstärke I ist die mittlere Leistungsdichte (P/A) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Einheit: $[W/m^2]$).

Der Schalldruck wird als Kraft [Newton] pro Fläche gemessen, Einheit $[N/m^2]$ oder Pascal $[1 Pa] = [1 N/m^2]$.

Die Hörschwelle des menschlichen Ohrs liegt bei $I_0 = 10^{-12} [W/m^2]$; seine Schmerzschwelle bei $I_{max} = 1 [W/m^2]$. Der Abstand zwischen I_0 und I_{max} beträgt also 12 Lg-Einheiten (Lg: Logarithmus zur Basis 10).

Die entsprechende psychoakustische Hörschwelle HS wurde bei 1.000 Hz definiert: $HS = 10 [dB] * Lg 1 = 0 [dB]$, wobei dB für Dezibel steht; die Schmerzschwelle ist entsprechend $SS = 10 [dB] * Lg 1/10^{-12} = 120 [dB]$. Diese psychoakustischen Maße HS und SS sind keine physikalischen Maße.

Die entsprechenden Schalldrücke sind $10^{-4.5} Pa$ für I_0 ($\rightarrow HS$) und $30 Pa$ für I_{max} ($\rightarrow SS$). Der Abstand zwischen I_0 und I_{max} beträgt hier 6 Lg-Einheiten.

Eine Verdopplung des Schalldrucks entspricht einem 6-dB-Anstieg und eine Zunahme um 10 dB entspricht ungefähr einer Verdreifachung des Schalldrucks.

Schalldruck-Änderungen sind im Vergleich zum Atmosphärendruck von 101 kPa sehr klein.

Die größte Hörempfindlichkeit des menschlichen Ohrs liegt zwischen 800 und 7.000 Hz. In diesem Bereich spiegeln dB-Pegel die tatsächliche Energieübertragung durch Schallwellen realistisch wider. Bei 10 Hz unterschätzt der dB-Pegel die Energieübertragung jedoch um 70 dB, bei 20 Hz noch um 50 dB. 50 dB entsprechen dabei einem Faktor von 100.000 zwischen in dB gemessener und tatsächlicher Energieübertragung. dB-Pegel sind zur physikalischen Abschätzung von Infraschall-Wirkungen ungeeignet.

Resonanz entsteht, wenn ein Gegenstand von außen, z.B. durch Schallwellen, in seiner Eigenfrequenz zum Schwingen angeregt wird. Wenn diese Schwingungsenergie nicht durch Dämpfungseffekte abgeführt wird, kann eine Resonanzkatastrophe, d.h. eine Zerstörung des beschallten Gegenstands resultieren. Es gibt meist mehrere Resonanzfrequenzen eines Systems. Dies stehen im ganzzahligen Verhältnis zueinander.

Bewertung – Evidenzgrade:

Beobachtete Effekte werden gemäß ihrer Glaubwürdigkeit Evidenzgraden zugeordnet. Dabei rangieren kontrollierte Studien am höchsten; unkontrollierte Mehrfach-Beobachtungen liegen in der Mitte; subjektive Einzelhinweise haben den niedrigsten Evidenzgrad.

Wenn sich also aus einer kontrollierten Studie (Bahtiarian und Baudry 2015) ergab, dass Windturbinen unhörbare Emissionen erzeugen, die in das analysierte Wohnhaus drangen (Messung mit Mikrobarometern), hatte diese Aussage eine hohe Evidenz.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2004 stellte im Rahmen ihrer seismologischen Überwachungen beispielsweise fest, dass Emissionen von Windkraftanlagen im Infraschallbereich für die Registrierung der Mikrodruck-Variationen ein zunehmend problematisch sind: Dadurch werde die Überwachung der Einhaltung des Atomwaffenteststoppabkommens gestört. Diese Aussage hatte eine mittlere Evidenz (keine kontrollierte Studie, jedoch Mehrfachbeobachtungen, die zudem durch Messungen untermauert wurden).

Biologische Effekte:

Die Schallabsorption (Dämpfung) des Infraschalls durch Mauern, Türen, Fenster, Hügel oder Berge ist gering: Tieffrequente Schallwellen werden von der Umgebung weniger gedämpft als hochfrequente. Elefanten können dementsprechend mittels Infraschall über viele Kilometer kommunizieren.

Der Windkraftanlagen-bedingte Infraschall stört die Kommunikation der Bienen untereinander und somit ihre Orientierung im Gelände zur Futtersuche. Da eine Tanzbiene im Bienenstock zur Informationsübermittlung ihren Hinterleib mit einer Frequenz von etwa 15 Hz hin und her schwingt, sind hier Resonanzphänomene mit Infraschall von 15 Hz höchst wahrscheinlich.

Einzelbeobachtungen, wie z.B. auffälliges Verhalten von Nerzen nach Inbetriebnahme einer nah gelegenen Windkraftanlage, entsprechende Verlängerung der Tragezeiten von Rindern und nachfolgende Missbildungen der Kälber, abnormes Verhalten von Hütehunden und Weidetieren und viele andere Hinweise sollten in kontrollierten Studien bestätigt (oder verworfen) werden.

Medizinische Effekte:

Im medizinischen Bereich sind es v.a. Allgemein-Symptome (Müdigkeit, Benommenheit, Apathie, Depressionen, Konzentrationseinbußen, ...), deren vermutete Verursachung durch Infraschall aus Windkraftanlagen durch kontrollierte klinische Studien belegt werden muss, so begründet die Vermutung auch sein mag. Grund hierfür ist, dass solche Allgemein-Symptome vielfältige Ursachen haben können.

Kontrollierte Infraschall-Applikation auf Gehirne von Probanden (Studie aus 2017) erhöhte lokal die neuronale Aktivität ohne einhergehende subjektive Wahrnehmungen. Der hierbei betroffene obere Temporallappen-Gyrus rechts steht für die sekundäre Hörverarbeitung, der vordere cinguläre Cortex für die häufig depressive Verarbeitung von Konfliktsituationen; die rechte Amygdala ist als „Angstzentrum“ u.a. für die Stress- und Emotionsverarbeitung zuständig.

In einer ebenfalls kontrollierten Studie in der Herzchirurgie in Mainz (Studie aus 2018) reduzierte sich die Kontraktionskraft von isolierten Herzmuskelpräparate um bis zu 20 % – abhängig von Frequenz und Schalldruckamplitude des applizierten Infraschalls. Dieses Ergebnis wurde in einem Rattenmodell *in vivo* bestätigt.

Der lautlose Infraschalls wirkte darüber hinaus wie ein arrhythmogener Störsender für das Herz.

Die gesundheitlichen Risiken durch Infraschall aus Windkraftanlagen werden aktuell in ihrer Schwere und ihrer epidemiologischen Bedeutung erheblich unterbewertet. Die teils schweren Erkrankungen und ihre Symptome reichen von hochgradigen Schlafstörungen mit organischen Folgeerkrankungen, über Störungen des Gleichgewichtsorgans, langfristige Störungen der Hörphysiologie, eine Zunahme von Angst-Störungen bis hin zu einer Schwächung von Herzmuskelzellen. Die Zahl der bekannten Erkrankten ist höchstwahrscheinlich nur die Spitze des Eisbergs.