

Gesundheitliche Relevanz aerodynamischer Emissionen von Windenergieanlagen

Eine interdisziplinäre Bewertung

Autor: Dr. med. Stephan Kaula

Facharzt für Allgemeinmedizin

Langjährige ärztliche Erfahrung im Bereich Umweltmedizin / Lärmwirkung / Patientenbetreuung im ländlichen Raum

Aktiv in der medizinisch-wissenschaftlichen Aufarbeitung der gesundheitlichen Folgen technogener Emissionen insbes. Windenergie

in Zusammenarbeit mit deutschen und internationalen Wissenschaftlern

Stand: Mai 2025

Abstrakt: Windenergieanlagen erzeugen neben Schall im Sinne der Akustik vor allem aerodynamische Emissionen wie strukturierte Druckpulse, Wirbel und Turmschwingungen, die energetisch dominierend sind. Diese Phänomene beruhen auf physikalisch gesicherten Mechanismen und erklären medizinisch-physiologisch schlüssig die klinischen Beobachtungen und Betroffenenberichte. Das gegenwärtige Regelwerk, das sich ausschließlich auf akustische Parameter stützt, greift zu kurz. Eine Erweiterung der Emissionsbewertung und dringende Schutzmaßnahmen erscheinen aus dem Vorsorgeprinzip heraus erforderlich.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Windrad-Emissionen und „Infraschall“	1
2. Schall und Infraschall - physikalische Grundlagen	2
2.1 Unterscheidung zwischen Schall und (strömungsbedingten) Nicht-Schall Druckphänomenen	3
3. Was hinter dem Windrad passiert	5
3.1 Das Nachlauffeld	5
3.2 Einteilung des Nachlauffeldes	7
4. Der Rotorblatt-Turm-Durchgang (RTD) / Der zentrale Taktgeber	10
4.1 Dominanzbereiche der verschiedenen Energiekomponenten des RTD /Wind-Druckpulse in ihrer Einwirkung auf die Anwohner	12
4.2 Wie die Wind-Druckpulse die Anwohner erreichen	14
4.3 „Bauchtanz“ des Turms / Körperschall	15
5. Evidenz und wissenschaftliche Wertigkeit	15
6. Schlussfolgerung	16

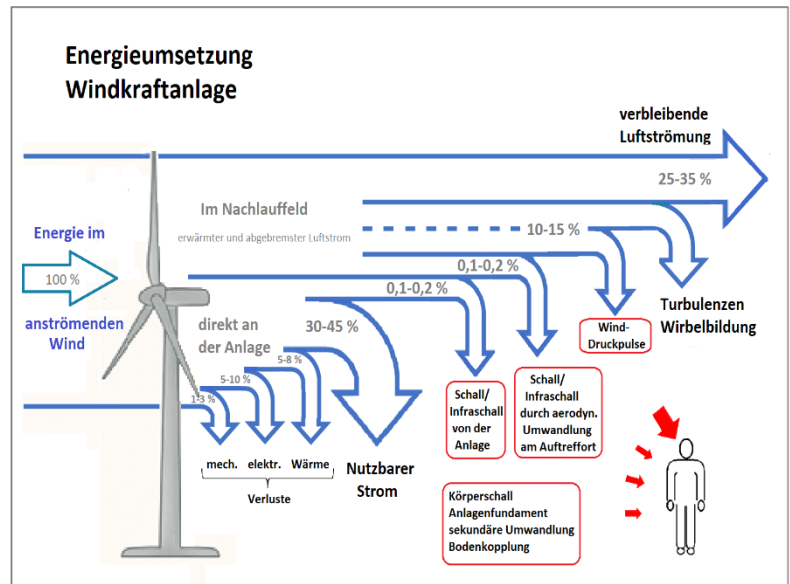
1. Windrad-Emissionen und „Infraschall“

Vorwort

Die Physik von Windrädern wird energetisch von der Strömung großer Luftmassen dominiert. Daher sollte es nicht verwundern, wenn gerade die direkten Einwirkungen dieser aerodynamischen Emissionen Anwohner belasten und gesundheitliche Beeinträchtigungen verursachen können.

Die Untersuchung dieser Luftströmungen wird von der Windindustrie sogar intensiv betrieben, da sie für die Stromertragssituation und statische Stabilität dieser High-Tech-Anlagen wichtig ist. Selbst wenn sie also wissenschaftlich hinreichend bekannt und untersucht sind, wurden und werden diese Art von Windrad-Emissionen im Rahmen des Emissionsschutzes weder behandelt noch deren Auswirkungen auf Anwohner untersucht, obwohl dies völlig naheliegend ist. Im Rahmen des Emissionsschutzes beschränkte man sich bei Windenergieanlagen dagegen nur auf den deutlich weniger energetischen akustischen Schall bzw. „Infraschall“. (Das trifft prinzipiell auch auf große Ventilatoren zu.)

Dabei ist das Umweltbundesamt sogar verpflichtet, präventiv tätig zu werden, insbesondere sobald hinreichende Anhaltspunkte für eine schädliche Umweltbelastung vorliegen, selbst wenn noch wissenschaftliche Unsicherheiten bestehen (§ 5 BImSchG, Art. 191 AEUV). Hinreichende Anhaltspunkte für eine die Gesundheit belastende Wirkung auf Anwohner von Windenergieanlagen gab es mehr als genug. Dabei muss hier insbesondere auf die Ergebnisse der breiten Fall-Studie aus Dänemark ([Link](#)) hingewiesen werden, in der Auffälligkeiten wie u.a. ein deutlich erhöhter Verbrauch von Schlafmitteln und Antidepressiva festgestellt wurde. Diese Ergebnisse wären vermutlich noch deutlicher ausgefallen, hätte man die Windrichtung und Entfernungen berücksichtigt (siehe oben).



Diese aerodynamischen Vorgänge und ihre Einwirkungen auf die Anwohner von Windenergieanlagen lassen sich nicht durch akustische Normen wie die TA-Lärm erfassen und abhandeln, da es sich um strömungsmechanische (nicht akustische) Phänomene handelt, die anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen als Schall und Infraschall im engen akustischen Sinne. Die strömungsmechanischen tieffrequenten Phänomene können zudem mit Schall leicht verwechselt oder missinterpretiert werden, und das führt zu einer erheblichen Unterbewertung der beteiligten Energien dieser Emissionen, ihrer Reichweite und möglichen gesundheitlichen Folgen.

Die ausschließliche Interpretation tieffrequenter Druckphänomene von Windkraftanlagen als bloße akustische Schallemission, nämlich "Windrad-Infraschall", ist ein grober physikalischer Fehler.

Der Versuch, diese Emissionen in entsprechenden akustischen Regelwerken abzuhandeln, führt zu einer gravierenden Unterbewertung und Unterschlagung der wesentlichen realen Belastungen für Anwohner.

2. Schall und Infraschall

Der Begriff **Schall** hat bereits unterschiedliche Definitionen. So wurde er historisch auf den Bereich der Hörbarkeit beschränkt. Aber auch hörbare Ereignisse wie ein Knall werden in manchen Definitionen nicht dem Schall im engeren Sinne (als harmonischer) Schall zugeordnet.

Der Begriff **Infraschall** ist dabei aber ein besonders unglücklich gewählter Oberbegriff, unter den undifferenziert alles Tieffrequente und deshalb Unhörbare zusammengefasst wird, unabhängig davon, ob es sich tatsächlich um Schall handelt. So werden darunter oft auch periodische Luftbewegungen mit Frequenzen unter 20 Hz oder sehr langen Wellenlängen subsumiert, die streng genommen **kein akustischer Schall** sind. Beispielsweise ist ein pulsierender Wind (u.a. verursacht durch die Taktung des Windstroms durch die Rotorblätter) keinesfalls eine Schallwelle, übt aber dennoch einen niederfrequenten, periodischen Druck auf Objekte (Menschen, Tiere oder Messgeräte wie Mikrobarometer oder Mikrofone) aus.

Das Problem: Mikrobarometer und Mikrofone können ohne weiteres nicht zwischen **Schalldruck** und **Strömungsdruck (Staudruck)** unterscheiden. Solche Messprotokolle sind damit Quellen für Fehlinterpretationen. Unabhängig davon ist es wichtig, wo man misst. Gerade der vom Rotor eines Windrades erzeugte gepulste Wind bewegt sich streng mitwindig im sog. Nachlaufeld der Anlagen, das erst in einiger Entfernung von mehreren hundert

Metern und ggf. auch Kilometern auf den Boden trifft. Bei sogenannten „Infraschall-Messungen“ z.B. durch die LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) hat man die Microbarometer bei der Messung in Anlagennähe halb in den Boden eingegraben und vor Windböen abgeschirmt. ([Link](#)) Bodennah kommt es zu starken Turbulenzen und das Hintergrundrauschen ist damit sehr hoch. Hier misst man möglicherweise akustischen Infraschall, der auch von den Anlagen ausgeht. Die wichtigen aerodynamisch bedingten Wind-Druckpulse werden jedoch übersehen, denn sie sind in der Höhe und im Wind zu erwarten.

Messstationen zur Überwachung von Atomwaffentests wie IGADe sollen die extrem langwelligen Detonationswellen von Atombombenexplosionen messen und werden deshalb oft als „Infraschall-Messstationen“ bezeichnet. Sie registrieren zwar auch Infraschall, doch die eigentliche Druckwelle einer Atomexplosion ist zumindest ursprünglich **keine Schallwelle**.

Diese begrifflichen Unschärfen und Fehlinterpretationen des Begriffs „Infraschall“ führen zu folgenreichen Missverständnissen zum Nachteil des Emissionsschutzes für Anwohner.

2.1 Unterscheidung zwischen Schall und (strömungsbedingten) Nicht-Schall Druckphänomenen

Schall (harmonischer Schall)

Beim üblichen Schall (*harmonischer Schall*) regt eine Quelle die Luft zu **elastischen Schwingungen** an. Diese Schwingung breitet sich wellenförmig aus, ohne dass die Luft als Ganzes strömt. Die Teilchen bewegen sich nur kurz um ihre Ruhelage hin und her.

Beispiel: Eine schwingende Gitarrensaite stößt die umgebenden Luftmoleküle an, die die Bewegung an benachbarte Teilchen weitergeben. Bei der Rückkehr der Saite werden die ersten Luftteilchen wieder „zurückgezogen“ und der Vorgang beginnt erneut. Dieser **periodische Vorgang** erzeugt eine Schallwelle mit konstanter Wellenlänge (einen Ton), die sich mit **Schallgeschwindigkeit** ausbreitet. Mehrere Töne bilden einen Klang.

Historische Definition:

Früher wurde Schall oft auf den **hörbaren**

Frequenzbereich (ca. 20 Hz bis 20 kHz) beschränkt.

Daher bezieht sich die dimensionslose Maßeinheit **Dezibel (dB)** auf die menschliche Wahrnehmung und ist **keine absolute physikalische Einheit**.

Dezibel misst den *logarithmischen Pegel* einer Größe (z. B. Schalldruck)

relativ zu einem Referenzwert. Eine Umrechnung in physikalische Einheiten (sog. SI-Einheit wie Pascal) erfordert daher zusätzliche Angaben und Annahmen.

Tabelle 1. Schematisierte Übersicht der Unterschiede zwischen Schall und anderen Druckstörungen					
	Klassischer Schall	Grenzfall	kein Schall		
	Harmonischer Schall	Knallereignis	Explosion (Nahfeld)	Implosion (Nahfeld)	Wind-Druckpuls
Was bewegt sich?	Schallwelle	Druckwelle	Luft + Druckwelle	Luft + Druckwelle	Luft
Ausbreitungs-Geschwindigkeit	Schall-Geschwindigkeit	Schall-Geschwindigkeit	Schall-Geschwindigkeit teils darüber	Schall-Geschwindigkeit	Wind-Geschwindigkeit
Physik/Messeinheit	Akustik dB	Akustik dB Zuschläge für Impulshaltigkeit	Strömungsdynamik SI-Einheiten	Strömungsdynamik SI-Einheiten	Strömungsdynamik SI-Einheiten
Spektrum	definiert	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich
Bodenkopplung			Abstoßung	Anziehung	

„Infraschall-Skandal“, BGR, Holzheu „deckt auf“ und Minister Altmeier muss sich öffentlich entschuldigen

In diesem Zusammenhang sei auf den angeblichen „[Umrechnungsfehler](#)“ der BGR ([Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe](#)) bei der Interpretation ihrer „Infraschall“-Messdaten in Infraschall und der Darstellung in dB-Einheiten hingewiesen. Die BGR misst Druckpulse in sog. SI-Einheiten und keinen Schall in der dimensionslosen Einheit dB. Die Grundvoraussetzung für eine solche „Umrechnung“ in die Schallmesseinheit dB ist neben weiteren Annahmen, dass es sich überhaupt um Schall im akustischen Sinne handelt. Letzteres ist allerdings sehr fraglich, denn es könnte sich genauso um aerodynamisch bedingte Wind-Druckpulse handeln. Diese sind dort, wo die Anwohner leben, noch gar kein üblicher Schall und dürfen deshalb auch nicht umgerechnet werden. Das trifft

insbesondere auf den Bereich in unmittelbarer Nähe der Anlagen bis in einen Bereich (mitwindig) der Anlagen bis ca. drei Kilometern zu.

Knallereignis

Ein Knall wird physikalisch mal als Schall und mal als Nicht-Schall (weil nicht harmonisch) definiert (Akustik: Physikalische und technische Grundlagen, Springer, 1980). Er nimmt daher eine Zwischenstellung ein. Hier stößt die Quelle die Luft **nur einmalig** an, sodass **keine periodische Schwingung** entsteht. Daher hat ein Knall, ähnlich wie ein „Geräusch“, **keine klar definierte Wellenlänge** (im Gegensatz zu harmonischem Schall). Stattdessen besitzt der Knall ein **kontinuierliches Frequenzspektrum**, also Anteile über einen breiten Frequenzbereich mit einem Maximum. Je nach Zusammensetzung kann ein Knall hell, dumpf oder sogar unhörbar sein. Seine Druckwelle breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus. In der Akustik werden Knallereignissen wegen ihrer **Impulshaltigkeit** als stärker störend bewertet als gleichlauter harmonischer Schall, besonders wenn sich der Knall wiederholt. Die Drucksignatur von Windenergieanlagen entspricht einem sich periodisch wiederholendem Knallereignis im Infraschallbereich, das durch die Rotorblattdurchgangsfrequenz getaktet ist (siehe Abschnitt unten: Rotorblatt-Turmdurchgang). Hier wird die besondere Charakteristik nicht berücksichtigt.

Detonation

Detonationen sind **kein Schall**. Sie entstehen durch eine **plötzliche, explosive Volumenzunahme**. Bei einer Explosion verdampft Material schlagartig, und das expandierende Gas erzeugt eine **Stoßwelle**, die anfangs **überschallschnell** ist. Mit zunehmender Entfernung verlangsamt sie sich auf Schallgeschwindigkeit und damit wird die Explosion zu einem Knall-Ereignis.

Implosion

funktioniert umgekehrt und ist eine **plötzliche Volumenabnahme**. Auch hier ändert sich also das Volumen, aber die Druckwelle breitet sich von Anfang an nur mit Schallgeschwindigkeit aus. Da der Volumentransport mit der Entfernung schneller abnimmt als die Druckamplitude, wird auch eine Implosion in einiger Distanz zu einem Knallereignis.

Wind-Druckpulse bzw. pulsierender Wind

Wind ist **kein Schall**, sondern ein **Luftstrom, der sich mit Windgeschwindigkeit** vorwärtsbewegt. An der Front einer sich bewegenden Luftzelle bildet sich beim Auftreffen auf ein Hindernis (oder langsameren Wind) eine Druckfront mit einem **Wind-Druckpuls** aus. (Windgeräusche entstehen durch **Wirbel** an Grenzschichten von Luftzellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Diese Turbulenzen können Schwingungen anregen, die als Rauschen oder Pfeifen hörbar werden.)

Wichtig für das Verständnis: Diese **Wind-Druckpulse** erzeugen erst bei ihrem Auftreffen auf ein Hindernis oder langsamere Luftzellen einen Winddruck oder Staudruck. Auf diese so entstandene Druckfront folgt anders als bei Schall, ein Volumen von nachfließender Luft. Die Energie der Wind-Druckpulse bestimmt sich also primär von der kinetischen Energie der nachschiebenden Luftzelle und nur untergeordnet von den Druckveränderung durch das rein elastische Nachschwingen der Luftmoleküle wie beim Schall. Ein gemessener Staudruck eines pulsierenden Windes mag in einem Messgerät also genauso hoch sein, wie der Schalldruck einer Schallwelle, doch seine Energie ist (um den Faktor 100 bis 1000-fach) höher und damit auch seine potentielle Wirkung!

Bildhaft könnte man das mit vom Sturm an eine Steilküste gepeitschten Brecher (Wind-Druckpulse) gegenüber einer sich nur auf und ab schwappenden Welle vergleichen (akustischer Infraschall).

Fallstricke der Fourier-Analyse

Fourier-Transformationen werden routinemäßig auf Druck-/Zeitdaten (z. B. von Mikrobarometern) angewandt, sind aber nur für harmonischen Schall oder Geräusche sinnvoll, die teilweise aus harmonischem Schall zusammengesetzt sind. So kann die Identifizierung eines seltsamen Tons in einer Maschine beispielsweise auf die Vibration eines defekten Teils hinweisen und dieses isolieren helfen. Die Anwendung der Fourier-Analyse auf impulsartige Signale (mit kontinuierlichen Spektren) ist jedoch unsinnig. Periodisch wiederkehrende impulsive Geräusche ergeben jedoch mathematisch gesehen harmonische Frequenzen in Fourier-Reihen, die aber keine Entsprechung in der realen Welt haben (z. B. schwingende Bauteile). Dabei sind hohe und viele Harmonische wie sie im Windradsignal auch noch in großen Entfernungen nachzuweisen sind, gerade Ausdruck der starken Abweichung gegenüber einer (harmonischen)

Infraschallwelle. Die Fourier-Analyse kann also zwar helfen, die Signaturen von Windenergieanlagen inmitten von Lärm zu erkennen, aber sie ist keinesfalls Beleg dafür, dass es sich um rein akustische Phänomene handelt.

3. Was hinter dem Windrad passiert

Vorbemerkung

Stellen Sie sich vor, Sie stehen hinter einem Windrad und beobachten, wie sich die Rotorblätter drehen – ähnlich wie ein Propeller, der immer wieder kurz die Sonne verdeckt. Genau wie dieser „Flutter-Licht- und Schatteneffekt“ entsteht hinter dem Windrad ein flatternder Windschatten: Das Rotorblatt schiebt sich vor den Wind, sodass die Luftströmung direkt dahinter abrupt abbricht und baut sich nach dem Vorbeiziehen des Blatts wieder auf. Diese so entstandene „Windschatten-Lücke“ im anströmenden Wind erzeugt einen schlagartigen Winddruckabfall, gefolgt von einem raschen Wiederanstieg. Das ist im Prinzip eine Implosion (siehe auch Rotorblatt/Turmdurchgang). Wenn man nahe einem vorbeifahrenden Zug steht, dann spürt man eine vergleichbare Druckwelle.

Dabei funktionieren die Rotorblätter wie ein Flugzeugflügel: Durch ihre gekrümmte Form entsteht auf ihrer Rückseite (Flugzeugflügel-Oberseite) ein Unterdruck und auf der Vorderseite (Flugzeugflügel-Unterseite) ein Überdruck. Diese Druckdifferenz treibt das Windrad an.

Wichtig: Diese Wind-Druckpulse werden in das Nachstromfeld gerichtet und gelangen nur mit diesem zum Boden. Sie würden also nicht direkt unter den Turbinen gemessen werden (die Messung in der unmittelbaren Nähe der Turbine sind die Auswirkungen des Rotorblatt-Turm-Durchgangs, siehe Abschnitt weiter unten). Die Wind-Druckpulse sind pulsierender Wind und ausdrücklich kein Schall!

Barotrauma von Fledermäusen

In der Nähe der Rotorblattspitzen wirbeln die Druckunterschiede am stärksten (ähnlich wie bei einem Wirbelsturm). Hier kollabiert der Druck besonders abrupt, ein Effekt, der für Fledermäuse tödlich sein kann: Ihre Lungen halten dem schnellen Wechsel von Unter- und Überdruck nicht stand und reißen (*Barotrauma*). Die Fledermäuse sterben also nicht an „Infraschall“ (im akustischen Sinne). Genauso ist die wesentliche gesundheitsgefährdende Windrademission für Windenergieanlagen-Anwohner auch kein akustischer Infraschall !

3.1 Das Nachlauffeld

Wind-Druckpulse und ihre aerodynamischen Korrelate und Entwicklungen im Nachlauffeld von Windenergieanlagen

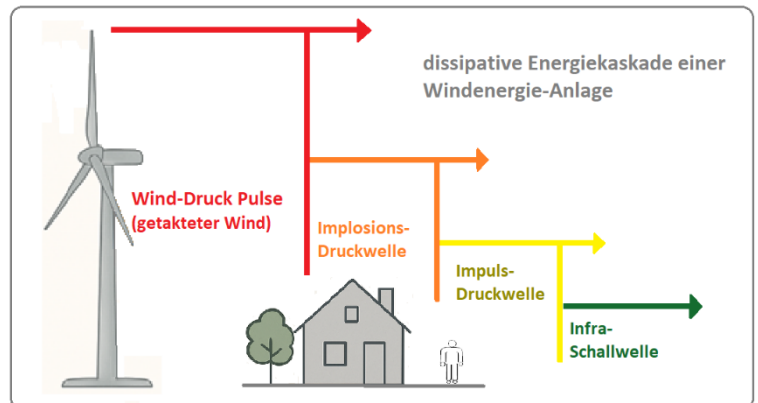
Hinter dem Rotor einer Windenergieanlage bildet sich ein komplex strukturiertes, dynamisches Feld hochgradig bewegter Luftströmungen aus. (Video [Link](#)) Diese entstehen einerseits durch die seitliche Ablenkung des anströmenden Windes infolge der schräg gestellten Rotorblätter, andererseits durch Druckdifferenzen entlang der Rotorblattfläche, welche die Bildung von Wirbeln anregen. Es entstehen entsprechend **vier Formen von Druckstörungen**, die gleichzeitig auch fließend aufeinander folgende Phasen derselben Druckstörung darstellen können.

- a. **Wind-Druckpulse und Wirbelstrukturen**, die sich mit Windgeschwindigkeit ausbreiten
- b. Beim Auftreffen der Wind-Druckpulse auf ein Hindernis entstehen eine Art **weicher Implosions- und folgend Explosions-Druckwellen**, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzen,
- c. diese gehen in Entfernung von der Anlage in stark **impulshaltige akustische Knallwellen (Stoßwellen)** über.

- d. Wenn der Impulsgehalt der Knallwelle (Stoßwelle) mit zunehmender Entfernung abnimmt, beginnt die Schallkomponente die **Infra-Schallwelle** zu dominieren. Erst dann kann sie mit den Mitteln der Akustik adäquat bewertet werden.

Die ersteren beiden sind kein Schall im Sinne der Akustik und wesentlich energiereicher. Diese Entwicklung von einem getakteten Luftstrom in Wirbel, dann eine Implosionsdruckwelle, dann eine impulshaltige Knallwelle, die zunehmend ihre Impulshaltigkeit verliert und schließlich der Übergang in eine reine Schallwelle (die sich letztlich in Wärme umsetzt) folgt einer **dissipativen Energiekaskade**. ([Link](#))

Diese vier Formen von Druckstörungen zeichnen sich durch einen absteigenden Energieinhalt aus und gehen fließend ineinander über. Anwohner werden allen diesen vier Formen ausgesetzt, wobei die bisherigen Emissionsschutz-Richtlinien ausschließlich die energieärmste Form der harmonischen Infraschallwelle betrachtet und bewertet !



a. Winddruck-Pulse mit Windgeschwindigkeit:

Wichtig ist dabei zu beachten, dass nicht nur die Strömung selbst dreidimensional und zeitlich periodisch strukturiert ist, sondern dass auch der Winddruck als Ausdruck einer kohärent bewegten Luftmasse eine Richtungsdimension aufweist und damit mehr als ein statischer Druckwert ist. (D.h. es handelt sich nicht um eine skalare Quantität, sondern um eine vektorielle Eigenschaft mit der Fähigkeit, eine Kraft zu übertragen.)

Erst beim Auftreffen einer solchen energiereichen, periodischen Luftströmungsstruktur auf ein Hindernis (z. B. ein Gebäude oder den Turm der Windenergieanlage) kommt es zu einer wesentlichen Energieübertragung mit mechanischem Potenzial – etwa zur Ablösung von Dachziegeln wie durch Flugzeugschleppwirbel, zum periodischen Durchbiegen von Dachstühlen oder zur Bewegung von Fensterscheiben und Türen in ihren Dichtungen. Auch direkte physiologische Wirkungen insbesondere auf das empfindliche Gleichgewichtsorgan sind anzunehmen, aber auch extra-aurale (nicht durch das Gehör) unterbewusste Wahrnehmungen sind wahrscheinlich.

Ein nicht hörbarer Druckzug von nur 1–2 Pa über 0,5 Sekunden kann **mehr physiologische Wirkung entfalten** als ein 80 dB lautes Geräusch. Und diese Aspekte werden von der TA-Lärm gar nicht adressiert!

b. Druckpulse mit Schallgeschwindigkeit und Volumenfluss

Dabei entsteht – insbesondere an starren, nicht verformbaren Strukturen wie dem Anlagenturm oder einem Haus im Nachlaufeld – eine impulshaltige Druckwelle, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet und die anderen Luft-Strömungsstrukturen durchdringen kann.

c. Impulshaltige akustische Knallwelle

Erst nach Abklingen des energetisch dominierenden Volumen- und Massentransports der Luft – typischerweise erst in > 3 km Entfernung (abhängig von ihrer Direktivität (Abnahme mit $1/r$), der Bodenkopplung und weiteren Faktoren), – wird sich diese Druckwelle, als impulshaltige

d. rein „akustische“ (Infra-) Schallwelle manifestieren.

Warum ist das wichtig?

Die Energie in einem Luftvolumenstrom wird primär von der kinetischen Energie der strömenden Luftmasse dominiert.

Demgegenüber wird die Energie einer harmonischen akustischen Welle durch den Schalldruck bestimmt.

Die aerodynamische Energie der Wind-Druckpulse liegt daher ca. 100 bis 1000-fach höher als die Energie einer harmonischen akustischen Infraschallwelle.

Physikalische Grundlage: Energie im Luftstrom vs. akustische Welle

1. Energie in einem Luftstrom (Volumenfluss)

Ein gerichteter Luftstrom enthält kinetische Energie:

$$E_{\text{Volumenfluss}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2$$

- ρ = Luftdichte ($\sim 1.2 \text{ kg/m}^3$)
- V = Volumen des Luftpakets
- v = Strömungsgeschwindigkeit

2. Energie in einer akustischen Welle (harmonische Druckschwankung)

$$E_{\text{Schall}} = \frac{p^2}{\rho \cdot c}$$

- p = Schalldruckamplitude
- c = Schallgeschwindigkeit ($\sim 343 \text{ m/s}$)

Diese Energie ist **verhältnismäßig klein**, weil:

- der Schalldruck im Infraschallbereich meist unter 1 Pa liegt
- und keine Netto-Volumenverschiebung stattfindet

Zusammengefasst:

- a. Der Rotor erzeugt einen periodisch getakteten und gerichteten Luftstrom.
- b. Beim Aufprall auf ein Hindernis im Nachlauf Feld wandelt sich dieser Strom in eine gerichtete Druckfront um, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet und von einem nachströmenden Luftvolumen begleitet wird.
- c. Erst in größerer Entfernung von der Anlage (mehr als 3 km), wenn das nachströmende Luftvolumen abgeklungen ist, tritt diese Druckfront als impulshaftes, rein akustisches (Knall-) Ereignis in Erscheinung – nun ohne begleitenden Luftmassenstrom.
- d. Mit der Zeit nimmt die Impulshaftigkeit ab, und erst jetzt kann man von üblichem akustischen Infraschall sprechen.

3.2 Einteilung des Nachlauf Feldes

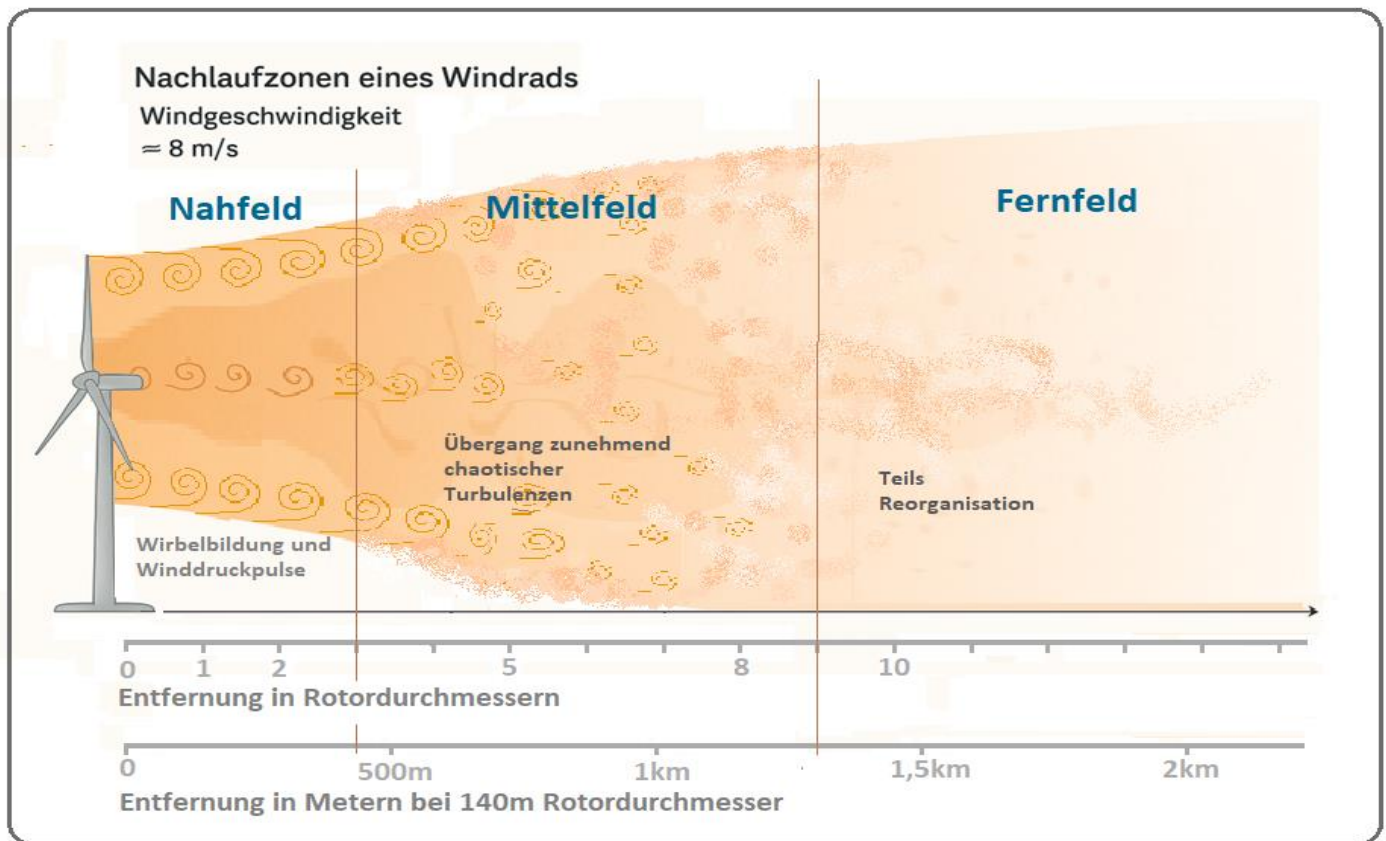
In der Windenergie teilt man das zylindrische Nachlauf-Feld (wake) des Windradrotors in drei Zonen: (Dabei wird der für die „Infraschall“-Emissionen wichtige Rotorblatt-Turmdurchgang hier zunächst nicht mit betrachtet.)

Das Nahfeld (Near Wake)

Das mittlere Feld (Intermediate Wake)

Das Fernfeld (Far Wake)

In welchen Entfernungen dieser fließende Übergang zwischen ihnen stattfindet und auch wo die erzeugten aerodynamischen Pulse und Wirbel zu Boden gehen, hängt neben dem Rotordurchmesser, der Turmhöhe, der Topographie von der Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität und anderen atmosphärischen Parametern ab. Aber es gibt grobe Richtwerte, die allgemein anerkannt sind.



3.2.1 Nahfeld (Near Wake)

Reichweite: ca. 0–2 bis 3 Rotordurchmesser (D) hinter dem Windrad

- Die Rotorblätter erzeugen durch den Staudruck des anströmenden Winds und das sogenannte Auftriebsprofil (ähnlich einem Flugzeugflügel) erhebliche Druckunterschiede zwischen der windzugewandten und -abgewandten Seite. Diese können bereits bei 8 m/s Windgeschwindigkeit etwa 100 Pa betragen.
- Diese Druckunterschiede werden mit dem Wind stromabwärts getragen und gehen mit dynamischen Luftströmungen einher, die durch seitliche Ablenkung stark strukturierte und geordnete Wirbelmuster ausbilden:

A. Flügelspitzenwirbel:

An den Rotorblattspitzen entstehen drei riesige ineinander liegende Luftspiralen, die sich wie Korkenzieher von jedem Rotorblatt mit dem Wind nach hinten drehen. ([Link](#)) Diese Wirbel „zäunen“ den großen Rotorwindschatten ein und stabilisieren ihn, ähnlich wie eine Art Deich, der das Nachlaufeld vom nicht gebremsten Wind außerhalb trennt. Flügelspitzenwirbel sind vor allem aus der Luftfahrt als erhebliches Gefährdungsrisiko für Flugzeuge bekannt, die einer größeren Maschine folgen. Die Flügelspitzenwirbel von startenden Maschinen können hunderte Meter nach unten wandern und dort noch Dachziegel abdecken. Die erreichten Geschwindigkeiten von Windradrotorblättern gegenüber der Luft, ihre Dimensionen und das Aufwindprofil sind mit den Flugzeugflügeln großer Flugzeuge völlig vergleichbar. Deshalb müssen auch Sicherheitsabstände von Windparks zu Flughäfen eingehalten werden (aber nicht zur Wohnbebauung?).

B. Der zentrale Wirbel:

Durch das Kreisen des Rotors bildet sich um den Windschatten der Gondel als Zentrum ein zentraler Wirbel mit horizontaler Achse.

C. Hinterkantenwirbel:

Ein zusätzlicher „Wirbelwind“ erscheint an den Hinterkanten der Rotorblätter, der sich ebenfalls spiralförmig innerhalb des zylindrischen Nachlaufeldes mitwindig fortsetzt und in den Flügelspitzenwirbeln mündet.

3.2.2 Mittleres Nachlaufeld (Intermediate Wake)

Im mittleren Nachlaufeld der Anlagen zerfallen die Wirbel in immer kleinere Wirbel. Ihre zuvor geordnete Struktur wird chaotischer und turbulenter. Alle Wirbelbereiche spiegeln jedoch immer noch die Grundfrequenz des Rotorblattdurchgangs wieder, doch nicht unbedingt die des Durchgangs am Turm, sondern räumlich geordnet immer mehr zeitversetzt (phasenverschoben). Es herrscht also immer noch eine Ordnung im Chaos. (Video [Link](#)) Diese Information der energetisch dominierenden **aerodynamischen Wind-Druckpulse** bleibt also erhalten und pflanzt sich weiter fort, bis sie auf ein Hindernis wie z.B. ein Hausdach treffen. Hier kommt es dann zu sekundären Energieumsetzungen in Deformation und mechanische Schwingungen, periodischen Druckabfällen mit Luftvolumentransporten und auch stark impulshaltigem Infraschall.

Das Nachlaufeld wird zur Quelle sekundärer Druckstörungen.

Damit wird, fern von der Anlage, das ganze Nachlaufeld eines Windparks selbst zu einer Quelle tieffrequenter Druckpulse und auch Infraschall, in dessen Mitte Anwohner leben müssen! Die Annahme der Behörden, das Windrad sei die einzige und gar nur punktförmige Quelle der „Infraschall“-Emission, ist damit nicht haltbar. [Link](#)

Reichweite: ca. 3–8 (bis 10) D

- Das Nachlaufeld neigt sich durch die gebremsten, langsameren bodennahen Luftschichten in Richtung Boden und breitet sich dort weiter aus.
- Als negative Druckstörungen werden die Wind-Druckpulse schneller als die chaotischen Turbulenzen in die bodennahen Luftschichten gezogen.
- Die Wirbel beginnen, sich gegenseitig zu überlagern und zu verschmelzen.
- Die schallschnellen Druckpulse durchdringen weiterhin die aerodynamischen Strukturen.
- Kohärente geordnete Wirbelstrukturen gehen allmählich in chaotischere, turbulente Muster über.
- Der Nachlauf beginnt sich sowohl seitlich (lateral) als auch vertikal auszubreiten.
- Der Kernbereich des Nachlaufs bleibt in dieser Phase noch erkennbar.
- Es kommt zur Bildung sekundärer Geräusche und zur Entwicklung niederfrequenter Druckpulse durch die Desintegration von Schleppwirbeln an Hindernissen.
- In dieser Phase entstehen akustische Charakteristika, die vor allem im tieffrequenten Bereich relevant sind, z. B. Amplitudenmodulationen durch instabile Wirbelstrukturen.
- In Windparks überlagern sich die Nachläufe mehrerer Anlagen zu einem **breiten Nachlaufteppich**, der große Bodenflächen betrifft. Diese kollektive Strömungsstruktur kann sich in der Fläche kilometerweit ausdehnen und beeinflusst die lokale Windverteilung, Turbulenzintensität und die akustische Emission deutlich.

3.2.3. Fernfeld (Far Wake)

Im Fernfeld haben sich die energetisch dominanten Volumenflüsse weitgehend abgebaut und damit dominiert die Impulshaftigkeit der Druckpulse, die die Luftströmungen und Wirbel ungehindert durchdringen. Der Druckpuls, der beim Rotorblatt-Turmdurchgang entsteht, hat sich als dominanter Druckpuls durchgesetzt. Die Impulshaftigkeit nimmt dann als letzte höherenergetische Komponente soweit ab, sodass die akustische Infraschallkomponente überwiegt. Die tieffrequente Energiesignatur des Windrads kann jedenfalls noch in über **30-50 km Entfernung** als Windradinfraschall gemessen werden.

Reichweite: ab ca. 10–15 D; je nach Windbedingungen bis zu 20–50 D

- Die Strömung beginnt sich teilweise zu regenerieren; die Windgeschwindigkeit nimmt wieder zu.
- Die Turbulenz wird diffuser und zufälliger.
- Es kommt auch zu einer Reorganisation der Wirbelstrukturen und der kohärenten Strömungszellen, nachdem sie sich in der turbulenten Zone scheinbar ganz aufgelöst haben. ([Link](#))
- Die schallschnellen Druckpulse gewinnen an akustischer Dominanz, während ihre Impulshaftigkeit allmählich abnimmt. Dennoch durchdringen sie die aerodynamischen Strukturen über mehrere Dutzend Kilometer

hinweg und sind dort noch als impulshaltiger Infraschall von hochsensiblen Messstationen (z. B. IGADe) nachweisbar.

- Das Nachlauf Feld (wake field) hat sich großflächig ausgebreitet.
- In einigen numerischen Simulationen zeigen sich Hinweise auf eine Reorganisation großräumiger Strömungsstrukturen. Siehe Computersimulation [Link](#)

Einfluss der Windgeschwindigkeit:

Bei höheren Windgeschwindigkeiten (als den hier beispielhaft angenommenen ca. 8 m/s) wird im Nahfeld deutlich mehr Energie freigesetzt – die kinetische Energie steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Dadurch entsteht ein energetisch deutlich intensiveres, aber räumlich etwas kürzeres Nahfeld, das schneller in Turbulenz übergeht. Die Wind-Druckpulse und Wind-Druckwellen sind ebenfalls wesentlich energiereicher. Insbesondere die Druckwellen pflanzen sich bei starkem Wind tiefer und weiter in den bodennahen Luftschichten fort und wandeln sich erst in größerer Entfernung in impulsartige, akustisch dominante „Knall“-Wellen um.

4. Der Rotorblatt-Turm-Durchgang (RTD)

Der zentrale Taktgeber

Vorbetrachtung

Wie weiter oben beschrieben, „zerschneiden“ die Rotorblätter periodisch den anströmenden Wind, unterbrechen ihn und geben ihn anschließend wieder frei. Durch die Schrägstellung und das Auftriebsprofil der Rotorblätter – ähnlich einem Flugzeugflügel – entstehen dabei aerodynamisch schnelle Strömungszellen und Wirbel, die diese erheblichen Druckunterschiede geordnet mit dem Wind weitertragen.

Zwei unterschiedliche Transportvehikel negativer Druckstörungen:

4.2 Wind-Druckpulse

Diese Wind-Druckpulse bilden sich kontinuierlich über den Rotorumfang, entstehen aber jeweils an unterschiedlichen Positionen und zu leicht versetzten Zeitpunkten, obwohl sie einem periodischen Rhythmus folgen. Wir bezeichnen diese zugrunde liegenden Druckstörungen als *Wind-Druckpulse*, da ihre erhebliche Energie nicht nur aus dem Druckunterschied, sondern vor allem aus der kinetischen Energie der sich bewegenden Luftmasse stammt.

Physikalisch handelt es sich bei den Wind-Druckpulsen um negative Druckstörungen, also einen relativen Unterdruck mit einer vorderseitigen Druckabfallfront, gefolgt von einer Phase des Sogs und anschließend einer positiven Druckwelle, die den Ursprungszustand der Strömung wiederherstellt. Diese Störung bewegt sich als „pulsierender“ Wind mit etwa der Windgeschwindigkeit (+/-) und verlagert sich überwiegend mitwindig.

Wind-Druckpulse, die sich teils auch zu Wirbeln umformen, sind kohärent und strukturiert, jedoch nicht schallartig – sie „reisen“ mit nur etwa 8–15 m/s, also rund zwei Größenordnungen langsamer als Schall oder Implosionsdruckwellen. Sie können unter Umständen kilometerweit bis in den sogenannten *far wake* bestehen bleiben. Treffen sie auf ein Hindernis, wird ihre Energie in Form von Verformung, sekundären Druckwellen und Schall weitergegeben.

4.3 Implosions-Druckwelle

Trifft ein Wind-Druckpuls auf ein Hindernis – insbesondere auf den Turm beim Durchgang des Rotorblattes direkt vor diesem (Rotorblatt-Turm-Durchgang, RTD) –, entsteht eine Art sanfter Implosion. Dabei löschen sich der positive

Staudruck (in Windrichtung) vor dem Objekt und der negative Druck des Wind-Druckpulses hinter dem Rotorblatt gegenseitig aus. Es entsteht eine *Implosions-Druckwelle*, die sich nun mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. (Vergleiche hierzu die gemittelte Druck-Zeit-Kurve aus der Studie „*Acoustics Report Redacted – Rural Sheep Farm in Scotland 2023*“, die im Abschnitt *Evidenzlage und wissenschaftliche Wertigkeit* besprochen wird. Diese entspricht einer Implosions-Druckwelle und zeigt ebenfalls eine hohe Richtwirkung.)

Diese nicht-akustische Druckwelle stellt den zentralen Taktgeber des schallschnellen Windradsignals dar – sie ist der weithin messbare „Paukenschlag“ im Windradorchester.

Sie transportiert noch bis in 3 km Entfernung erhebliche Energiemengen, sowohl in Form von Luftvolumenströmung als auch durch ihre Impulshaftigkeit. Selbst in mehreren zehn Kilometern Entfernung kann sie von hochempfindlichen Messsystemen wie IGADe noch als Infraschallwelle registriert werden.

Dauer:

Dieser Rotorblatt-Turm-Durchgang (=RTD)-Vorgang dauert aufgrund der Geometrie und der dynamischen Druckausgleichsbewegung, in denen sich das Rotorblatt zunehmend vor den Turm schiebt, ihn mit seiner vollen Blattbreite und -länge von seinem Windschatten bedeckt und danach wieder freigibt etwa **0,4 bis 0,8 Sekunden**. Das liegt deutlich über dem rein geometrisch betroffenen Durchgangswinkel von **etwa 10 bis 20°** (0,1–0,2 s), da die Druckreaktion zeitlich vorseilt und nachschwingt. Dieses Ereignis beginnt physikalisch also bereits kurz vor dem Turmdurchgang und klingt nach der Passage allmählich ab. So entsteht eine Art sanfter Implosion, nach der sich die alten Druck- und Strömungsverhältnisse wiederherstellen.

Spektrum:

Diese Implosion erzeugt als im Grunde aperiodisches Signal ein kontinuierliches Spektrum mit einem Maximum im Infraschallbereich. Aufgrund der Dauer, Geometrie und der dynamischen Druckausgleichsbewegung liegt dieser Frequenzgipfel typischerweise im Bereich von **1,6 bis 2,4 Hz**.

Dieser Vorgang wiederholt sich mit jeder Rotorumdrehung – also typischerweise alle 2–3 Sekunden – und erzeugt dadurch rein mathematisch bedingt ein periodisches Spektrum mit Harmonischen der Grundfrequenz des Rotordurchgangs. Der erwähnte Frequenzgipfel des kontinuierlichen Implosionsereignisses liegt daher meist bei oder zwischen der **zweiten und dritten Harmonischen** und bedingt deren Höhen.

Leistung des Implosionsereignisses:

Etwa 1/30 des Rotorkreises ist am Implosionsgeschehen beteiligt. Bei einer Windenergieanlage mit einer elektrischen Leistung von **6 MW** entstehen im Nachlauf ca. **2 MW aerodynamische Energie**. Grob geschätzt werden davon etwa **20–60 kW** während eines einzelnen Rotorblatt-Turmdurchgangs (RTD) in die Druckimplosion umgesetzt. Zusätzlich trägt der durch den Turmdurchgang abrupt beeinflusste Volumenstrom zur Dynamik des Vorgangs bei. Die dadurch entstehende **impulsartige Luftverdrängung** kann die **reale Impulsenergie deutlich erhöhen**.

Asymmetrie der Ausbreitung:

Das Besondere beim Rotorblatt-Turmdurchgang ist, dass sich das Rotorblatt ja von einer Seite annähert und sich hinter dem Turm der Winddruck-Schatten mit einem relativen Unterdruck befindet, der hier ebenfalls interagiert und die Implosion und seine Druckwelle mitwindig und asymmetrisch verzieht. Als negative Druckstörung wird die Implosions-Druckwelle nicht nur von anderen Zonen mit relativem Unterdruck angezogen, sondern auch von den langsamer strömenden Luftschichten in Bodennähe.

Warum ist das so?

Negative Druckgradienten erzeugen eine Art **gerichtetes "Strömungsstreben"** – Luftmoleküle aus höheren Druckbereichen (oder Richtungen) „strömen nach“.

- In bodennahen Luftschichten ist die **Strömungsgeschwindigkeit reduziert** (Bodenreibung, Vegetation, Bebauung).
- Dort kann sich der **Unterdruck** regelrecht "**einsaugen**", und zwar **in Flussrichtung**, da sich dort der **Widerstand** gegen eine gerichtete Ausbreitung am geringsten auswirkt.

Man kann also sagen, dass die **Implosionswelle durch ihre eigene Druckgeometrie in die bodennahe Strömung "hinabgezogen" und dort gerichtet kanalisiert wird.**

So bewegt sich diese Implosionsdruckwelle mit Schallgeschwindigkeit zwar auch gegenwindig, sie breitet sich aber besonders hoch asymmetrisch und zunehmend mitwindig gerichtet und bodennah (ohne Bewuchs/Bebauung vor allem in Höhen von 1 bis 12 m über dem Boden) kilometerweit aus.

4.1 Dominanzbereiche der verschiedenen Energiekomponenten des RTD / Wind-Druckpulse in ihrer Einwirkung auf die Anwohner

Drei Phasen/Komponenten der Implosionsdruckwelle

Auch die Implosionsdruckwelle wird von einem Luftvolumenstrom begleitet – einem anfänglichen Unterdruck („Luftsog“) gefolgt von positivem Druck. Diese Volumenbewegung unterscheidet sie deutlich von einem rein akustischen Ereignis, da sie wesentlich mehr Energie überträgt.

Würde sich diese Druckwelle kugelförmig ausbreiten, ginge sie bereits nach unter 100 Metern in eine akustische Knallwelle über. In der Realität jedoch wird sie durch bodennahe Strömungsschichten kanalisiert und mit dem Wind in Richtung Boden verzogen. In Verbindung mit der Bodenkopplung bewirkt dies eine deutlich langsamere Abschwächung der Druckimpulse (etwa proportional zu $1/r$ statt $1/r^2$).

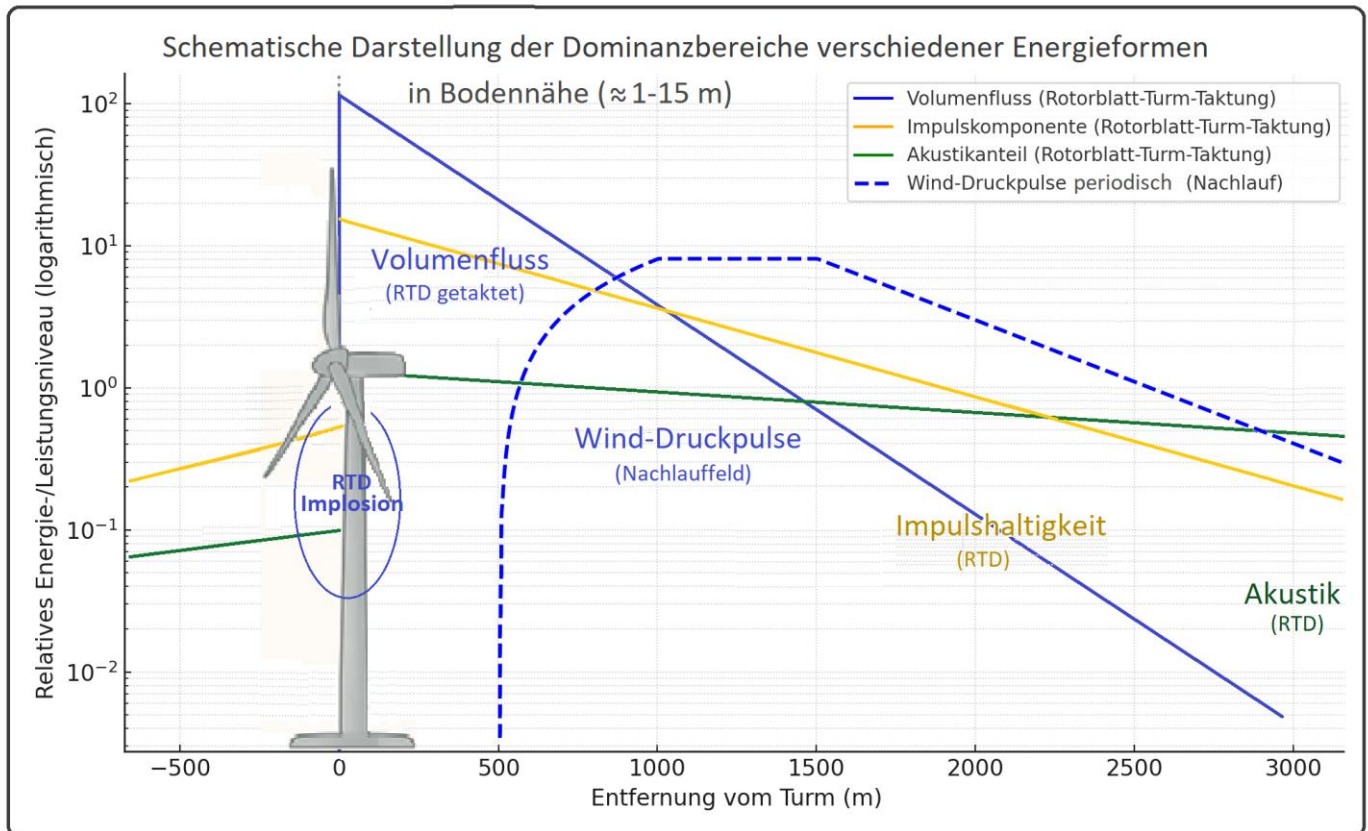
Bei üblichen Windverhältnissen (ca. 8 m/s) erfolgt der Übergang in eine rein impulsgetragene Druckwelle typischerweise erst in einer Entfernung von über 2 km. Diese bleibt weiterhin hochwirksam, da die Impulshaltigkeit physiologisch deutlich stärker wirkt als harmonische Infraschallschwingungen.

Interaktionsfeld RTD/Wind-Druckpulse

Neben dieser durch den Rotorblatt-Turm-Durchgang (RTD) getakteten Implosionsdruckwelle wirken auf Anwohner zusätzlich Wind-Druckpulse ein.

Die Winddruck-Pulse folgen zwar der gleichen Grundfrequenz (RTD), treffen aber durch Strömungsverzögerung zeitlich phasenversetzt auf und überlagern sich mit den anderen Komponenten zu einem komplexen Feld. Auch diese Wind-Druckpulse transportieren durch die Bewegung ganzer Luftpakete eine erhebliche kinetische Energie. Sie werden in behördlichen Lärmbewertungen jedoch vollständig ignoriert.

Im nachfolgenden Diagramm werden die Belastungen der verschiedenen Emissionskomponenten – entsprechend ihrer energetischen und damit gesundheitlichen Relevanz – dargestellt. Die Übergänge zwischen Volumenstrom-, Impuls- und Schallbereich sind fließend und abhängig von zahlreichen Faktoren wie Windrichtung, Bodenbeschaffenheit oder Turmhöhe.



Klar ist jedoch: Bis mindestens 3 km Entfernung dominieren die aerodynamisch erzeugten, hochenergetischen Komponenten (Volumen- und Impulsdruck) die Exposition der Anwohner. Dennoch werden in der offiziellen Bewertung *alle* Anteile oberhalb der grünen Linie (rein akustischer harmonischer Infraschall) konsequent unterschlagen.

Interpretation der Zonen im Diagramm

- **Volumentransport (blau, Implosionszone)** in der Frequenz des Rotorblatt-Turm-Durchgangs (RTD) dominiert bis ca. **800–1000 m**. Hier wirkt ein realer Luftmassentransport, der mit den Implosionsprozessen am Rotorblatt zusammenhängt.
- Der **Volumentransport durch Wind-Druckpulse** (gespeicherte Energie des Nachlaufelds, die beim Auftreffen auf den Boden impulshaft freigesetzt wird), reicht **bis über 3000 m** hinaus.
- Die **Impulsübertragung (orange, Stoßwellencharakter)** prägt den Bereich **1000–3000 m**, während Strömungseffekte allmählich abnehmen.
- Erst ab **2500–5000 m** dominiert die **Schalldomäne (grün)** mit klassischer Fernfeldakustik (harmonische Wellen ohne gerichteten Impuls).
- Ab Entfernungen (**über ca. 5 km**) verliert auch die Impulsstärke an Bedeutung –hier kann man dann von einer rein akustischen Infraschallkomponente sprechen, wie sie aktuell in behördlichen Bewertungen herangezogen wird. In der Fourier-Reihe, des ab dort gemessenen Signals, müsste die Grundfrequenz klar dominieren und die Harmonischen erheblich an Amplitude verloren haben.
-

Einflussgrößen, die den Übergang zwischen den Zonen hinauszögern (geordnet nach Relevanz):

1. Bodenkopplung und Ausbreitung in Luft-Boden-Grenzschicht (Leitungseffekte, Reflexionen)
2. Rotorgröße und Stärke der Druckpulse
3. Topographie (z. B. Tallagen oder Hanglagen)
4. Atmosphärische Schichtung und Windgradienten
5. Mehrere Anlagen mit phasenkohärenten Überlagerungseffekten

4.2 Wie die Wind-Druckpulse die Anwohner erreichen

Die Wind-Druckpulse dringen auch durch Häuser hindurch, denn genauso wie Infraschall müssen dafür nur Fenster und Türen um Bruchteile von Millimetern in ihrer Dichtung schwingen. Dies erklärt die Fälle, in denen Anwohner bei stark seitlicher Perspektive sehen konnten, wie sich Vorhänge im Rhythmus der Windkraftanlagen bewegten. Das ist Ausdruck einer hohen Energieumsetzung, die von harmonischem Infraschall nicht ausgelöst würde. Eine Infraschallmessung hätte hier jedoch vermutlich keine überhöhten Werte gemessen, und die Grenzwerte wären eingehalten worden. Die hochenergetische Volumenfluss-Komponente wird eben nicht messtechnisch erfasst. Auch ein üblicher Dachstuhl ist ein riesiges „offenes Tor“ für diese Wind-Druckpulse. Anders als Infraschall tragen die Wind-Druckpulse aber eine deutlich höhere Energie mit sich. Und wenn Infraschall nahezu gleichzeitig von allen Seiten auf den Menschen einwirkt, so wirken diese Wind-Druckpulse eher von nur einer Seite. Das menschliche Nervensystem registriert gerade vor allem solche Unterschiede!

Das alles erklärt (anders als eine bloße akustische Infraschall-Wirkung), warum Menschen in den Keller gehen oder ihr Schlafzimmer an die den Anlagen windabgewandte Seite verlegen, um die Windrademissionen nicht so stark zu spüren.

Besonders betroffen sind Anwohner, deren Häuser einzeln oder ungeschützt, oft "in der ersten Reihe" oder in Hanglagen mitwindig stehen. Anders als bei harmonischem Infraschall werden hier lokal deutlich höhere Belastungen spürbar – obwohl diese nicht von Microbarometern korrekt erfasst werden: Diese messen primär schnelle Druckänderungen, während die physiologisch relevanten Wirkungen vor allem von Volumenflüssen und Impulsübertragung ausgehen.

Daher besteht eine Entkopplung zwischen gemessenen Werten und dem realen Leidensdruck betroffener Menschen und Tiere – ein systematischer blinder Fleck in der behördlichen Bewertungspraxis.

Physiologische Wirkungen

Neben dem bekannten Einfluss auf das Vestibularsystem (Gleichgewicht, Orientierung, Übelkeit, Raumgefühl) und taktile Rezeptoren (Hautwahrnehmung, Druckempfinden, Erschütterungen) wird diskutiert, ob impulsartige Druckwellen – wie sie bei Windkraftanlagen auftreten – auch organmechanische Effekte auslösen können. Dazu zählen insbesondere:

- Resonanzinduktion im Thoraxbereich (z. B. Brustkorb, Zwerchfell), wodurch ein Gefühl von Beklemmung oder „innerem Druck“ entstehen kann,
- Mitbewegung viszeraler Strukturen (Magen, Darm, Herzbeutel), was bei empfindlichen Personen vegetative Reaktionen wie Herzrhythmusstörungen, Übelkeit oder Kreislaufinstabilität triggern kann,
- Beeinflussung der Atemmechanik durch subtile Druckwechsel an der Körperoberfläche, eventuell eine indirekte Wirkung auf den Nervus vagus, der durch äußere mechanische Impulse (z. B. am Hals oder im Brustbereich) reflektorisch aktiviert werden könnte (ähnlich wie bei plötzlichem Druck beim Tauchen oder bei der Valsalva-Reaktion- ein mildes Barotrauma, das sich stundenlang wiederholt).
- Es gilt als wahrscheinlich, dass tieffrequente Druckschwankungen auch über das Gehör unterhalb der bewussten Wahrnehmungsschwelle verarbeitet werden – ähnlich wie man unbewusst den Atemrhythmus oder die Annäherung großer Körper über Bodenvibrationen wahrnimmt. Infraschall könnte damit ein evolutionäres Warn- oder Resonanzsignal darstellen.

Das Positive: Bauliche oder technische Maßnahmen könnten eher Linderung bringen als bei Infraschall im akustischen Sinne. Und mit dem Wissen, dass mitwindig in eingrenzbaren Abständen Anwohner den stärksten Belastungen ausgesetzt sind, wäre es von grundlegender Bedeutung, diese Art von Emission endlich näher zu untersuchen, die Belastung anzuerkennen und erstmals halbwegs effektive Schutzmaßnahmen zu ergreifen, anstatt diese offensichtliche Windrad-Emission zu ignorieren.

4.3 „Bauchtanz“ des Turms / Körperschall

Kurz vor dem Rotorblattdurchgang am Turm wird das Rotorblatt durch die bestehende Druckdifferenz des relativen Unterdrucks auf der Rückseite des Rotorblattflügels zum Turm hingezogen. Da der Generator in der Gondel dadurch ein zusätzliches Drehmoment erhält, das er auf den Turm in Form einer **Biegelast** überträgt, zieht der Turm sich zum Rotorblatt hin.

Beim Durchgang des Rotorblattes fällt nun plötzlich ein tonnenstarker Winddruck vom Turm, und er wird auch durch den relativen Unterdruck auf der Rückseite des Rotorblattes **nach vorne gezogen**.

Nach dem Rotorblattdurchgang kehren sich die Verhältnisse wieder um. Der sich wieder aufbauende Staudruck am Turm zieht an dem relativen Unterdruck der Rotorblattrückseite, was den Rotor minimal abbremst und über die Nabe eine **Biegelast** in die entgegengesetzte Richtung bewirkt.

So vollführt der Turm besonders in 2/3 Höhe eine Art Bauchtanz, der sich mit Hebelwirkung auf das Fundament und dann auf den Boden überträgt.

Nun ist das Windrad ja kein starrer Pfahl im Boden, sondern kann und muss sich wie Schilf im Wind biegen. Würde man es an einem ruhigen Tag an der Gondel anstoßen, würde es von allein in einer definierten Frequenz schwingen. Geraten die durch den Wind bedingten „Bauchtanzschwingungen“ in die Nähe dieser Frequenz, so droht in der Resonanz ein Aufschaukeln mit einem Bruch des Turmes.

Jede Schwingung des Turms wirkt je nach Wind wie eine Art Rammhammer auf den Boden. Die ausgelösten Schwingungen übertragen sich kreisförmig um die Anlagen. Das ist vergleichbar mit der Erschütterung eines vorbeifahrenden Zuges. Je nach Untergrund kann dieser **Körperschall kilometerweit getragen werden** und über das Fundament auf Wohnhäusern, deren Wände, Fußböden oder sogar Möbel übertragen werden. Begünstigend wirken Felsuntergründe, gefrorener Boden, hochstehendes Grundwasser, Gebäude, die ohne Kiesschicht auf gewachsenem Boden errichtet wurden, Betonwände, Decken und Böden ohne Schallentkopplung.

5. Evidenz und Wissenschaftliche Wertigkeit

In der anhaltenden öffentlichen Debatte über mögliche gesundheitliche Gefahren durch Emissionen von Windenergieanlagen verbindet dieser Beitrag anerkannte physikalische Phänomene mit medizinischen Beobachtungen sowie zahlreichen konsistenten Berichten betroffener Anwohner. Die dabei entstehende Gesamtschau ergibt ein plausibles, interdisziplinär abgestütztes Wirkmodell – vergleichbar mit einem Puzzle, dessen Teile sich auf sinnvolle Weise zusammenfügen. Die Kohärenz der Zusammenhänge deutet darauf hin, dass hier ein wissenschaftlich relevanter, bislang unzureichend berücksichtigter Kausalzusammenhang beschrieben wird.

1. Physikalisch-theoretisch gesicherte Grundlagen (**hohe Evidenz**)

- Diese Aspekte beruhen auf etablierten Gesetzen der Strömungsmechanik, Akustik, Impulsübertragung und Energieausbreitung:
- Differenzierung zwischen verschiedenen Druck- und Schallphänomenen (harmonischer Infraschall, Knall, Explosion, Implosion, Wind-Druckpulse)
- Bedeutung der Fourier-Analyse zur Unterscheidung impulsiver vs. harmonischer Signale
- Entstehung und Periodizität der Rotorblatt-Turmdurchgangsfrequenz (RTD)
- Impulsübertragung bei Druckgradienten in bewegter Luft
- Rolle von Luftvolumenströmen und kinetischer Energie in bodennaher Turbulenz
- Entkopplung von Volumentransport und Fernfeld-Schalldruck (bekannt aus Standardwerken der Aerodynamik und Akustik)

2. Davon abgeleitete plausible Folgen (**mittlere Evidenz**)

Diese Schlussfolgerungen ergeben sich logisch aus den physikalischen Grundlagen und sind in sich konsistent:

- Wind-Druckpulse als strukturierte, nicht schallartige Druckereignisse
- Interaktion von Nachlaufwirbeln mit Geländeprofilen und bodennaher Strömung
- Verstärkung oder Dämpfung durch Reflexion und Resonanz in Gebäuden
- Biomechanisch plausible Übertragung von Impulsen auf taktile und vestibuläre Sensoren
- Ergebnisse der Studie "*Acoustics Report – Sheep Farm, Scotland 2023*" (Huub Bakker et al.):
- Wiederholt gemessene negative Druckpulse deuten auf eine Implosionscharakteristik hin. Die Emissionen zeigten deutliche Windrichtungsabhängigkeit, d. h. hohe mitwindige Direktionalität. Diese Beobachtungen bestätigen die Annahme einer gerichteten, nicht kugelförmigen Ausbreitung.

3. Klinisch-physiologische Beobachtungen und Hypothesen (**relevante, aber geringere Evidenz**)

Diese Daten beruhen auf individuellen Berichten, ärztlichen Beobachtungen und medizinischen Hypothesen, die bislang nur in begrenztem Umfang systematisch erhoben wurden, aber biophysikalisch nachvollziehbar sind:

- Kontakt des Autors mit ca. 300 Betroffenen, fast alle wohnen in Hauptwindrichtung nahe Windparks
- Viele Betroffene berichten über Besserung, wenn sie in Kellerräume oder windabgewandte Hausseiten wechseln – was gegen kugelförmige Ausbreitung spricht
- Neue Bauschäden (z. B. Risse zwischen Mauerwerk und Dachstuhl) traten nach Inbetriebnahme nahegelegener Anlagen auf, obwohl das Haus zuvor jahrelang stabil war
- Diskrepanz zwischen objektiver Infraschallmessung (z. B. Microbarometer) und subjektiven Beschwerden
- Stärkere Beschwerden bei Häusern in exponierter Lage oder Einzelgehöften („erste Reihe“)
- Ähnlichkeit der Symptome mit bekannten Effekten durch niederfrequente impulshaltige Volumenwellen (z. B. aus der U-Boot-Medizin, Langzeitvibrationsexposition)

6. Schlussfolgerung

Die aerodynamischen Emissionen von Windenergieanlagen – insbesondere Wind-Druckpulse, periodisch auftretende Druckwellen aus energiehaltigen Luftverlagerungen, impulsartige Wirbelbildung und Turmschwingungen – sind mit erheblichem Energiegehalt verbunden und können nach aktueller interdisziplinärer Evidenzlage die Gesundheit empfindlicher Lebewesen, insbesondere von Menschen, schädigen.

Die geltenden Regelwerke, die nahezu ausschließlich auf akustischen Messgrößen beruhen, erfassen diese nicht-akustischen, aber hochrelevanten Emissionsformen nicht. Dies stellt eine gravierende Lücke im Gesundheits- und Immissionsschutz dar und hat vermutlich bereits zur chronischen Belastung vieler Betroffener geführt.

Aus Verantwortung gegenüber der öffentlichen Gesundheit und auf Basis des Vorsorgeprinzips leitet sich daher dringender Handlungsbedarf ab:

- **Anlagen, bei denen konkrete Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen vorliegen, sollten umgehend stillgelegt werden**, bis eine vollständige Untersuchung und Neubewertung erfolgt ist.
- **Gesundheitliche Auswirkungen aerodynamischer Emissionen sind als potentielle Gefahr offiziell anzuerkennen**, und bereits Geschädigte sind zu entschädigen sowie medizinisch zu begleiten.
- Der **Immissionsschutz ist um strömungsdynamische Emissionen zu erweitern**, und die physikalischen Messmethoden sind entsprechend zu korrigieren und zu ergänzen.
- Die **Genehmigungspraxis ist neu auszurichten** – unter Berücksichtigung der gezeigten Evidenzlagen und unter Einbeziehung medizinischer, biophysikalischer und strömungsmechanischer Fachdisziplinen.