

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Windturbinen und alternative Energiequellen

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen



- **Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)**
- Energieinhalt im Wind und Aufbau von Windkraftanlagen (Vorlesung 2)
- Windentstehung und Messung der Windgeschwindigkeit (Vorlesung 3)
- Grundlagen der Aerodynamik (Vorlesung 4)
- Grundlagen für den Rotorentwurf (Vorlesung 5)

- Entwurf und aerodynamische Optimierung des Rotors (Vorlesung 5,6)
- Anpassung an veränderte Windverhältnisse und Verluste (Vorlesung 7)
- Grundlagen der Aeroelastik, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (Vorlesung 8,9)
- Schallquellen an Windkraftanlagen und Maßnahmen zur Lärmreduzierung (Vorlesung 10)



- spezielle Herausforderungen an offshore-Windparks (Vorl. 11)
- Gezeitenturbinen (Vorlesung 12)
- Solarthermie und Photovoltaik (Vorlesung 13)
- Geothermie (Vorlesung 14)
- Zusammenfassung (Vorlesung 14)

Schallerzeugung am Rotor



[From Oerlemans, 2009]

J.H. Bass: Windturbine Noise – from Source to Receiver. EWEA Noise Workshop, Oxford, Dec.2012

Strömungsmechanische Effekte

- instationäre Strömungseffekte
 - Rotor-Stator-Interaktionen (im Fall WEA Rotor-Turm)
 - Turbulenz
 - Sekundärströmunge
- Nachlaufströmungen (Nachlaufdelle)
- unsymmetrische Abströmungen, z.B. aus dem Rotor



Mechanische und elektromechanische Effekte

- Schwingungen, z.B. durch Unwuchten
- Abrollgeräusche im Getriebe
- Schwingungen durch elektromechanische Kräfte

anderes

- Schwingungen, angeregt durch Abtastfrequenzen im Frequenzumformer
- Lüftergeräusche
- anderes

- Durch das „logarithmische Hörvermögen“ können die Schallpegel mehrerer Schallquellen nicht einfach addiert oder subtrahiert werden.
- Eine Zunahme um 10 dB(A) wird etwa als Verdopplung der „Lautstärke“ empfunden.

Tafelbild

Schallabnahme mit dem Abstand



Tafelbild

Der Schalleistungspegel kann für einen vorgegebenen Abstand mit der Gleichung:

$$L_P = L_{WKA} - 10 \log(2 \cdot \pi \cdot y \cdot y) - a \cdot y + k$$

abgeschätzt werden. Darin sind:

- L_{WKA} der Schalleistungspegel an der Quelle, z.B. der Mitte der Rotornabe in dB(A)
- y der Abstand zum Prüfpunkt in m
- a der Absorptionskoeffizient in dB(A)/m
- k Zuschläge für die Ton- und Impulshaltigkeit in dB(A), z.B. verursacht durch Maschinengeräusche

Tafelbild

Was ist erlaubt?

$$L_{WKA} = 105 \text{ dB(A)}$$

Die erlaubte Schallimmission an einem bestimmten Ort ist in verschiedene Gesetze und Verordnungen beschrieben (z.B. Bundesimmissionsschutzgesetz und Technische Anleitung zum Schutz vor Lärm – TA Lärm).

Grenzwerte TA Lärm in dB(A):

	Tag	Nacht
Industriegebiet	70	70
Dorf/Mischgebiet	60	45
Wohngebiet	50	35
Kurgebiet	45	35

Im Planungsprozess Darstellung des Schalleistungspegels als Isophonen im Lageplan der Anlagen. Im Genehmigungsverfahren ist eine Immissionsprognose nachzuweisen.

Tafelbild

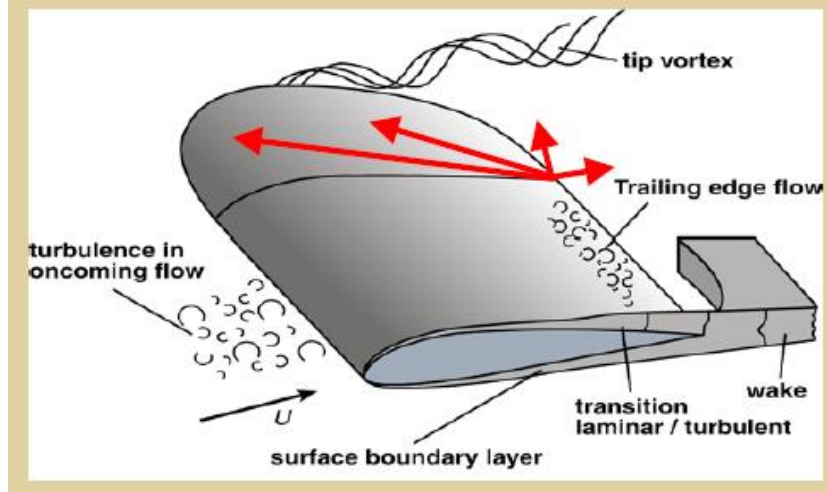
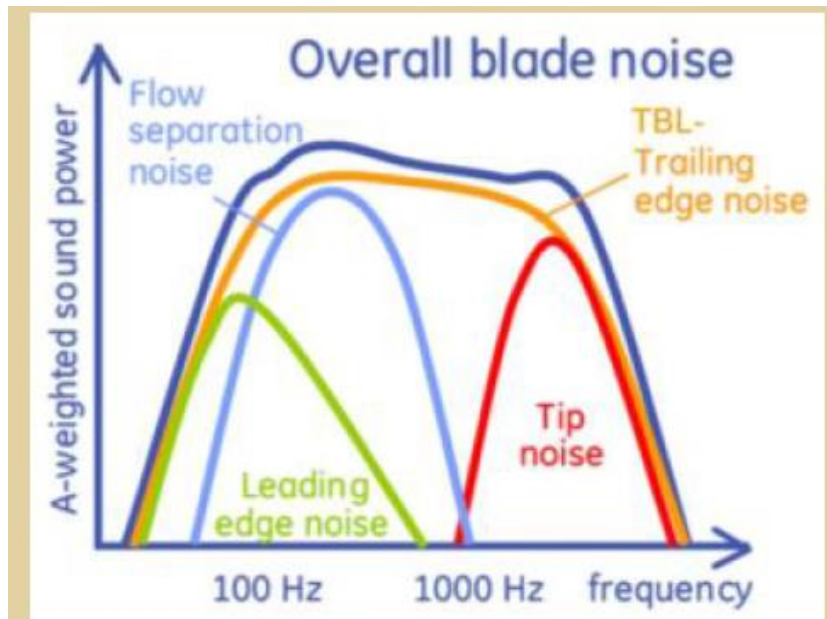
Was ist erlaubt?

- Nach der Errichtung von WEA, ist die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben durch Messungen nachzuweisen.
- Dabei besteht häufig das Problem, dass geeignete Windbedingungen herrschen müssen.



entnommen aus: Hintergrundbericht „Schallemission von Windenergieanlage“ , Fachagentur Windenergie

Schallerzeugung am Rotor mit strömungstechnischen Ursachen



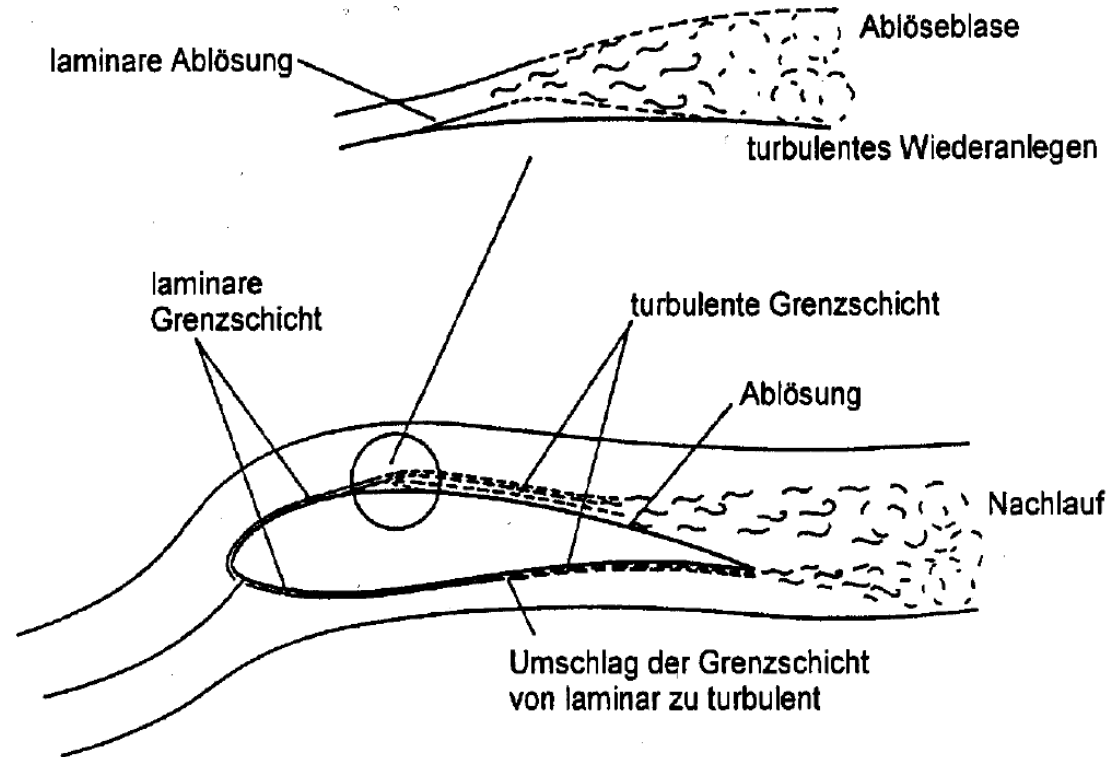
J.H. Bass: Windturbine Noise – from Source to Receiver. EWEA Noise Workshop, Oxford, Dec.2012

- Druckpulsationen werden z.B. generiert mit Vielfachen der Drehfrequenz und der Schaufelzahl n_b (Blade Passing Frequencies):

$$f_{bpf} = n_b \cdot f_{rot}$$

- Die Amplitude der Druckpulsationen hängt u.a. von den Wechselwirkungen der "wake flow" mit den stehenden Bauteilen ab:
 - z.B. beeinflusst vom Abstand des Rotors zum Turm
- Die Druckpulsationen und die resultierenden Kräfte hängen auch stark vom Betriebspunkt ab.

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung



▪ Zielstellung: Vermeidung einer Strömungsablösung am Rotorblatt → Druckpulsationen := Schallquellen

- Turbulenzgrad der Anströmung entscheidend für den Zustand der Grenzschicht (laminar / turbulent)
- turbulente Grenzschichten sind unempfindlicher gegenüber einer druckinduzierter Ablösung
- laminare Grenzschichten wie sie im Blattwurzelbereich aufgrund der geringen Umfangsgeschwindigkeit erwartet werden können, sind sehr empfindlich gegenüber druckinduzierter Ablösung → laminar turbulenter Umschlag wird durch Wirbelgeneratoren erzwungen bzw. der Turbulenzgrad der bereits turbulenten Grenzschicht wird weiter erhöht.

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Hinterkante



Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Hinterkante

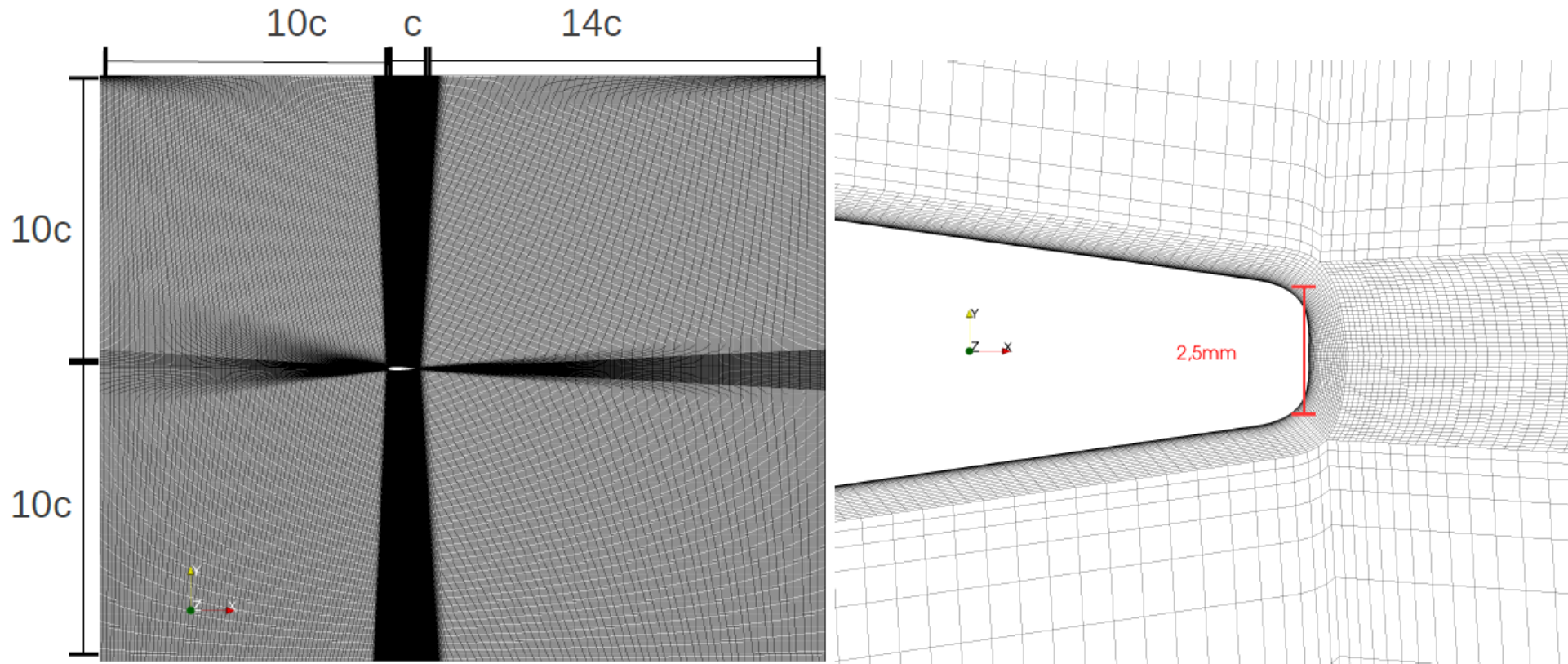
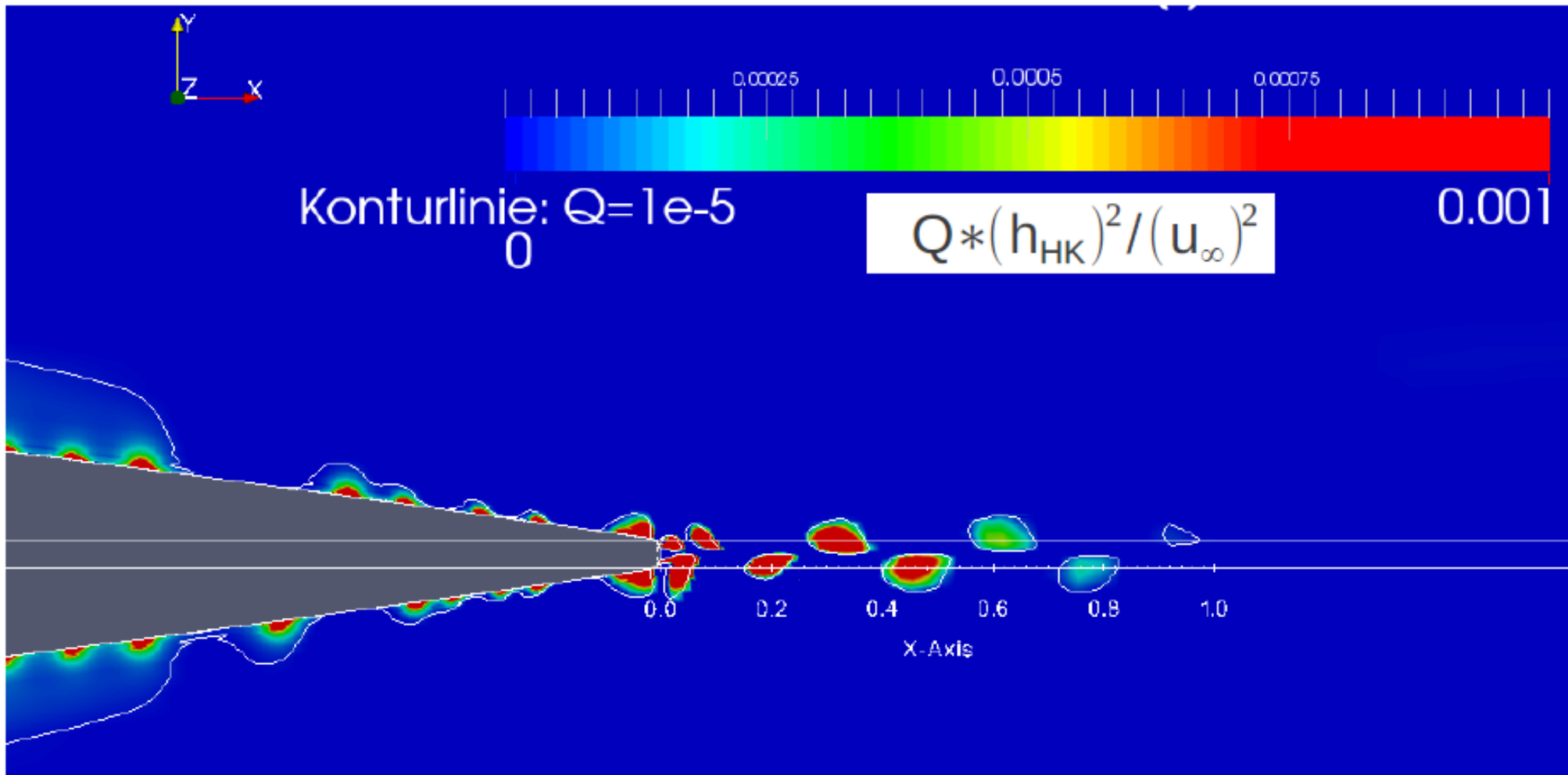


Abbildung 4.9: Links: Rechengitter für das stumpfe NACA 0012 Profil $\alpha=0^\circ$, Sehnenlänge $c = 0,6009 \text{ m}$; Rechts: Rechengitter um die Hinterkante

- direkte Strömungsablösung + Kevin-Helmholtz Instabilitäten in den freien Scherschichten
- Abbildung aus Masterarbeit S. Peters (symmetrisches Profil + Anstellwinkel = 0°)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Hinterkante



- direkte Strömungsablösung + Kevin-Helmholtz Instabilitäten in den freien Scherschichten
- Abbildung aus Masterarbeit S. Peters (symmetrisches Profil + Anstellwinkel = 0°)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Hinterkante

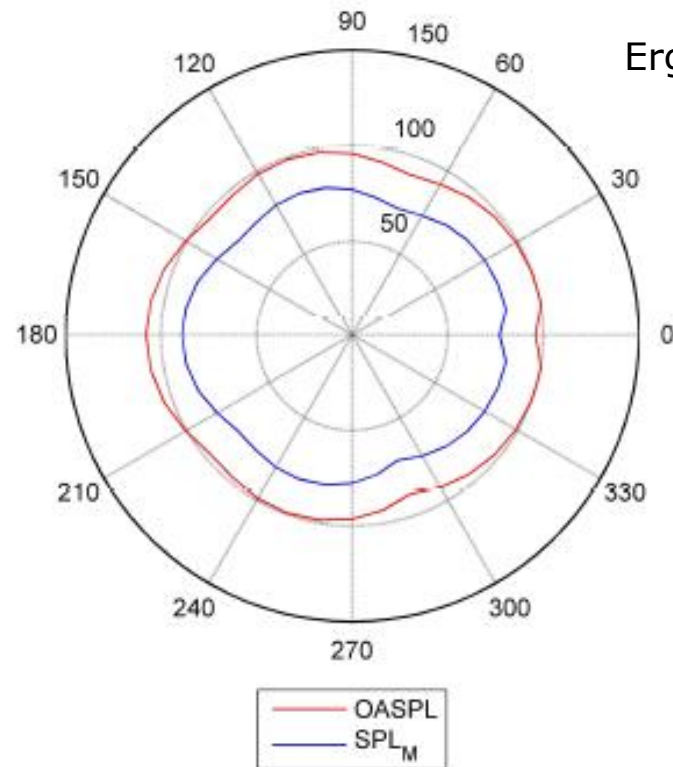
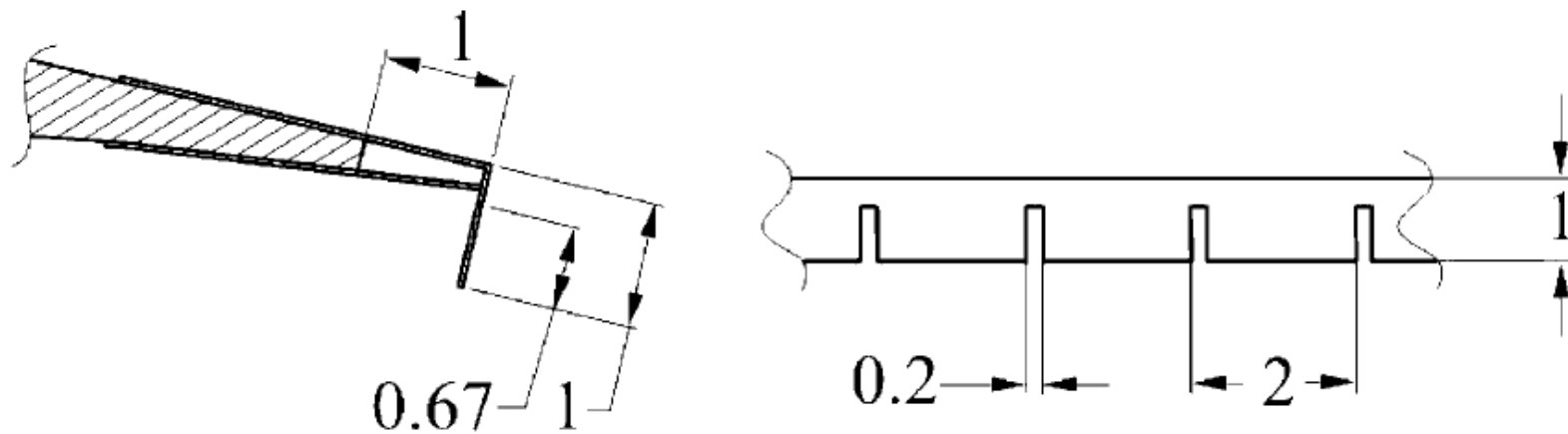


Abbildung 6.3: Richtcharakteristik am NACA 0012 mit stumpfer Hinterkante $h_{HK} = 0,4 \%c$, $Re = 2,85e6$, $\alpha = 0^\circ$, $OASPL_{max} = 107,81$ dB bei 180° , $SPL_{M,max} = 89$ dB bei 180° , symmetrische Charakteristik

- Abbildung aus Masterarbeit S. Peters (symmetrisches Profil + Anstellwinkel = 0°)

- Dicke und Form der Hinterkante
- blade add on`s, z.B. Gurney-Flaps



Skizze entnommen aus:

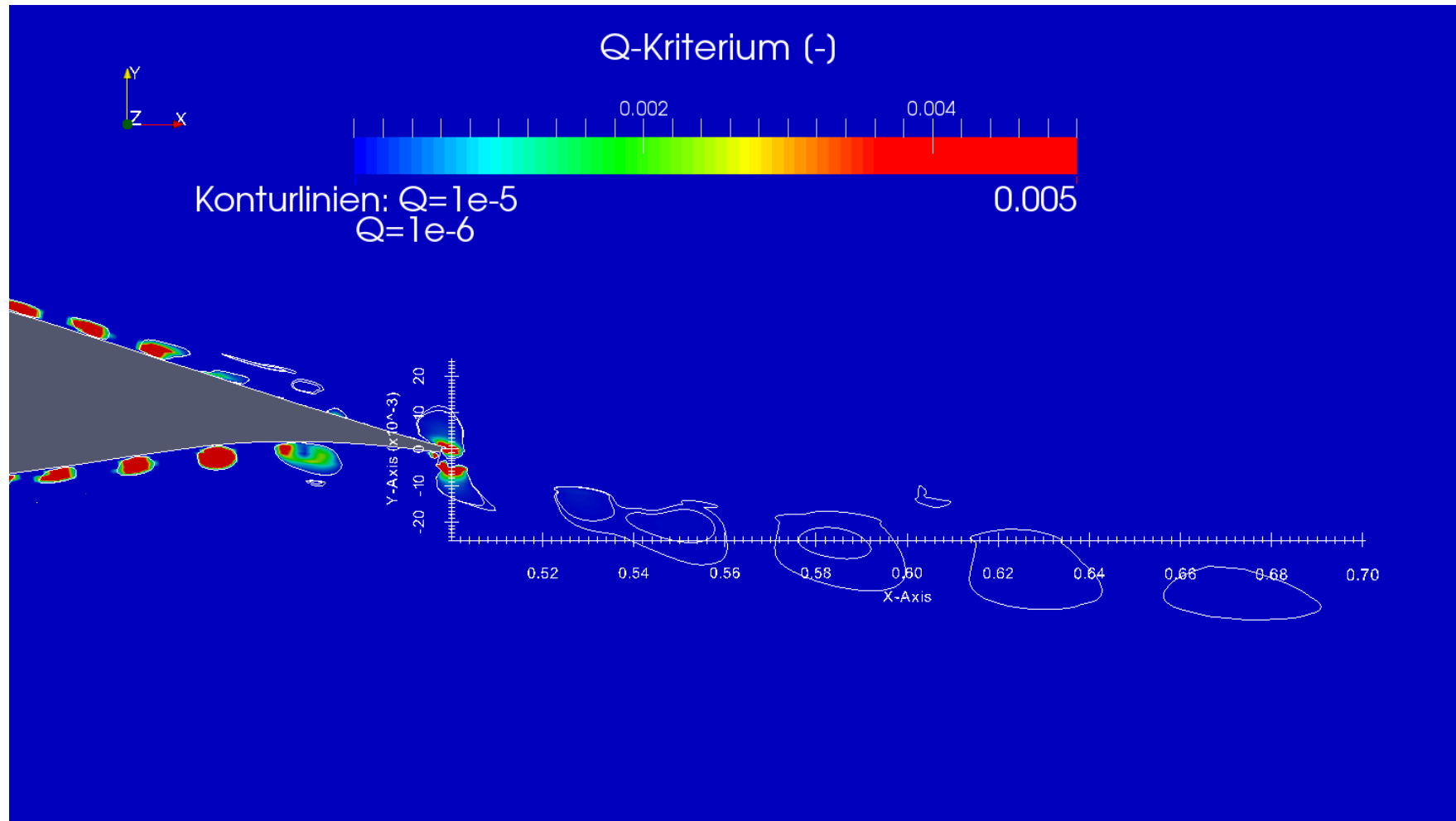


Bild entnommen aus Vortrag zur Masterarbeit S. Peters, LS Strömungsmaschinen, Universität Rostock, 2013

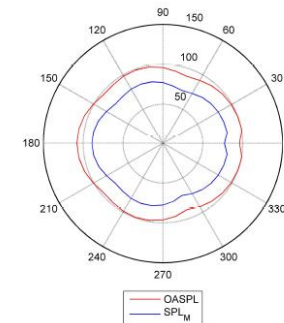
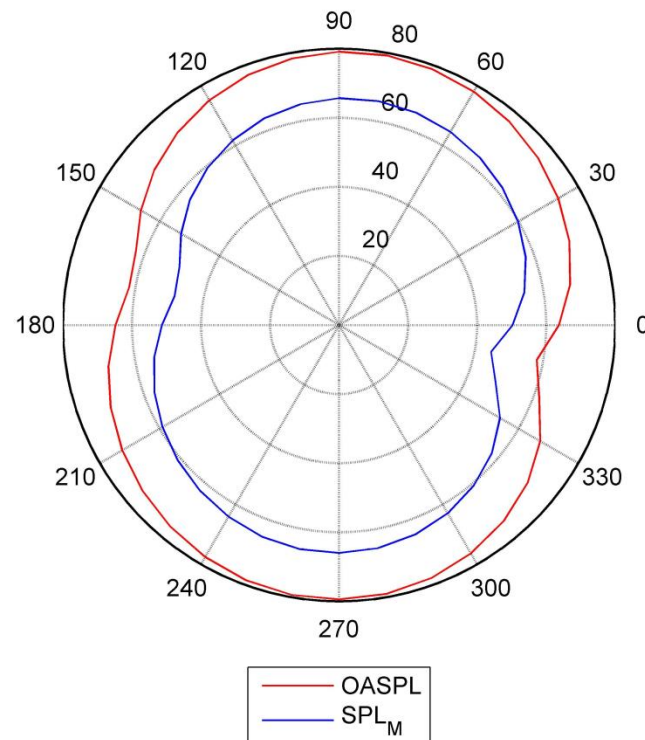


Abbildung 6.3: Richtcharakteristik am NACA 0012 mit stumpfer Hinterkante $h_{tr} = 0,4 \% c$, $Re = 2,85e6$, $\alpha = 0^\circ$, $OASPL_{max} = 107,81$ dB bei 180° , $SPL_{M,max} = 89$ dB bei 180° , symmetrische Charakteristik

Richtcharakteristik:

- 36 Empfänger auf Kreis angeordnet, Kreismittelpunkt Profilmittte
- Radius: $r/c = 10$

Bild entnommen aus Vortrag zur Masterarbeit S. Peters, LS Strömungsmaschinen, Universität Rostock, 2013

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Spitzenwirbel

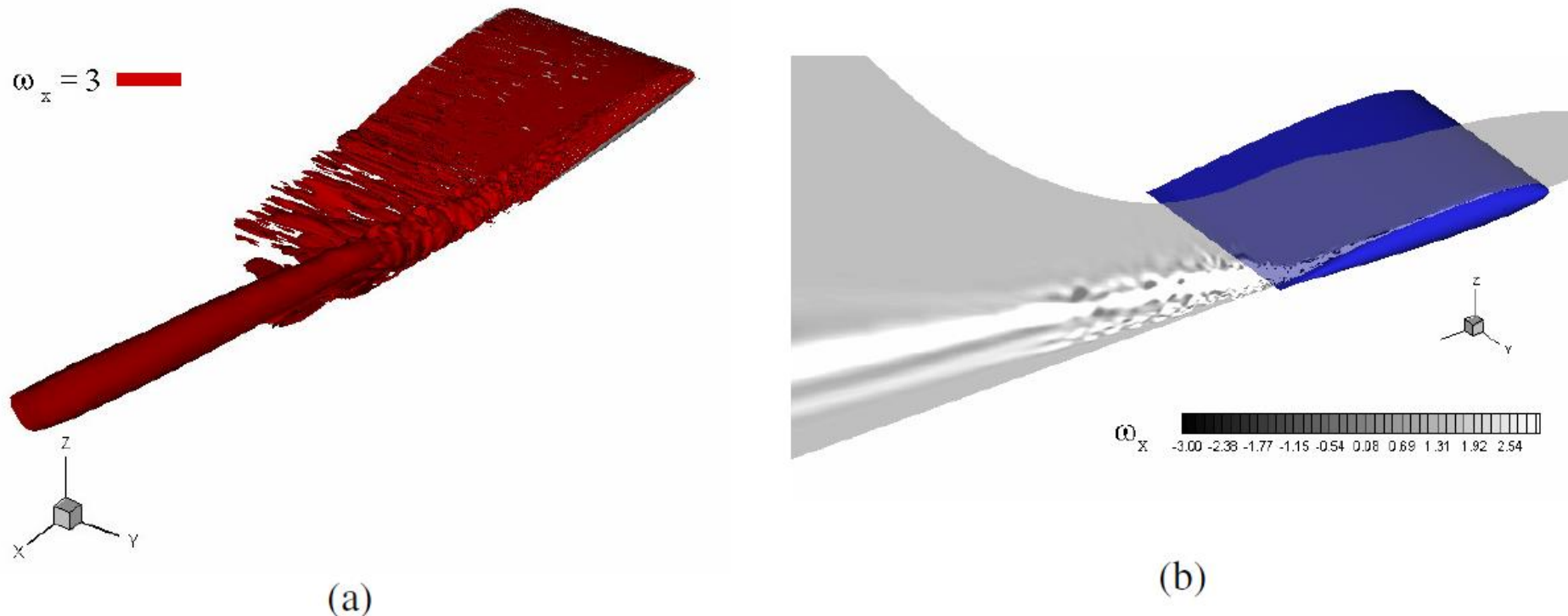


Figure 3. Instantaneous ($t= 3.15c/U_\infty$) field of axial vorticity. (a) Iso-surface of vorticity component $\omega_x=3$; (b) Contours of vorticity component ω_x in the x-z plane at $y=0.72$

Problem: Umströmung der Flügelspitze durch Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite
Resultat: hohe TKE und Druck RMS Werte → Strömungslärm resultiert aus der transienten Wanddruckverteilung (akustische Dipolquellen) sowie den Druck- und Geschwindigkeitsfluktuationen im Spitzenwirbel (akustische Quadropolquellen)

Bilder entnommen aus Jiang et al. (2007) „Large Eddy Simulation of Wing Tip Vortex in the near field“

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte Rotorblattströmung - Spitzenwirbel

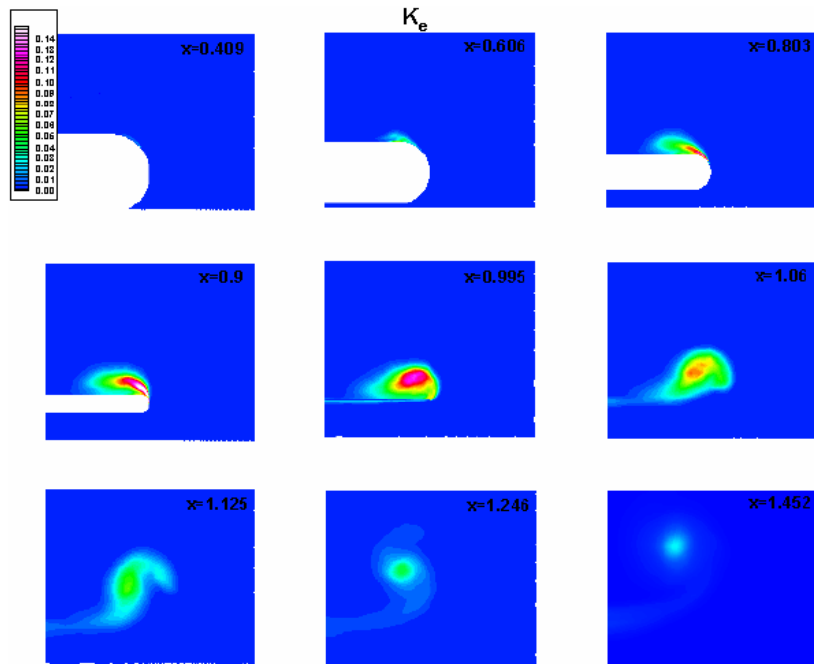


Figure 32. Contours of turbulence kinetic energy on cross-sections at different streamwise locations

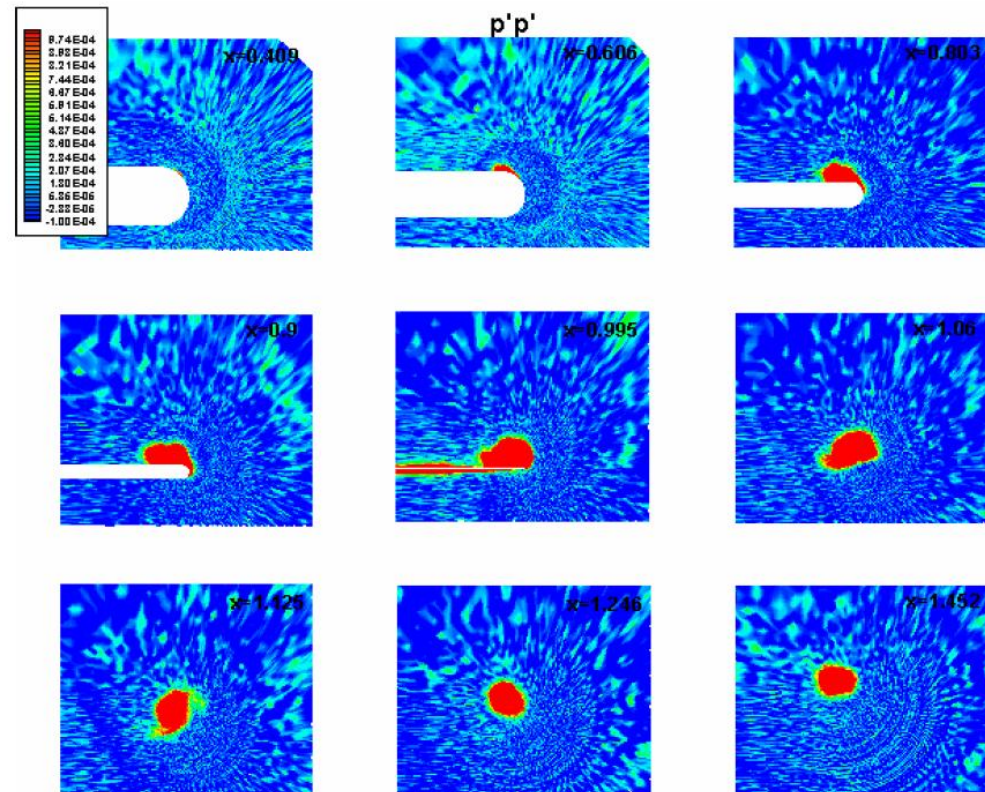
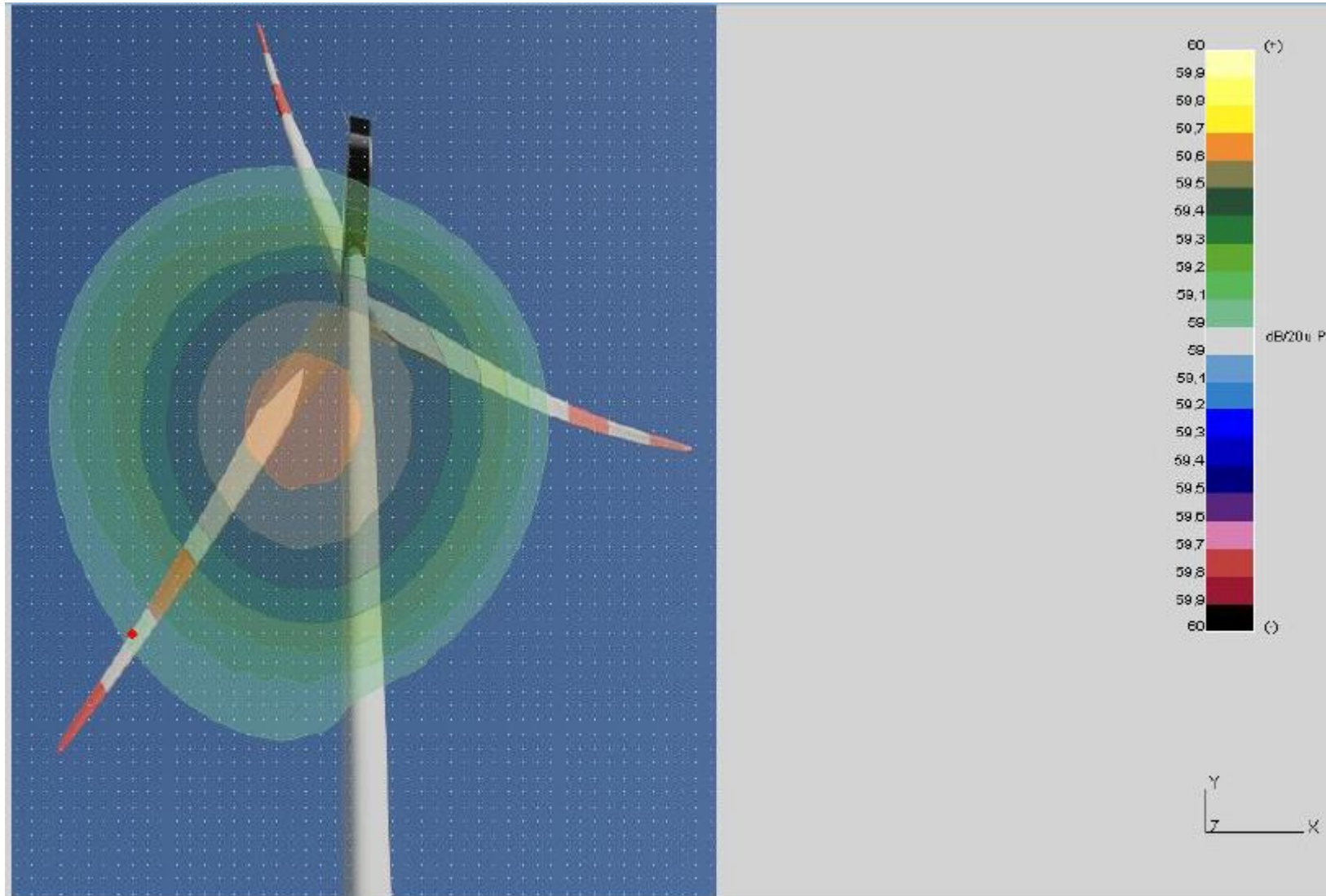


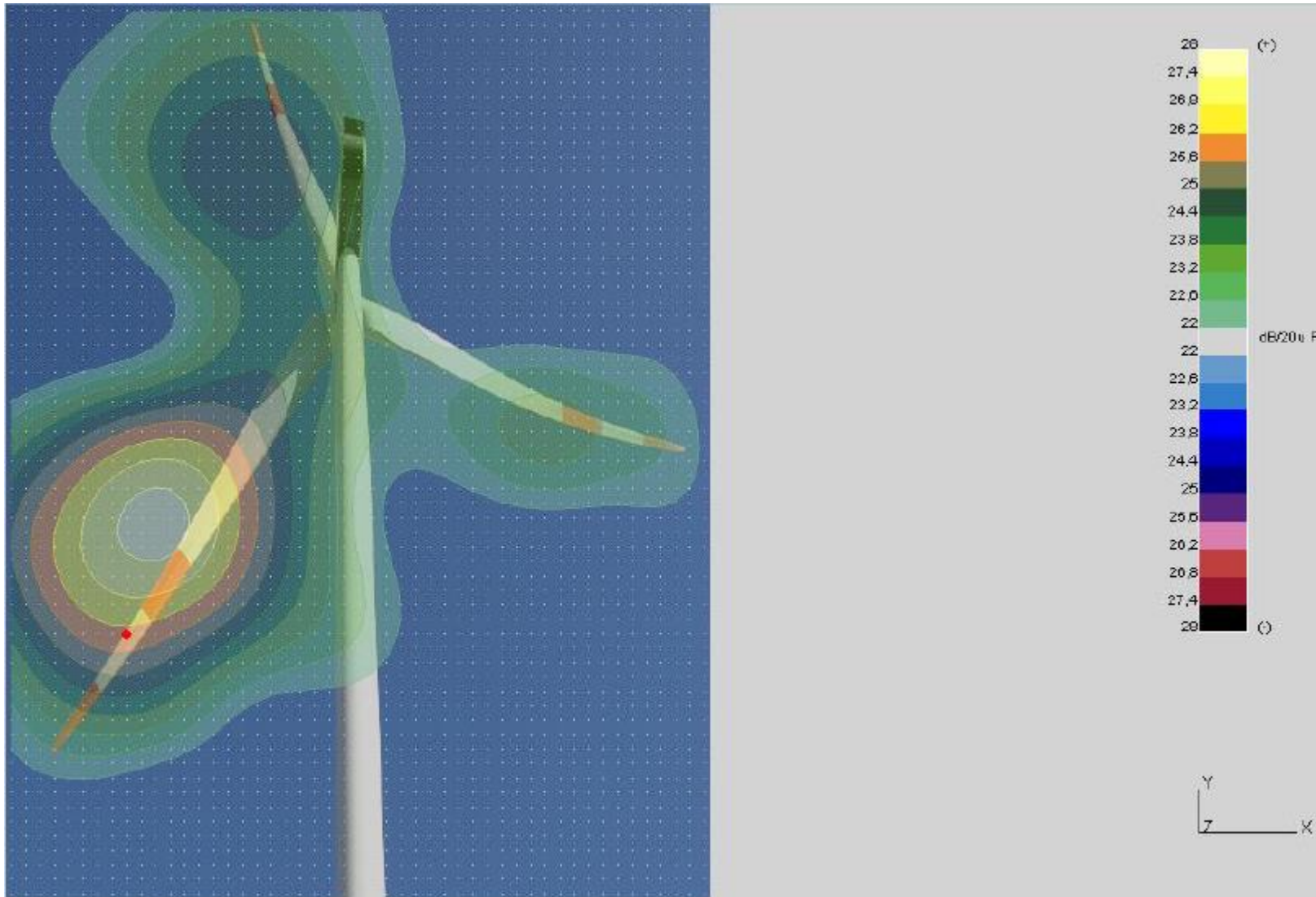
Figure 34. Contours of RMS of pressure fluctuation

entnommen aus Jiang et al. (2007) „Large Eddy Simulation of Wing Tip Vortex in near the Field“

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte experimentelle Ergebnisse

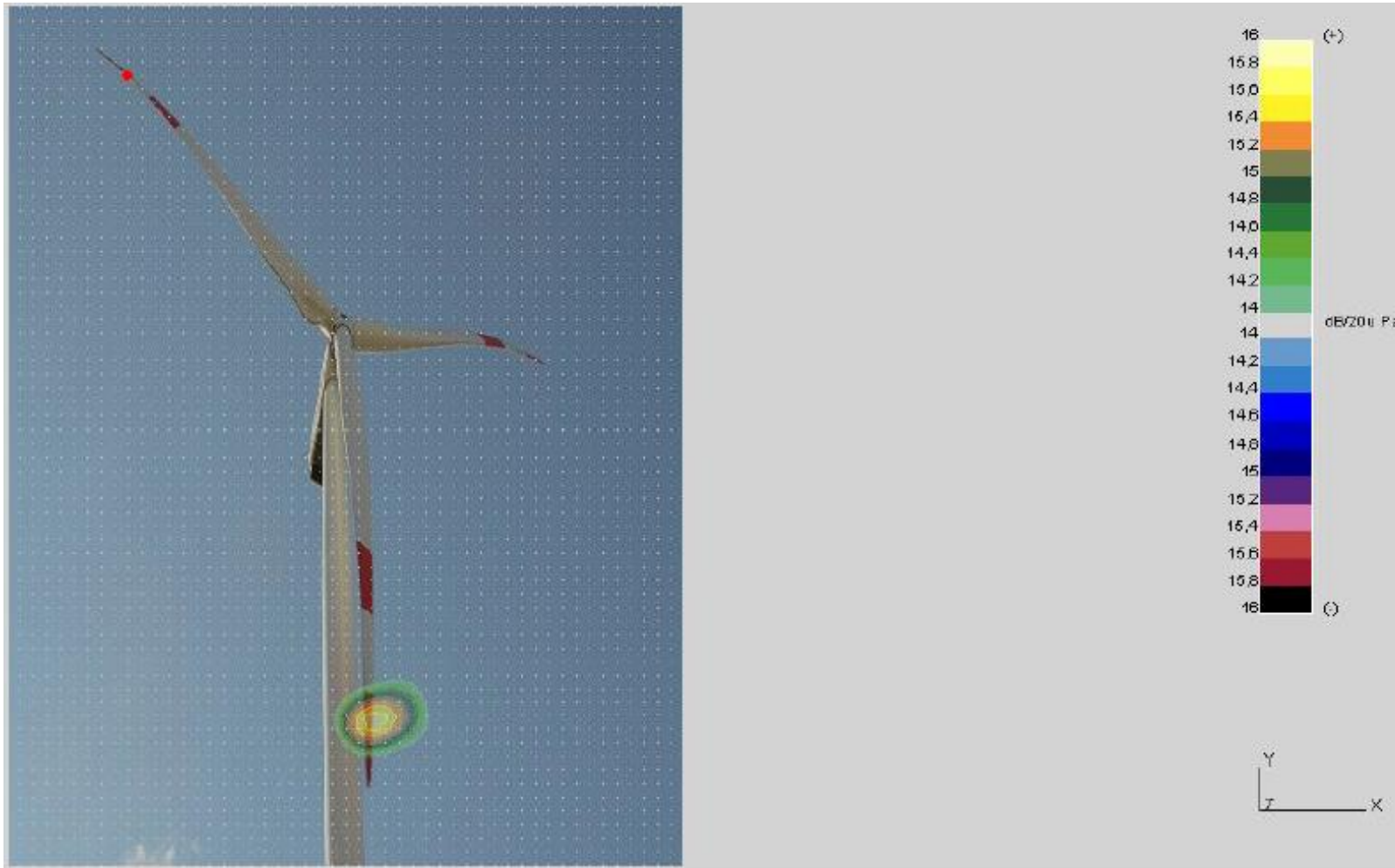


Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte experimentelle Ergebnisse



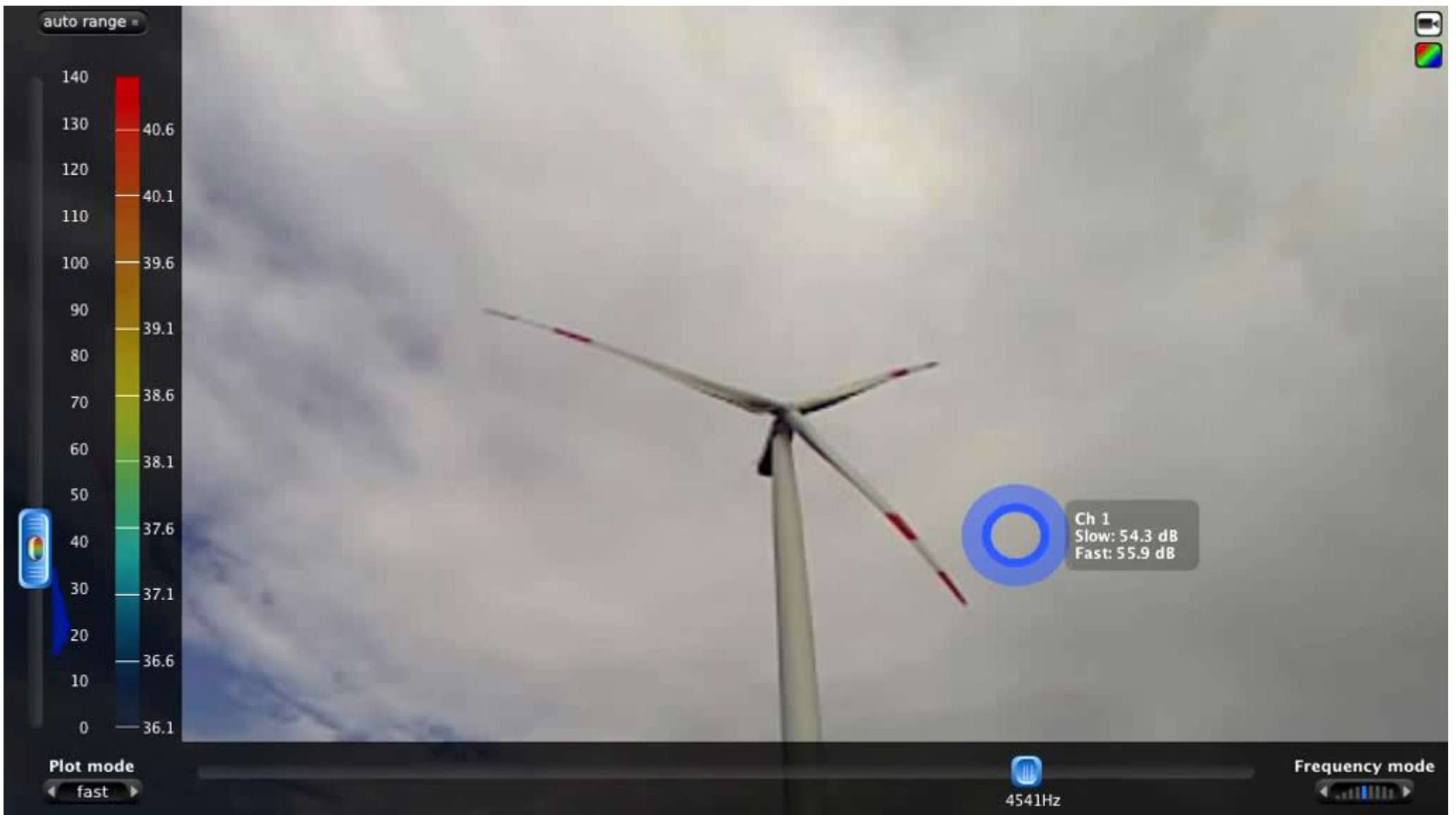
Blattgeräusche am mittleren Profilabschnitt (Momentaufnahme der Schalldruckverteilung zwischen 2 -3 kHz)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte experimentelle Ergebnisse



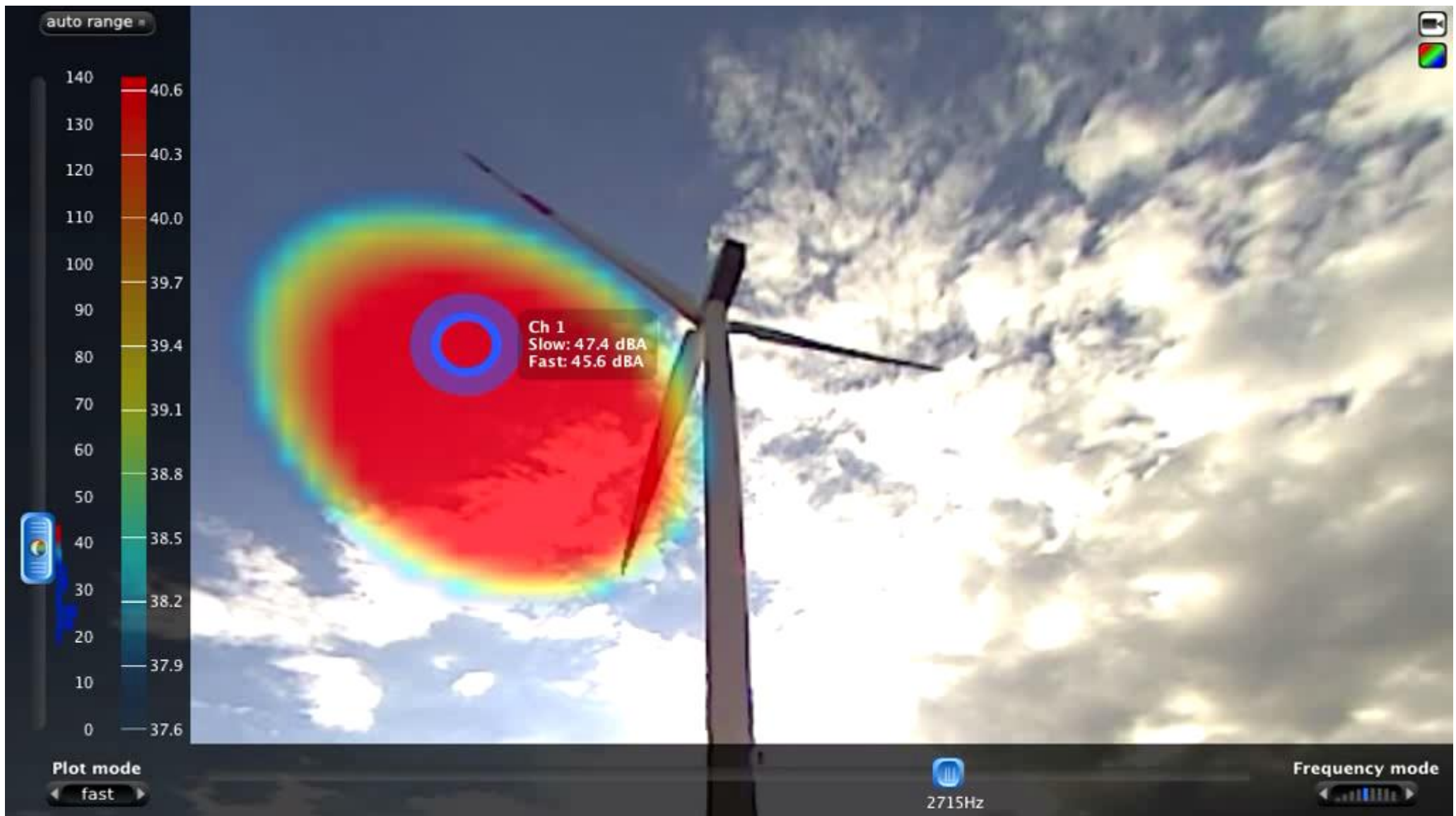
Blattgeräusche an der Blattspitze (Momentaufnahme der Schalldruckverteilung zwischen 4 - 5 kHz)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte experimentelle Ergebnisse



Blattgeräusche an der Blattspitze (Momentaufnahme der Schalldruckverteilung bei 4.5 kHz)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch aerodynamische Effekte experimentelle Ergebnisse



Blattgeräusche mittlerer Blattbereich (Momentaufnahme der Schalldruckverteilung bei 2.7 kHz)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch mechanische Komponenten (Körperschall)



Hauptanregungsquellen

- Getriebe (Planetengetriebe 2-3 stufig)
- Generator
- Sekundär Einrichtungen wie Lüfter etc.

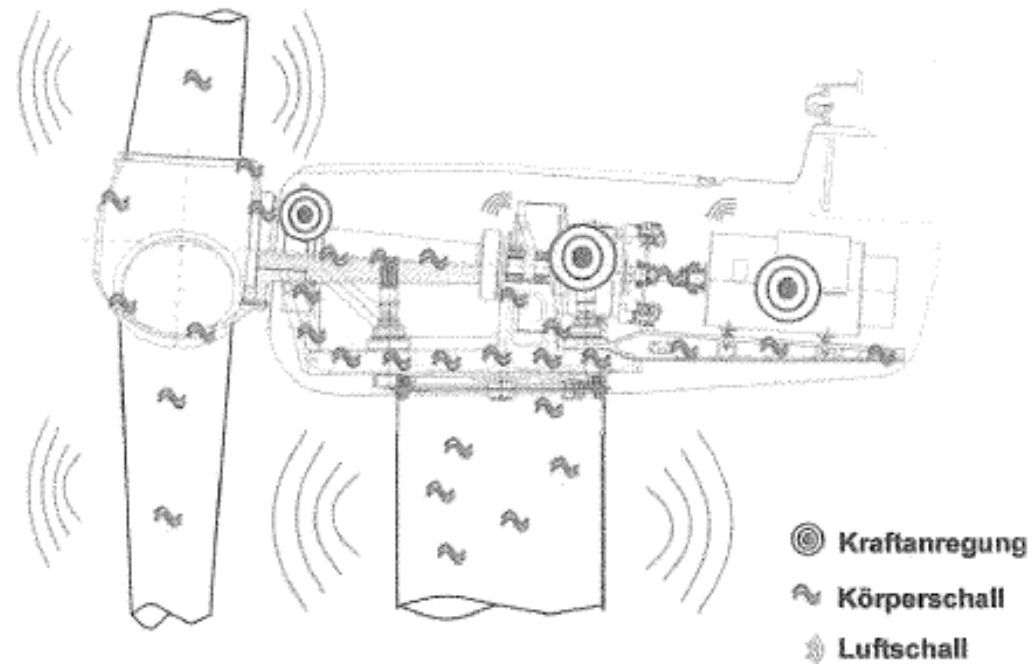
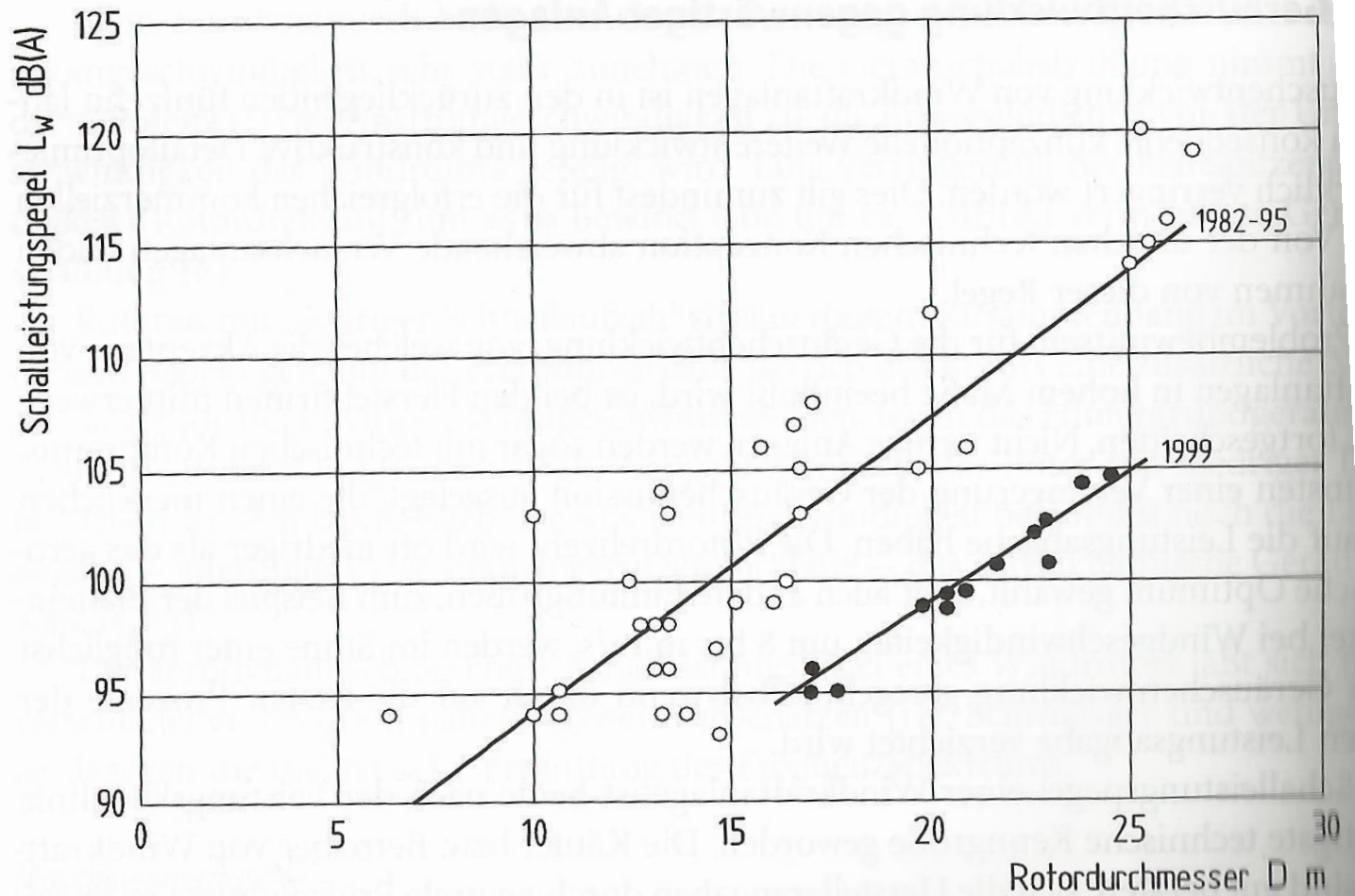


Abbildung 3-5: Schallentstehung bei einer WEA [7]

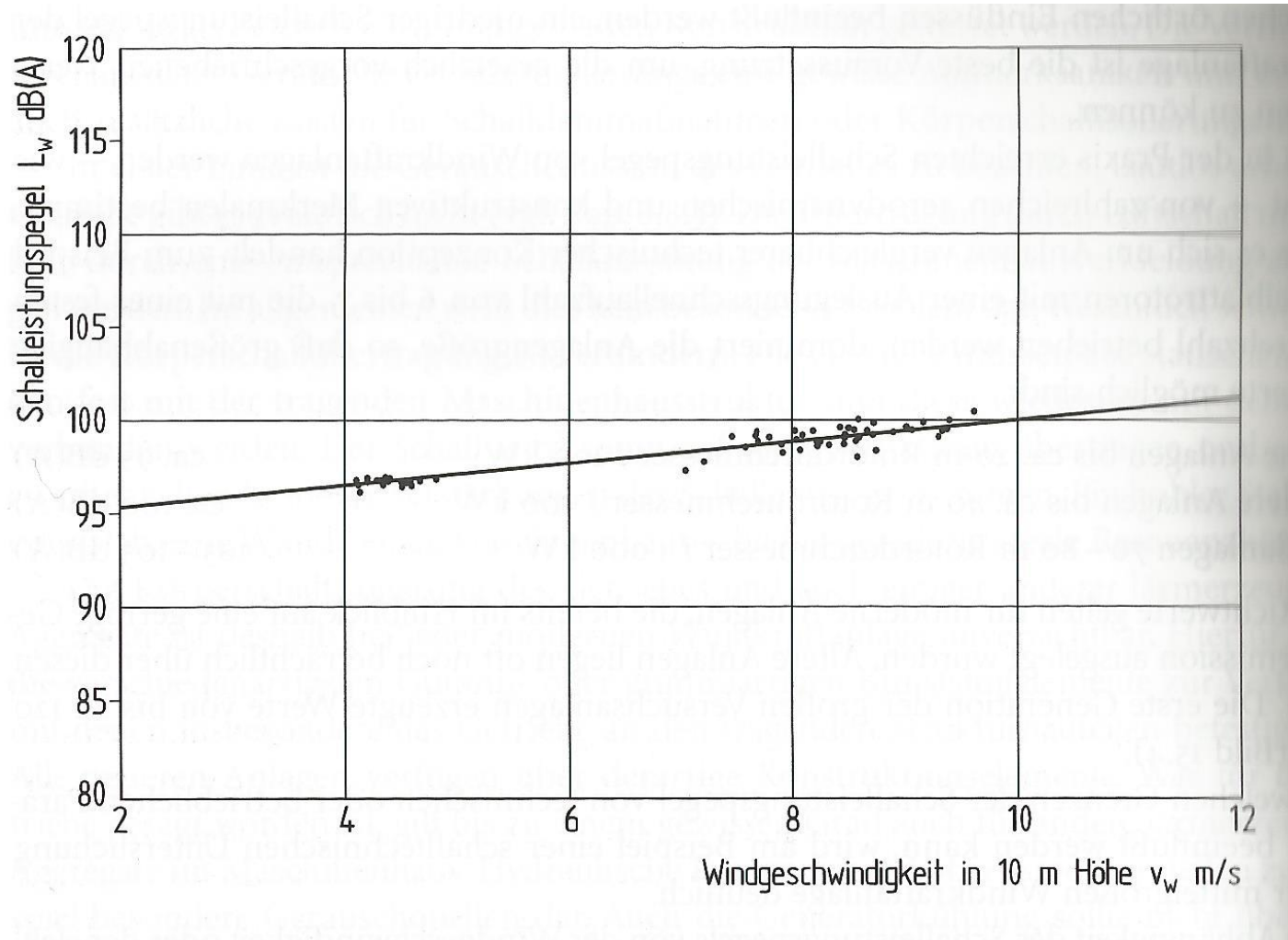
Entnommen aus Wittor und Jacek „Getriebeakustik bei Windenergieanlagen“

- Beeinflussung der Umströmung von Tragflügelprofil, Blattspitze und Nabe
- Beeinflussung der Umströmung des Turmes und der Wechselwirkungen zwischen Turm und Rotor
- Beeinflussung der Schallerzeugung der Maschinen und Geräte in der Gondel und/oder der Schallabstrahlung über die Gondel
- Beispiele:
 - Vermeidung von Ablösung auf der Tragflügelprofil-Oberfläche
 - Beeinflussung der Hinterkantenabströmung
 - Reduktion des Widerstands der verwendeten Tragflügelprofile



Nordex N117
 Rotordurchmesser 117 m
 $L_w = 105$ dB!
 Stand 2014

entnommen aus Hau „Windkraftanlagen“: Schalleistung von Windkraftanlagen in Abhängigkeit des Rotordurchmessers



entnommen aus Hau „Windkraftanlagen“: Analge Tacke TW-600 (600 kW 18 U/min)

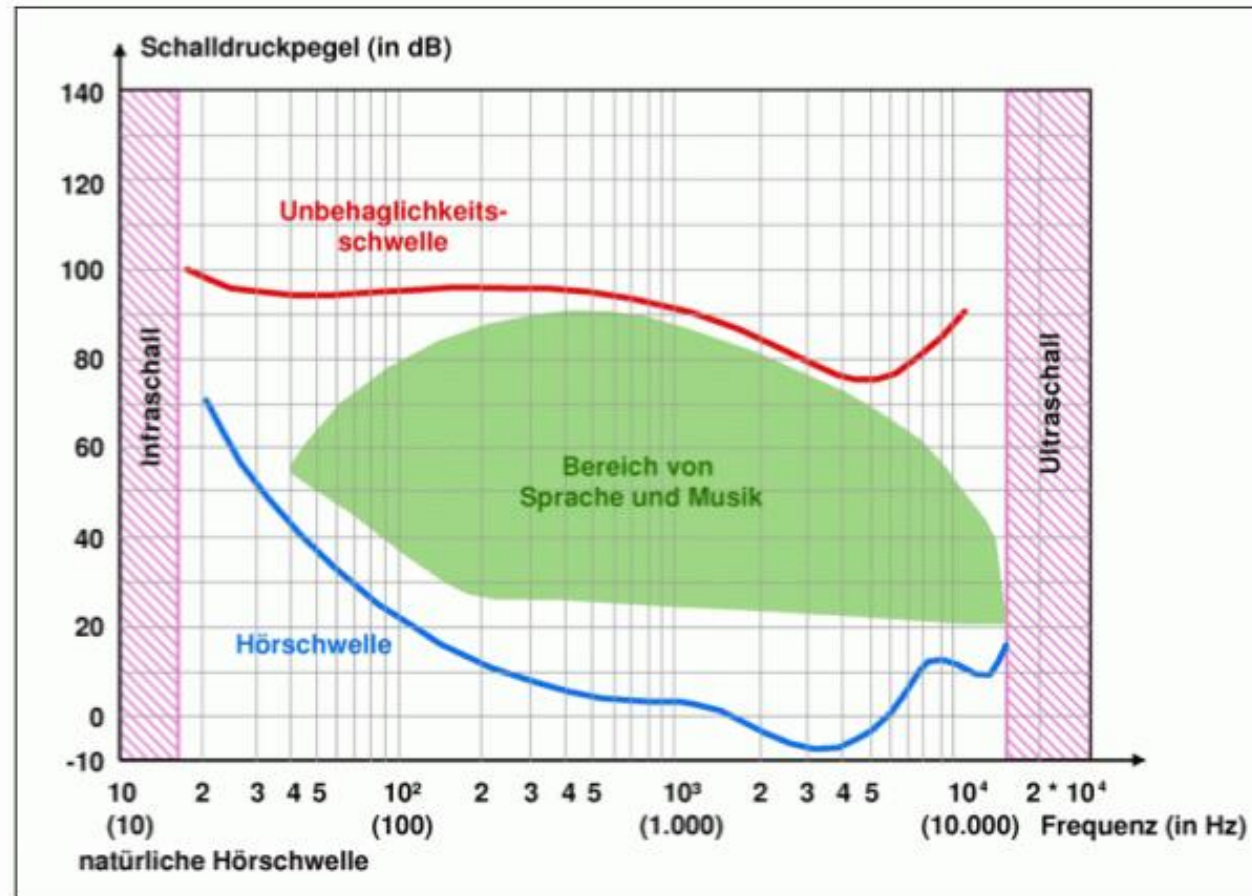


Abb. 1: Hörbereich des Menschen (Quelle: [DNR (2010)])

entnommen aus: Hintergrundbericht „Schallemission von Windenergieanlage“, Fachagentur Windenergie

- tieffrequenter Schall: Luftschall mit Frequenzen $f < 100$ Hz
- Infraschall: Luftschall mit Frequenzen $f < 20$ Hz
- Infraschall ist sehr langwellig und kann übliche Schallschutzmassnahmen nicht gedämmt werden.
- Tieffrequenter Schall ist vom Menschen teilweise noch hörbar, Infraschall nicht.
- Infraschall kann vom Menschen trotzdem wahrgenommen werden. Diese wird über die Wahrnehmungsschwelle definiert.

- WKA emittieren Infraschall, der z.B. durch Vibrationen der Flügel und des Turms erzeugt wird.
- Nach jetzigem Kenntnisstand, kann Infraschall erst nach Überschreiten der Hörschwelle gesundheitliche Auswirkungen haben.
- WKA emittieren keinen hörbaren Infraschall.

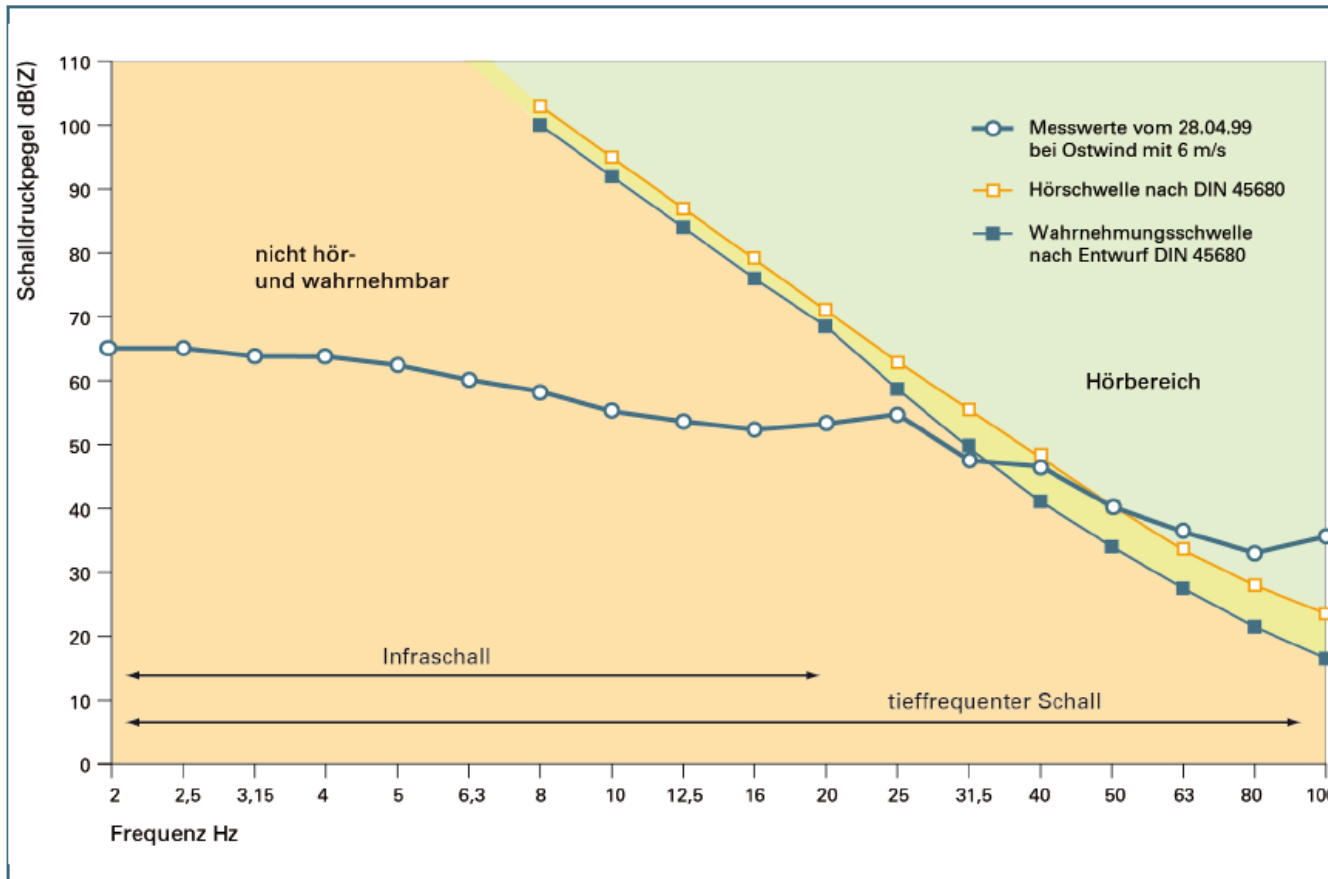


- Umströmung der Turmstruktur → Turm wird **idealisiert!** als langer Zylinder betrachtet.
- Ablösefrequenz im Bereich $0.17 < Sr < 0.22$ zu erwarten

Anströmgeschwindigkeit: $U=7$ m/s;

Mittlerer Turmdurchmesser $D = 4$ m

Annahme: $Sr = 0.21 \rightarrow f_{\text{Ablösung}} = 0,36$ Hz → **Infraschall**



Tab. 2: Infraschallpegel im Abstand von 250 m zu einer 1-MW-Windkraftanlage bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Windgeschwindigkeit	Schalldruckpegel ⁸ bei einer Frequenz ⁹ von				
	8 Hz	10 Hz	12,5 Hz	16 Hz	20 Hz
6 m/s mäßige Brise, die gemessenen Geräusche stammen überwiegend von der Windkraftanlage	58 dB(Z) ¹⁰	55 dB(Z)	54 dB(Z)	52 dB(Z)	53 dB(Z)
15 m/s starker bis stürmischer Wind, die gemessenen Geräusche stammen überwiegend vom Wind	75 dB(Z)	74 dB(Z)	73 dB(Z)	72 dB(Z)	70 dB(Z)

Abb. 5: Das untersuchte Windrad erzeugt Schallwellen, die von auf einem Balkon in 250 Metern Entfernung stehenden Menschen nur oberhalb 40 Hertz gehört werden können. Der Infraschallbereich ist hier nicht wahrnehmbar, da er unterhalb der Hör- und Wahrnehmungsschwelle liegt⁷.

entnommen aus einer Studie des Bayerischen Landesamts für Umwelt: Windkraftanlagen – beeinflusst Infraschall die Gesundheit? :



Hauptanregungsquellen

- Getriebe (Planetengetriebe 2-3 stufig)
- Generator
- Sekundär Einrichtungen wie Lüfter etc.
- Wellenlager

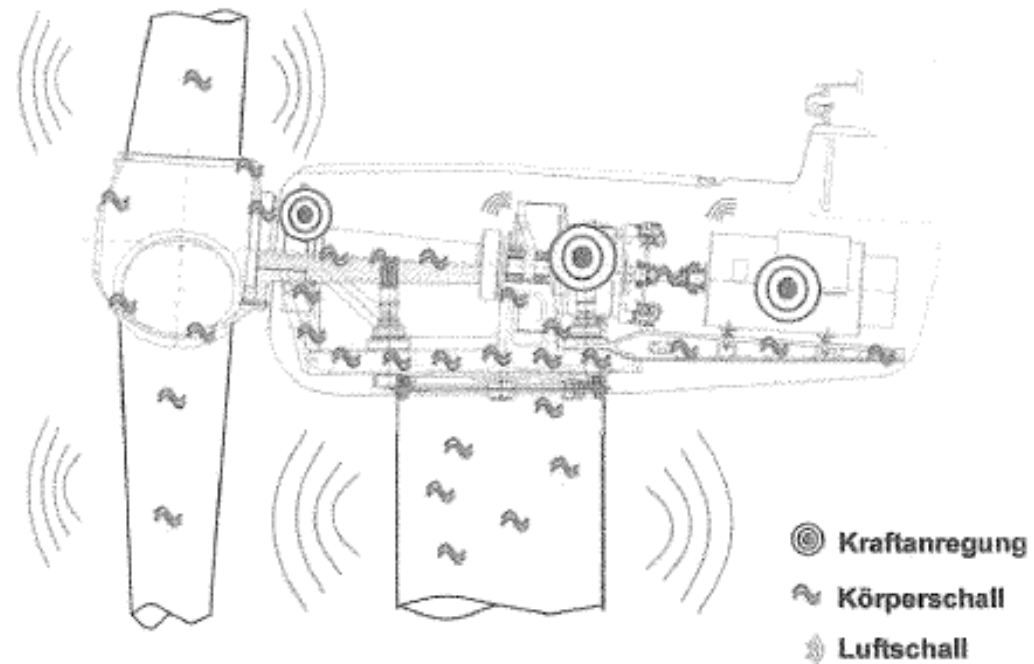


Abbildung 3-5: Schallentstehung bei einer WEA [7]

Entnommen aus Wittor und Jacek „Getriebeakustik bei Windenergieanlagen“

Zahneingriffs-Stoß

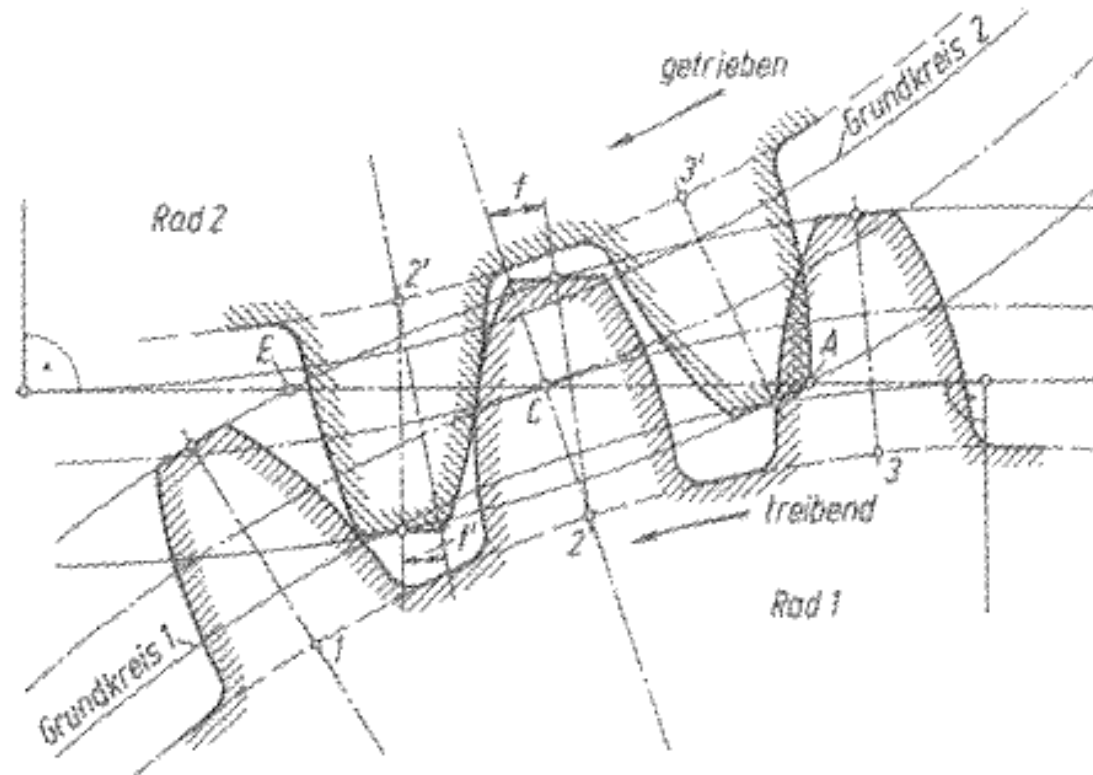


Abbildung 3-4: Schwingungsanregung im Getriebe durch Zahneingriffsstoß [7]

entnommen aus Wittor und Jacek „Getriebeakustik bei Windenergieanlagen“

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch mechanische Komponenten Getriebe



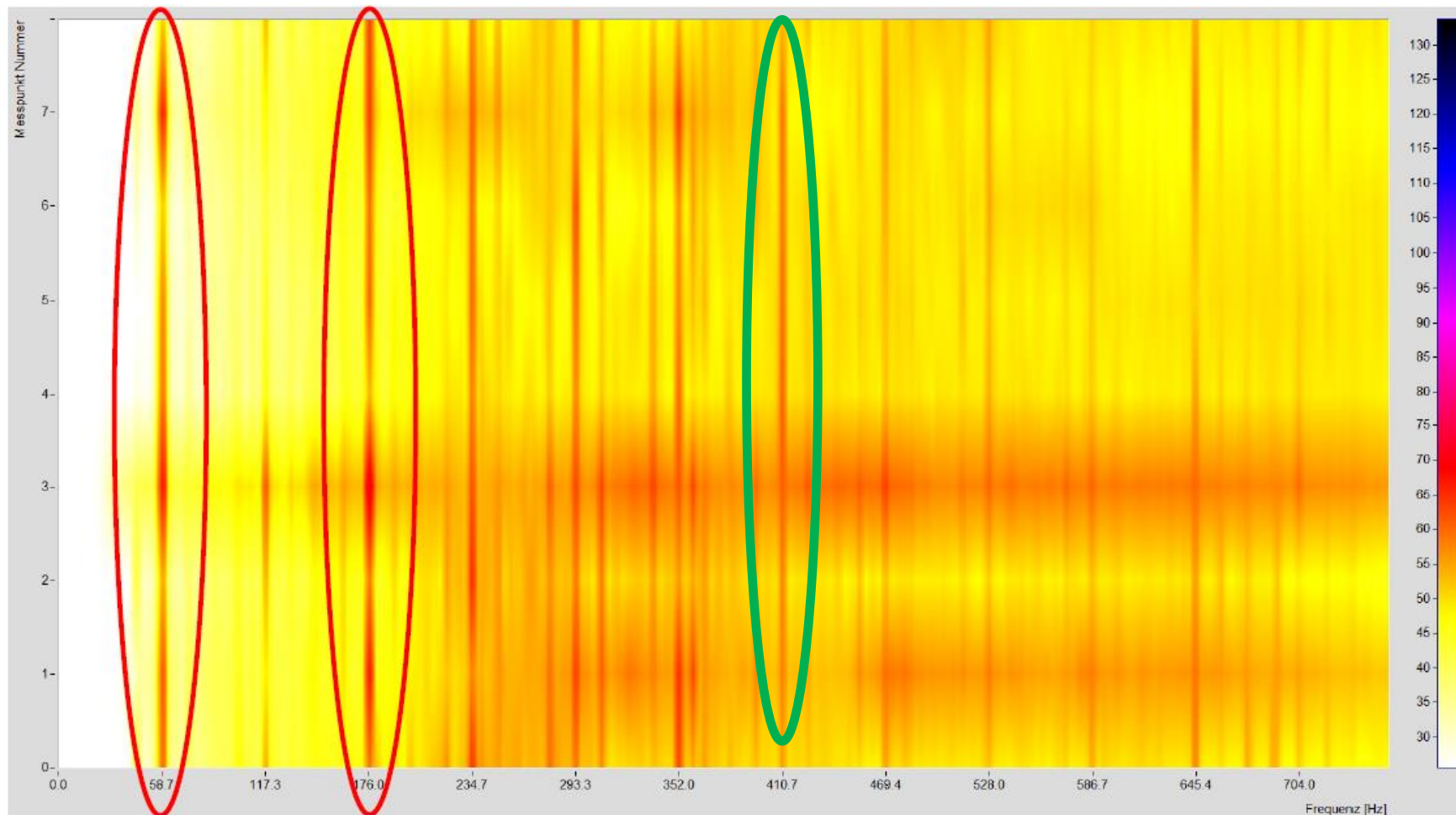
Zahneingriffsfrequenz der zweiten Getriebestufe wird über die Turmstruktur abgestrahlt $f = 256 \text{ Hz}$

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch mechanische Komponenten Gondellüfter für Getriebe- und Generatorkühlung



Entnommen aus Torkler (Studienarbeit)

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch mechanische Komponenten Gondellüfter für Getriebe- und Generatorkühlung



entnommen aus Torkler (Studienarbeit)
Ergebnisse der Frequenzanalysen als Skalogramm
X - Achse = Frequenzachse
Y - Achse = Mikrofonnummer
Farbekodierung entspricht dem A-bewerteten Schalldruckpegel

Hauptmechanismen der Schallentstehung an WEA durch mechanische Komponenten Gondellüfter für Getriebe- und Generatorkühlung

