

cdf Schallschutz | D. Friedemann

Spreewindtage Potsdam

Windenergieanlagen
Schalltechnische Messungen und
Schallimmissionsprognosen

Dipl.-Ing. Lorenz Wiedemann

Potsdam, November 2023

Unser Leistungsspektrum



Bau- und Raumakustik

Erstellung von Schallschutznachweisen des bauaufsichtlich geforderten Mindestschallschutzes.



Schallimmissionsschutz

Für Industrie-, Gewerbe- und Sportanlagen gelten Richtwerte, die den Schutz der Anwohner vor zu hoher Geräuschimmission sicherstellen sollen.



Passiver Lärmschutz

Wir unterstützen Sie bei der Überprüfung und Abwicklung des passiven Schallschutzes.



Maschinen, Anlagen, Fahrzeuge

Schall- und schwingungstechnische Untersuchungen an Maschinen, Anlagen, Geräten und Fahrzeugen.



Erschütterungsschutz

Erschütterungen bei Straßenbaumaßnahme, auf Baustellen mit Abbruch und Verdichtungsarbeiten u.ä.

Kontakt zu uns

cdf Schallschutz

Inhaber: D. Friedemann
Alte Dresdner Straße 54
01108 Dresden

Telefon: +49 351 - 8 80 90 57
Telefax: +49 351 - 8 80 90 66

E-Mail: info@cdf-schallschutz.de

Vortragsgliederung:

- **Grundlagen der Akustik**
- **Schallemission - Ausbreitung – Schallimmission**
- **Schallimmissionsprognose nach TA Lärm**
- **Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW**
- **Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens**

Grundlagen der Akustik

Akustik: Lehre vom Schall

Schalldruck = Wechselgröße um den statischen Luftdruck

Schalldruckpegel L_p in dB(A) am Ohr

Schalleistungspegel L_w in dB(A) der Quelle

Wellenlänge in cm

Frequenz in Hz

A-Bewertung = Anpassung an die Gehörempfindung

Schall: in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern

Grundlagen der Akustik

Lärm:

„Lärm ist jede Art von Schall, der stört oder belästigt oder die Gesundheit schädigen kann.“ (WHO, 1972)

Lärm ⇒ subjektive Empfindung, abhängig von

- Schalldruckpegel
- Zeitverlauf (kontinuierlich, Einzelereignisse)
- Frequenzzusammensetzung (tonal, breitbandig)
- Einstellung zum Lärm (erwünscht / unerwünscht)
- gesundheitliche Situation (Disco, Krankenhaus...)

Schall ⇒ objektive physikalische Parameter

Grundlagen der Akustik

Schalldruckpegel

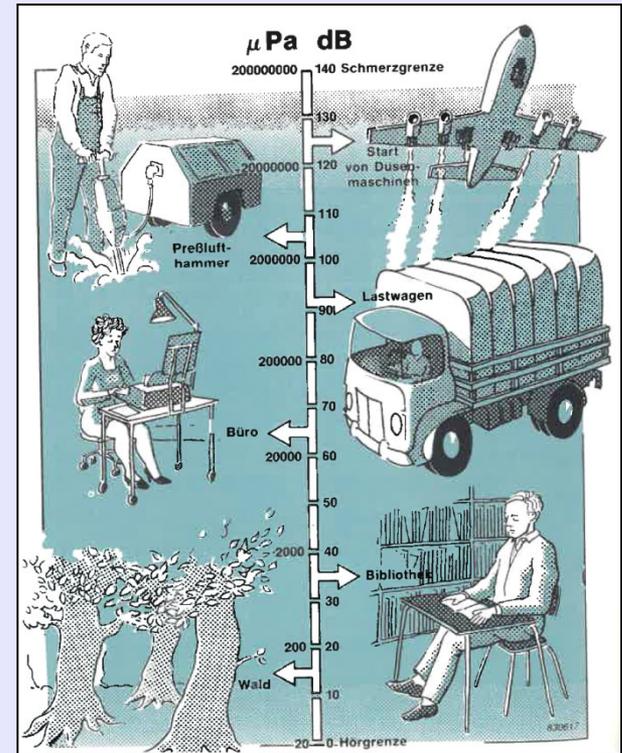
Schalldruck p in N/m^2 (Wertebereich $10^{-5} \dots 10^2$ ist unpraktisch)



Schalldruckpegel L_p in dB

Pegel = Verhältnis von Schalldrücken,
bezogen auf die Hörschwelle des
Menschen bei 1000 Hz ($2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$)

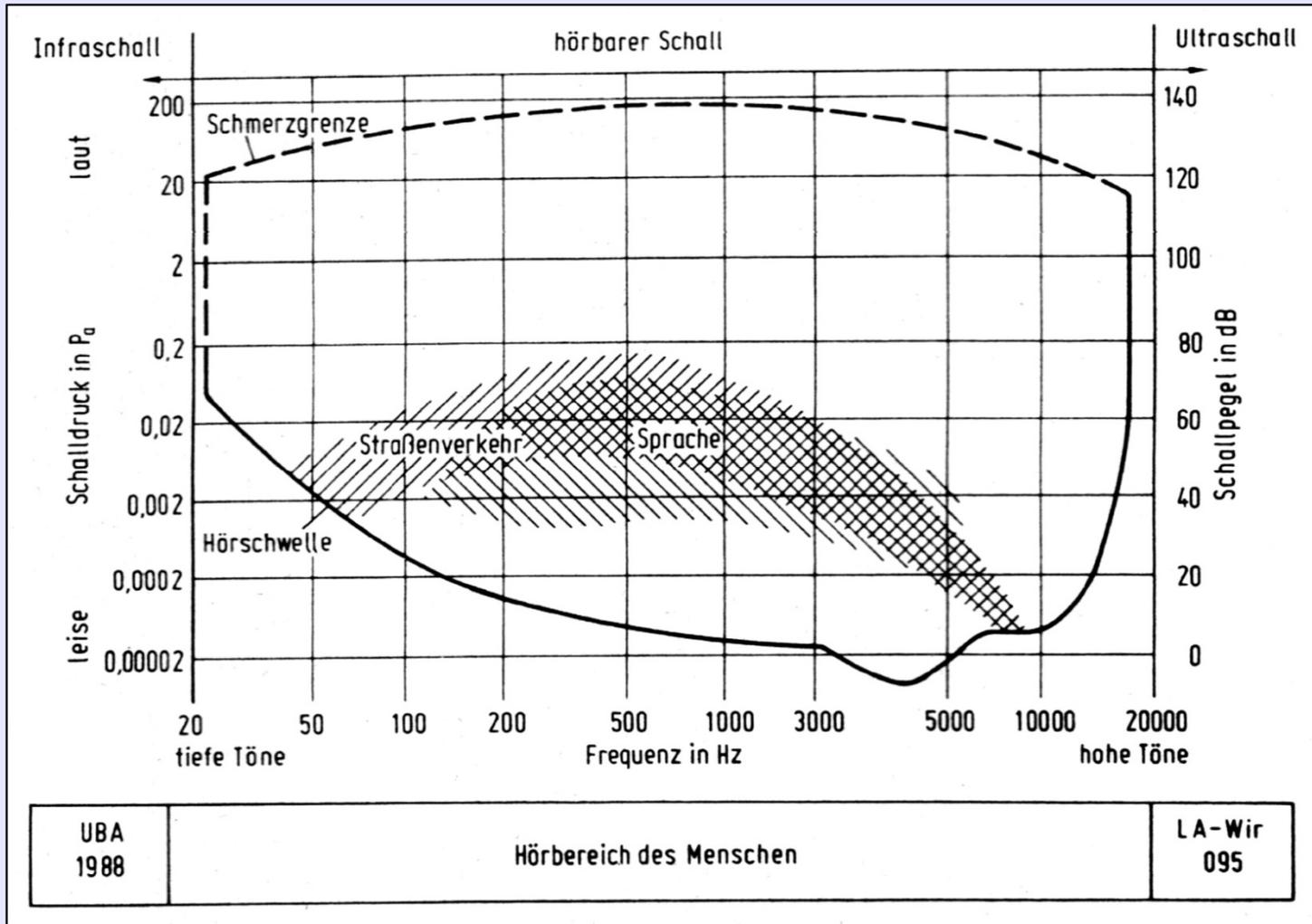
$$L_p = 20 \log (p / p_0) \text{ dB}$$



→ nimmt mit dem Abstand zur Geräuschquelle ab

Grundlagen der Akustik

Schalldruckpegel



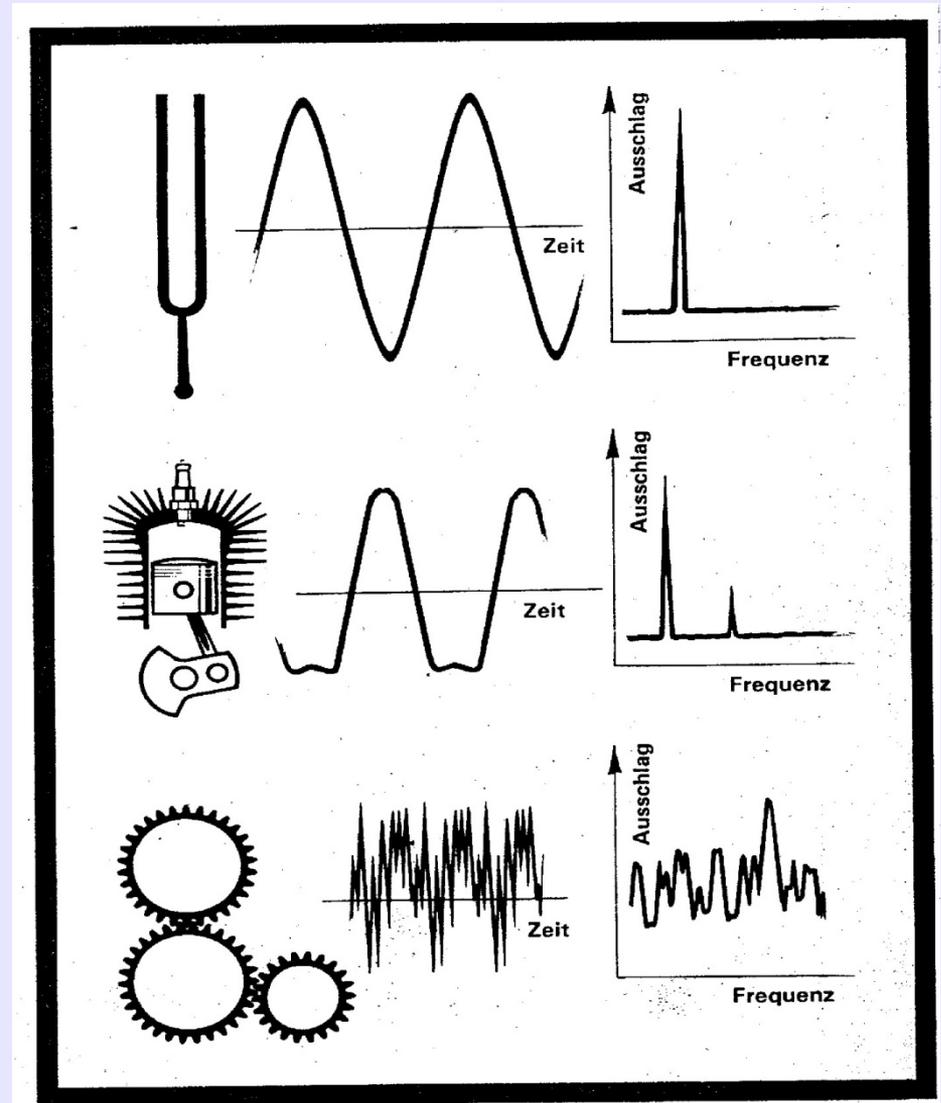
Grundlagen der Akustik

Schalldruckpegel

Alle zeitlich schwankenden, periodischen Größen können durch **Zeitverlauf** und **Frequenzspektrum** beschrieben werden.

Messtechnik:

Terzband-, Oktavband- oder
FFT-Linienanalyse



Grundlagen der Akustik

Schalldruckpegel

Logarithmische **Addition** von Schalldruckpegeln

$$L_{\text{ges}} = 10 \log (10^{0,1 L_1} + 10^{0,1 L_2}) \text{ in dB}$$

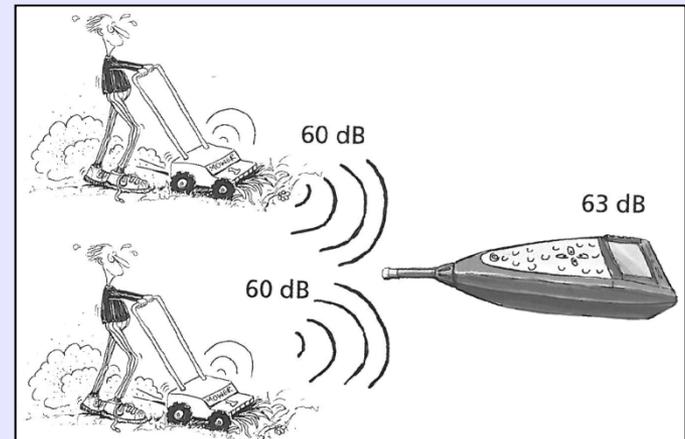
Das bedeutet:

$$60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 63 \text{ dB}$$

Zwei gleichlaute Quellen addiert
ergeben einen 3 dB höheren Pegelwert.

$$60 \text{ dB} + 50 \text{ dB} = 60,4 \text{ dB}$$

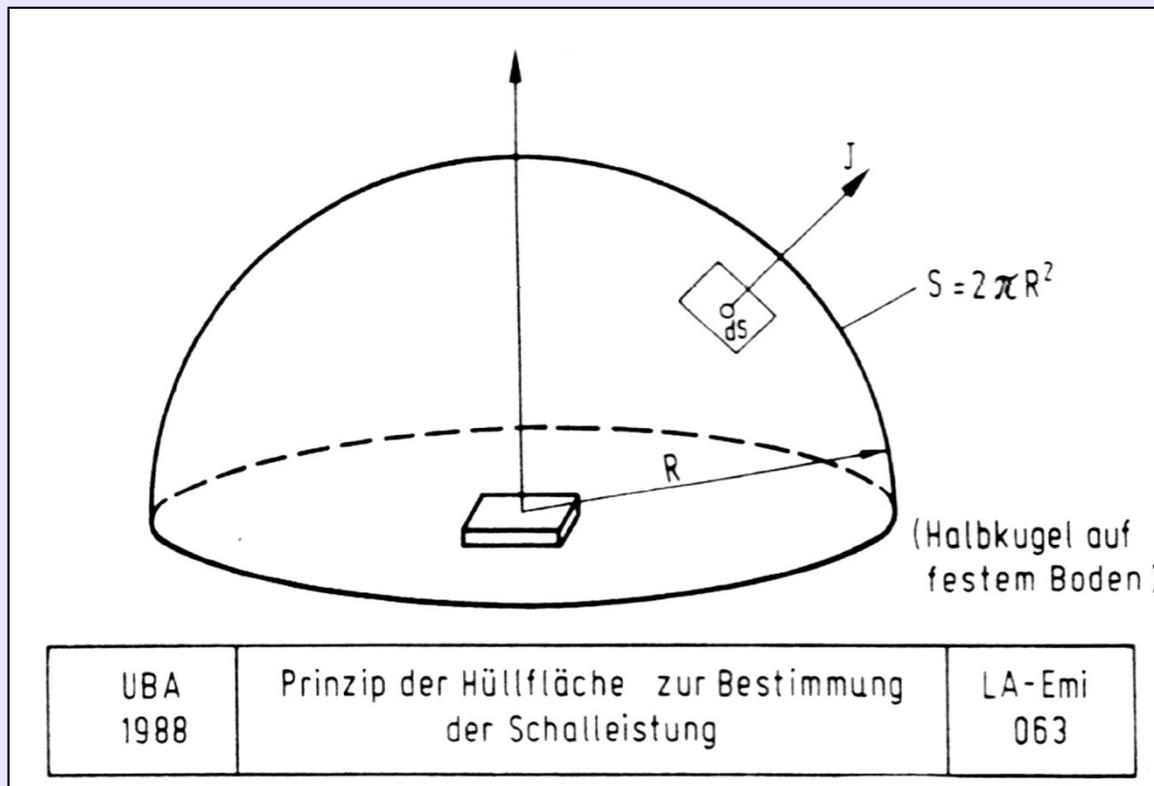
Ein um 10 dB leiseres Fremdgeräusch erhöht den Gesamt-
Messwert um 0,4 dB gegenüber dem „wahren Wert“.



Grundlagen der Akustik

Schalleistungspegel

- Quellgröße, die die abgestrahlte Schallenergie beschreibt
- unabhängig vom (Mess-)Abstand zur Schallquelle



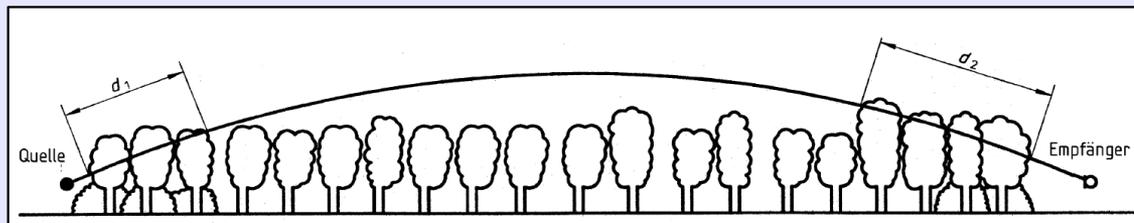
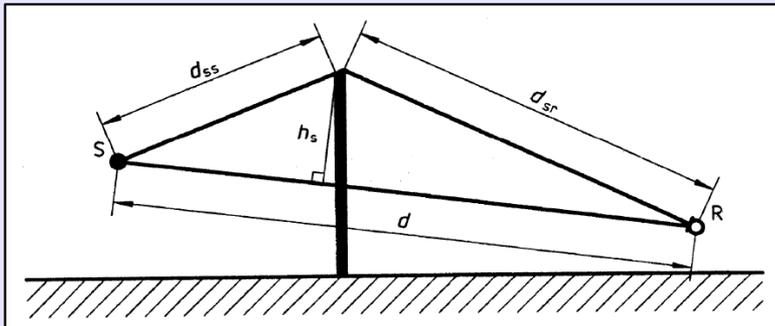
$$L_W = L_p + 10 \log (S/m^2) \text{ dB}$$

Schallemission - Ausbreitung - Schallimmission

Weg von der Schallquelle zum Empfänger (Immissionsort)

Pegelminderung tritt ein durch:

- Abstand
- Abschirmung (Gebäude, Lärmschutzwand)
- Schallabsorption im Boden und in der Luft (sehr gering)



Schallemission - Ausbreitung - Schallimmission

Schalldruckpegel-Minderung

Entfernungsverdopplung:

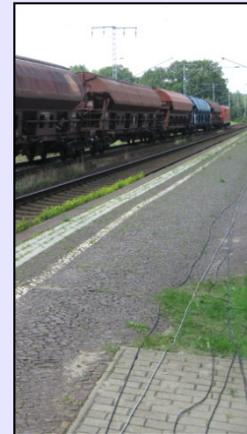
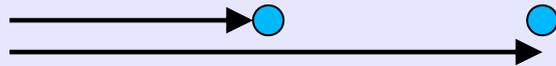
bei **Punkt**schallquellen **6 dB**

bei **Linien**quellen **3 dB**



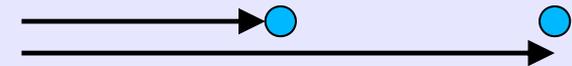
50 dB(A)
100 m

44 dB(A)
200 m



50 dB(A)
100 m

47 dB(A)
200 m



Schallemission - Ausbreitung - Schallimmission

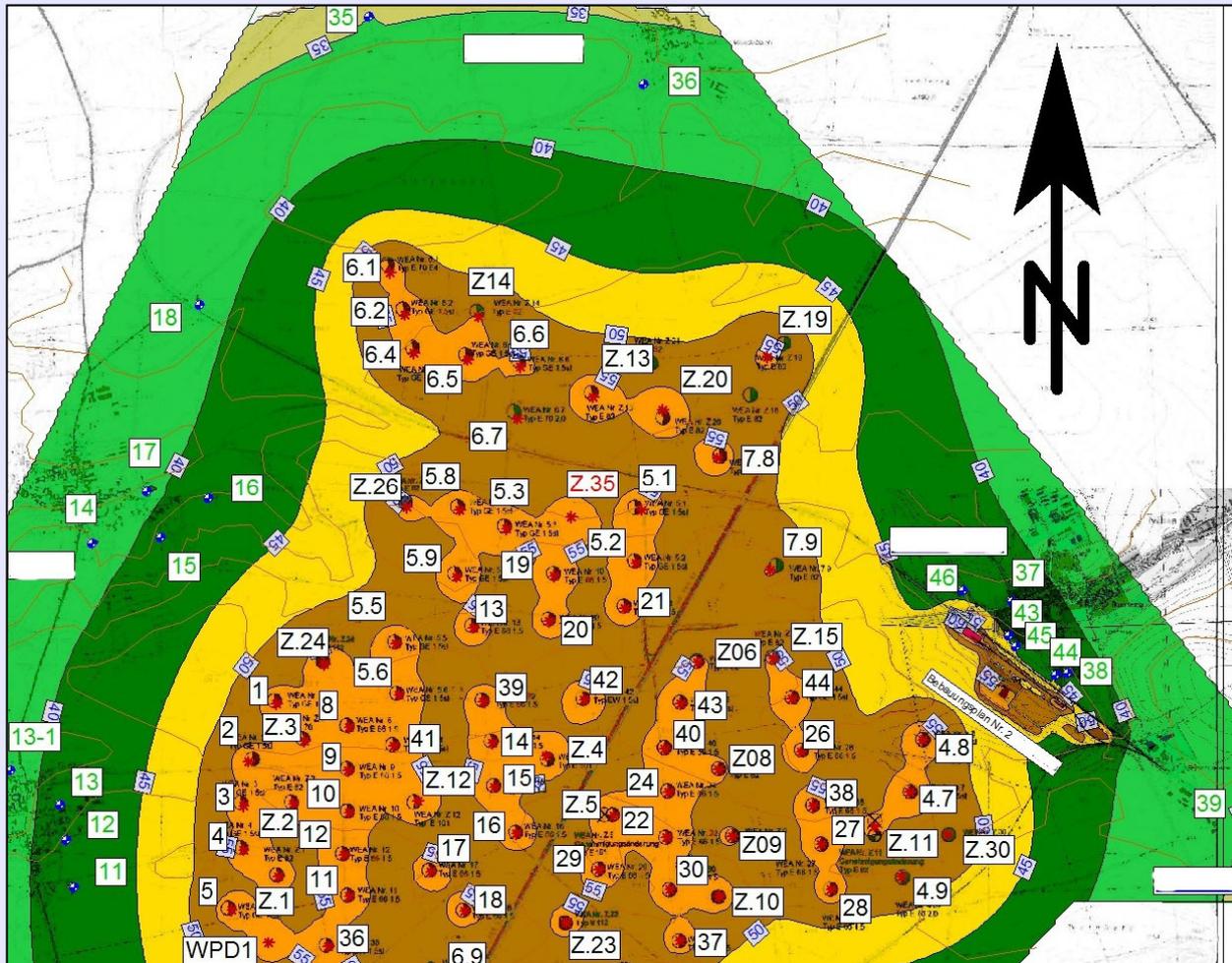
Schall-Immissionsrichtwerte

Tabelle 1 Richtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden nach TA Lärm, 6.1

	Gebietseinstufung nach BauNVO	Immissionsrichtwerte in dB(A)	
		Tag	Nacht
a)	Industriegebiete - GI Gebiete, in denen nur gewerbliche oder industrielle Anlagen und Wohnungen für Inhaber oder Aufsichtspersonen untergebracht sind	70	70
b)	Gewerbegebiete - GE Gebiete, in denen vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind	65	50
c)	Urbane Gebiete - MU Gebiete mit gewerblichen, sozialen, kulturellen und anderen Nutzungen und Wohnungen	63	45
d)	Kerngebiete - MK, Dorfgebiete - MD, Mischgebiete - MI Gebiete mit gewerbl. Nutzungen und Wohnungen, mit weder vorwiegend gewerbl. Anlagen noch vorwiegend Wohnungen	60	45
e)	Wohngebiete - WA Gebiete, in denen vorwiegend Wohnungen untergebracht sind	55	40
f)	Reine Wohngebiete - WR Gebiete, in denen ausschließlich Wohnungen untergebracht sind	50	35
g)	Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45	35

Schallemission - Ausbreitung - Schallimmission

Schallimmissionsprognose - Rasterlärnkarte



Pegelwerte
LrN
in dB(A)

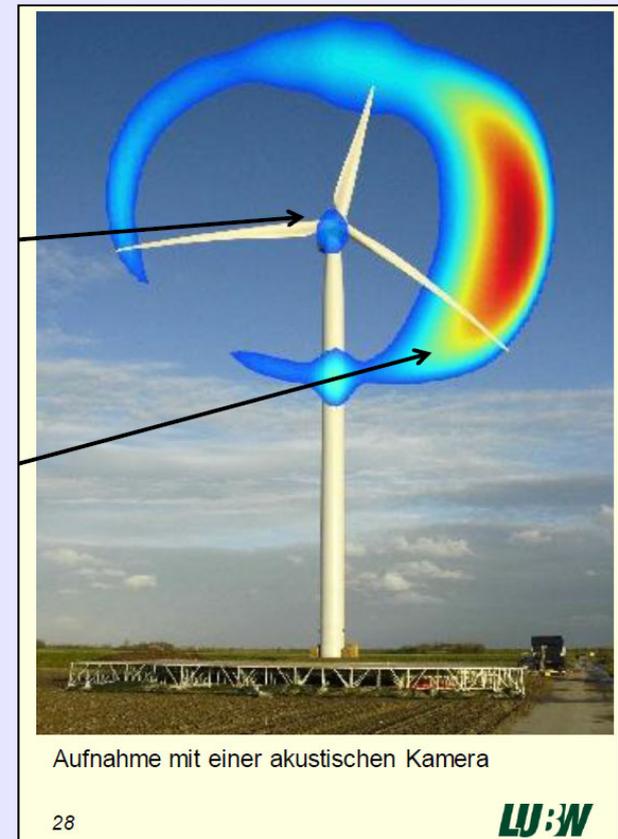
	<= 35
	35 < <= 40
	40 < <= 45
	45 < <= 50
	50 < <= 55
	55 < <= 60
	60 < <= 65
	65 <

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Schalleistungspegel einer Windenergieanlage

Geräuschquellen:

- Rotorblätter (Strömung)
- Getriebe, Generator
- Gebläse/Kühlung
- Turmmantel (selten, nur bei getriebebedingtem Körperschall)
- Azimutantrieb u.ä. (ohne Bedeutung, da nur kurzzeitig in Betrieb)



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Vorschriften / Normen

DIN EN 61400 Teil 11



NORM [AKTUELL]
DIN EN 61400-11:2019-05;VDE
0127-11:2019-05
VDE 0127-11:2019-05
Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren
(IEC 61400-11:2012 + A1:2018); Deutsche Fassung EN 61400-11:2013 +
A1:2018
Englischer Titel:
Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques
(IEC 61400-11:2012 + A1:2018); German version EN 61400-11:2013 +
A1:2018

Richtlinie der FGW:

Technische Richtlinien für Windenergieanlagen

TEIL 1 (TR 1)
Bestimmung der Schallemissionswerte

FGW e.V.
Fördergesellschaft Windenergie
und andere Dezentrale Energien



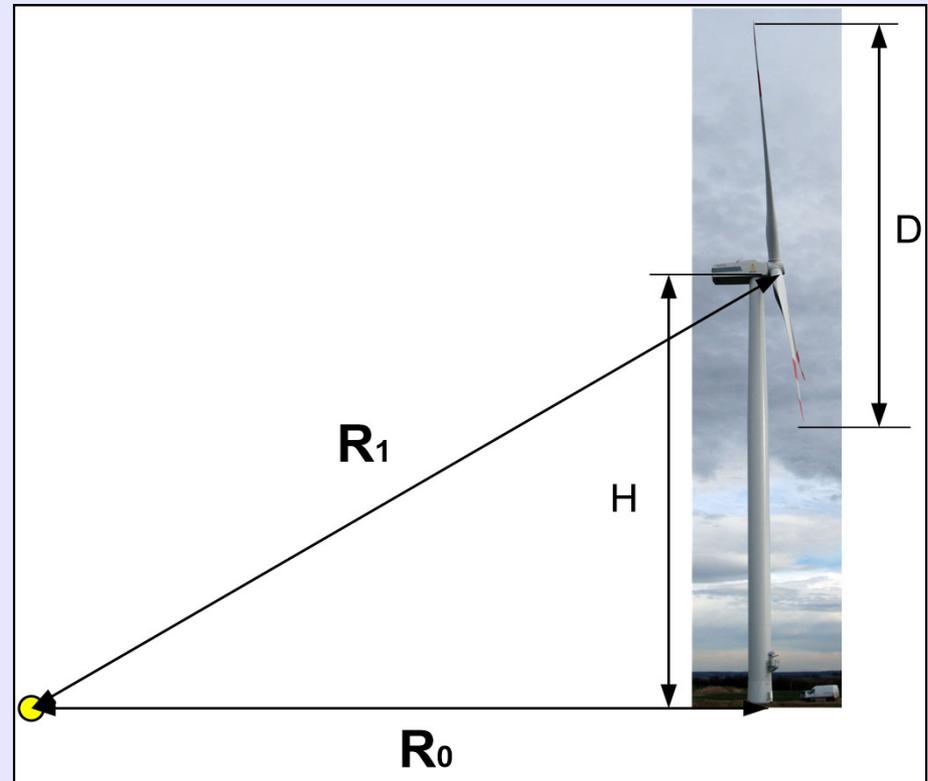
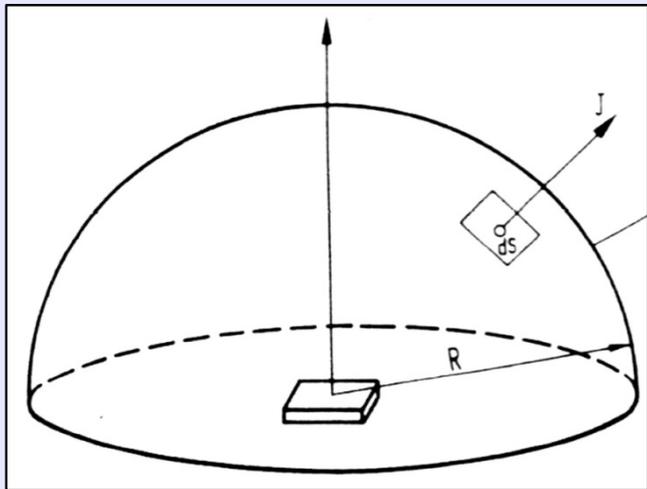
Revision 19
Stand 01.03.2021

- seit dem Wechsel zur „Ed. 3“ erheblich aufwendigere Auswertung
(frequenzabhängige Fehlerbetrachtung, Windklassen 0,5 m/s)

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Schalleistungspegel einer Windenergieanlage

Messgröße: Schalldruckpegel auf einer Hüllfläche mit dem Radius $R = H + D/2$ als **Vollkugel** um die Schallquelle



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW**Feinkorrekturen zum Abstand $R_0 = H + D/2$:**

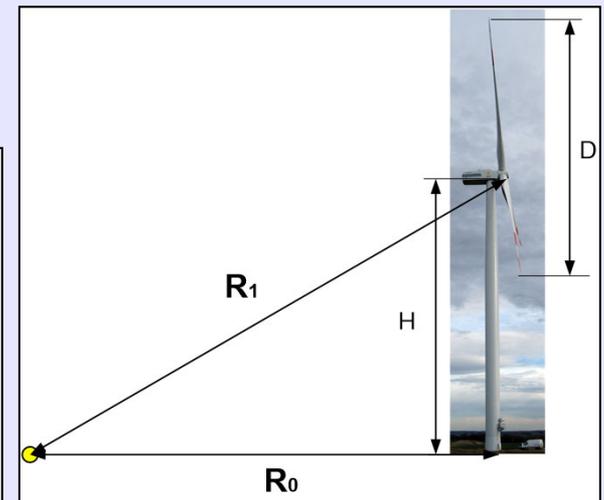
- **akustisches Modell: Punktschallquelle an der Rotornabe, wirksamer Abstand ist R_1**
- **Distanz Nabe - Turmmittellinie (meist 3...5 m)**
- **Höhenkorrektur bei Hanglage des Schall-Messpunktes**
- **Toleranz von $\pm 20\%$ für R_0 und $\pm 15^\circ$ für Richtung zulässig**

Schalleistungspegel:

$$L_{WA} = L_{Aeq,c} - 6 \text{ dB} + 10 \log \left(\frac{4 \pi R_1^2}{S_0} \right) \text{ dB}$$

R_1 Entfernung zwischen Mikrofon und Rotornabe

S_0 Bezugsmessfläche (1 m^2)

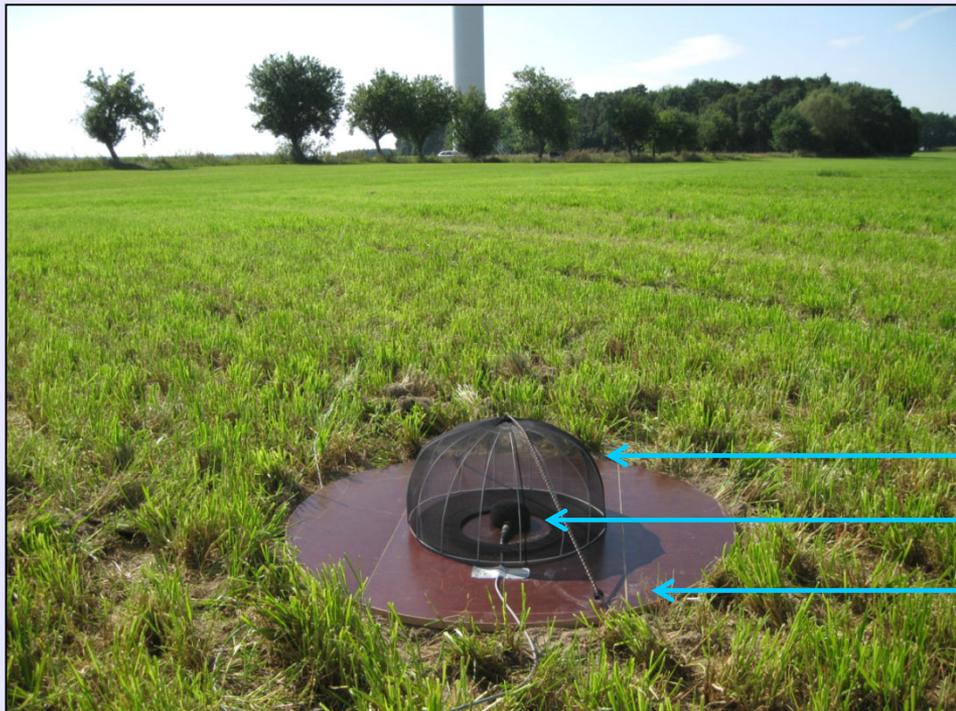


Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Korrekturwert -6 dB:

- **Mikrofon auf einer schallharten Platte auf dem Erdboden (Windgeräusch-Vermeidung), dort doppelter Schalldruck**

Zusätzlich: zwei Windschirme erforderlich



2. Windschirm

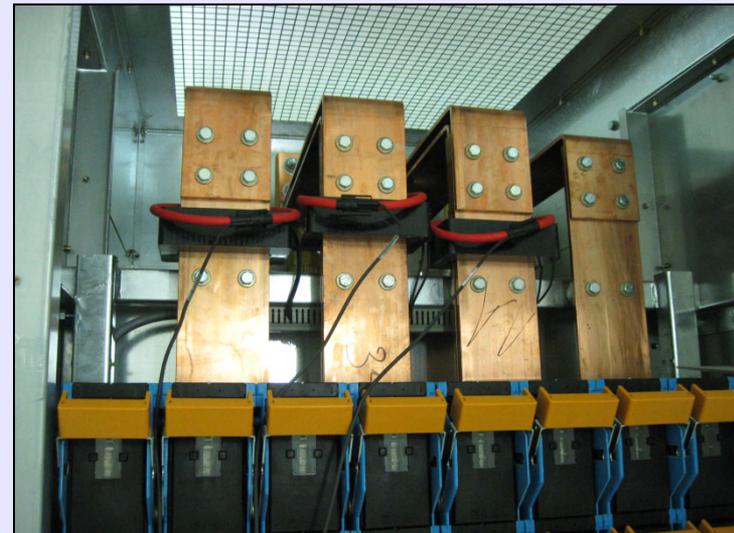
Mikrofon mit 1. Windschirm

schallharte Platte

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Weitere Messgrößen:

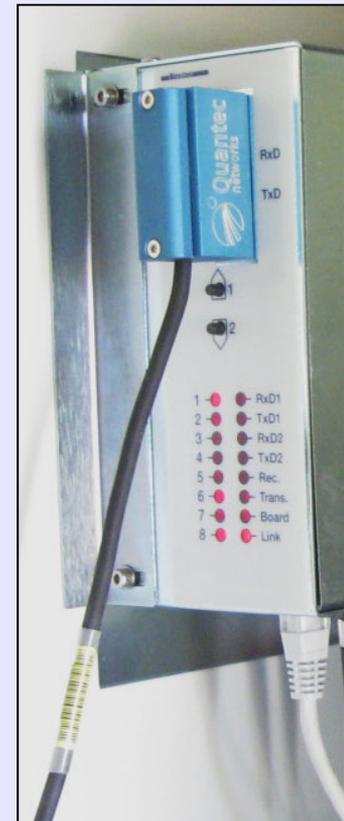
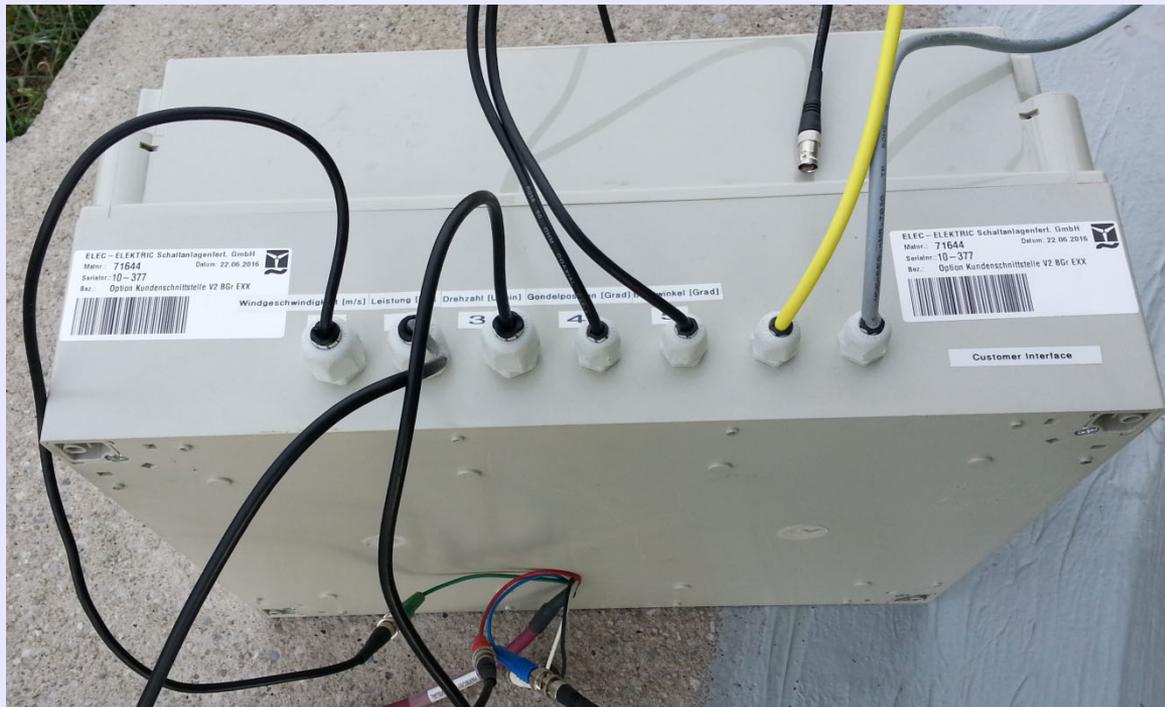
- **Windgeschwindigkeit am Anemometer in 10 m Höhe vor der WEA**
- **Elektrische Leistung der WEA (Magnetfeld um den Leiter)**
zulässig bis 2013 / „Ed. 3“



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Weitere Messgrößen:

- **Elektrische Leistung der WEA**
(Datenübernahme aus Schnittstelle)
aktuelles reguläres Verfahren



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

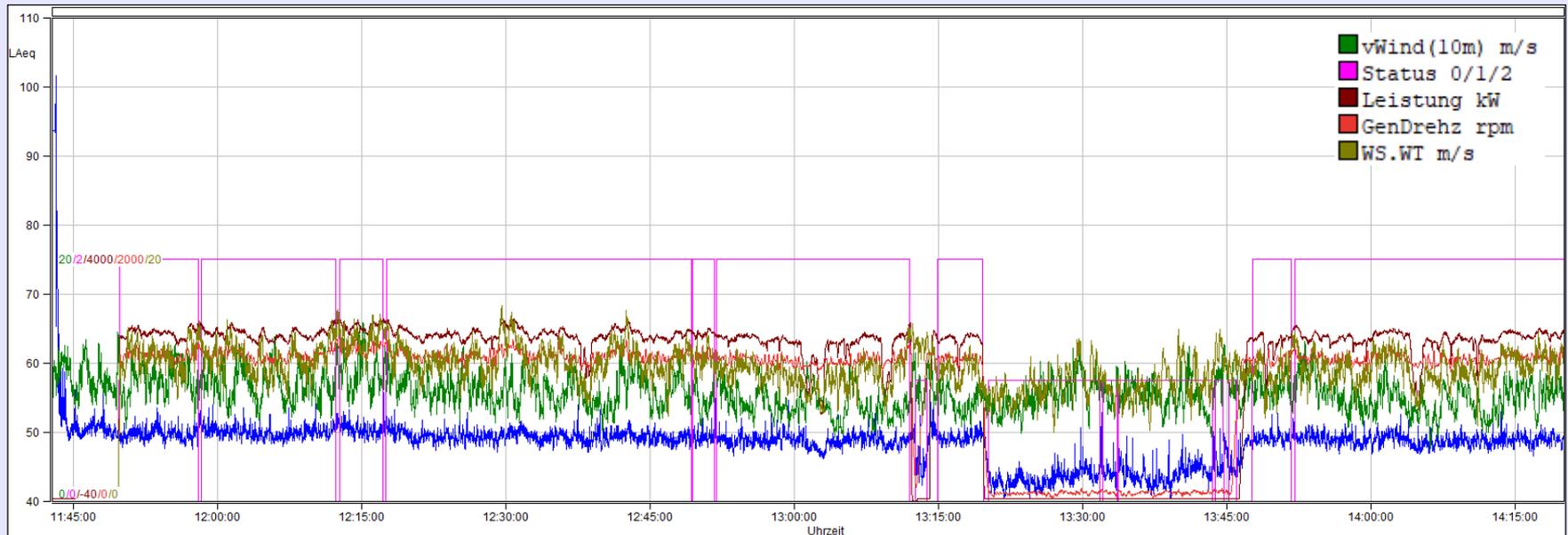
Messtechnik



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Aufzeichnung der genannten Messgrößen:

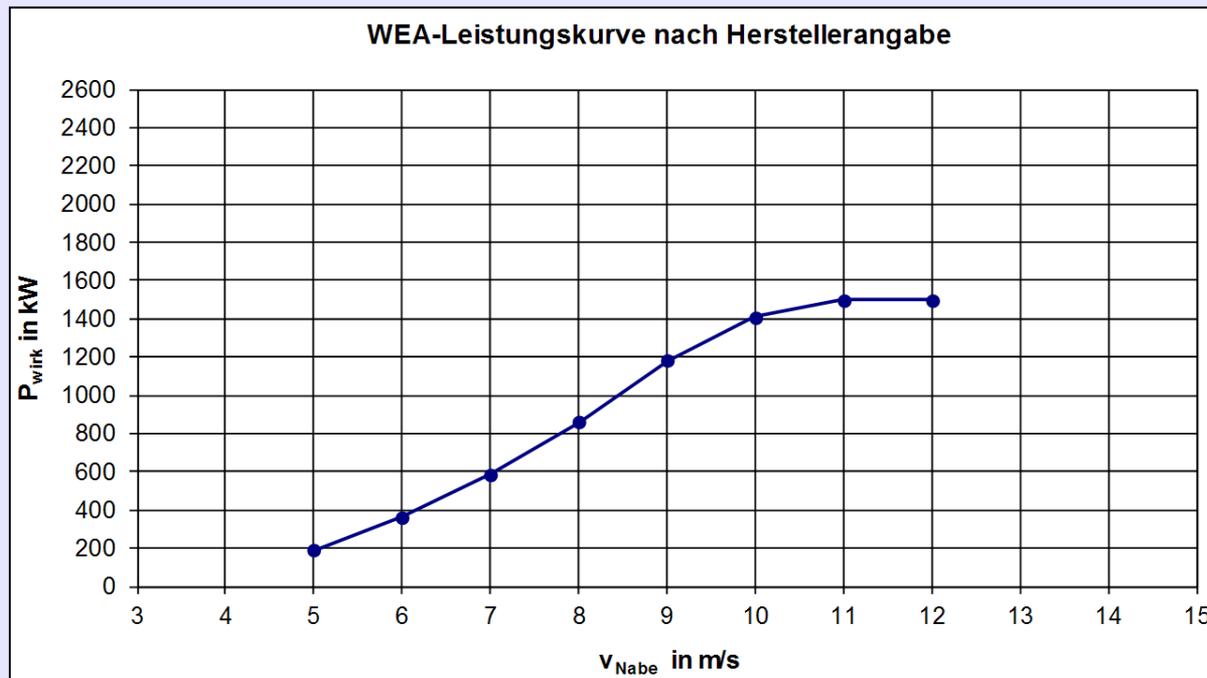
- im 1-Sekunden- und 10-Sekunden-Takt über 1...2 Stunden
- Schalldruck: Maximalpegel L_{AFmax} und Mittelungspegel L_{Aeq}



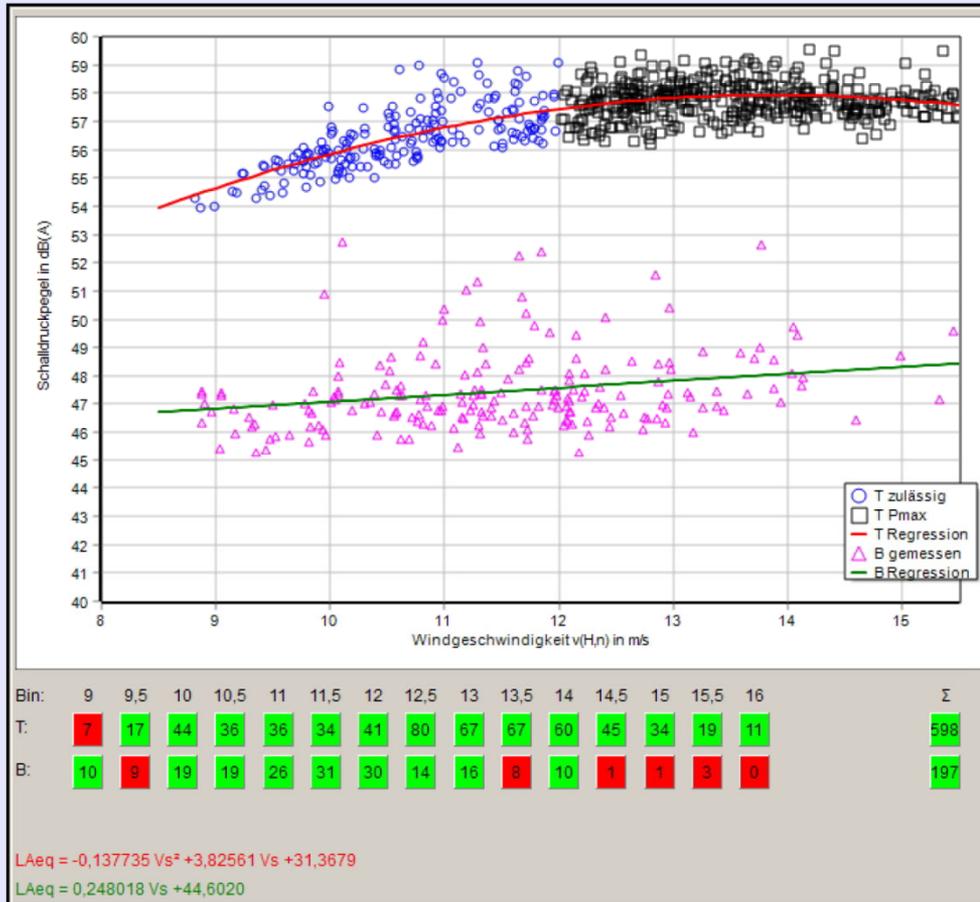
Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Auswertung: Zuordnung der 10-Sekunden-Messwerte zur Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

- Leistungskennlinie der WEA
"P als Funktion von v_{Nabe} "



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW



Fremdgeräusch muss mindestens 6 dB unter dem Pegel des Gesamtgeräusches liegen

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

- Auswertung:**
- Zuordnung der Messwerte zu Klassen/Bins der Windgeschwindigkeit
 - Fremdgeräusch-Korrektur
 - Schalleistungspegel L_W

Windgeschwindigkeits-Bin $V_{T,k}$ in Nabenhöhe in m/s	12,5	13	13,5	14	14,5	15	
Schalleistungspegel im Windgeschwindigkeits-Bin $L_{WA,k}$ in dB(A)	103,3	103,4	[103,5]	103,3	[103,4]	[103,1]	
Zuschlag für Tonhaltigkeit K_T in dB	0	0	0	3	3	3	
Zuschlag für Impulshaltigkeit K_I in dB	0	0	0	0	0	0	
Immissionsrelevanter Schalleistungspegel $L_{WA,k}$ in dB(A)	-	-	-	-	106,4	-	

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Auswertung: - Details für alle Windgeschwindigkeitsklassen

Auswertung der gemessenen Daten:									
BIN	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
Mittl. Windgeschwindigkeit $\bar{v}_{T,k}$ in m/s:	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
Betriebsgeräuschpegel $L_{T,k}$ in dB(A):	54,6	54,4	55,1	55,4	55,5	55,7	56,0	55,9	56,0
Hintergrundgeräuschpegel $L_{B,k}$ in dB(A):	48,5	49,5	48,8	48,4	48,5	49,0	48,8	49,2	49,0
Differenz in dB:	6,1	4,9	6,3	7,0	7,0	6,7	7,2	6,7	7,0
Korrigierter Betriebsgeräuschpegel $L_{V,c,k}$ in dB:	53,4	52,7	53,9	54,4	54,6	54,7	55,1	54,9	55,0
Schalleistungspegel $L_{WA,k}$ in dB:	[102,5]	101,9*	[103,1]	103,5	103,7	103,8	104,2	104,0	104,2
Messunsicherheit $u_{LWA,k}$:	1,12	1,31	1,09	0,98	0,99	0,98	0,96	1,05	0,98
Schalleistungspegel $L_{WA,10m,k}$ in dB:	-	101,9*	-	-	103,7	-	-	104,0*	-
V_{10} in m/s:	5,58	5,93	6,27	6,62	6,97	7,32	7,67	8,02	8,36
Messunsicherheit $u_{LWA,10m,k}$:	-	1,21	-	-	0,93	-	-	1,80	-
Theoretische el. Wirkleistung in kW:	742,0	889,5	1037,0	1194,5	1352,0	1475,5	1599,0	1726,5	1854,0
Mittlere Rotordrehzahl in 1/min:	1628,6	1633,0	1669,1	1681,4	1675,5	1679,6	1678,5	1679,9	1673,1
dL_{ak} in dB:	-16,9**	-10,5**	-10,3**	-7,0**	-6,3**	-4,2**	-2,4	-0,8	-0,3
f_t in Hz:	8392,7	137,8	137,9	138,6	138,5	644,2	645,6	645,0	643,1
Tonhaltigkeitszuschlag K_{TN} in dB:	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anzahl der BINs für Betriebsgeräusch (T):	11	20	34	41	63	53	55	63	49
Anzahl der BINs für Hintergrundgeräusch (B):	9	11	8	19	21	37	29	16	16
* 3 dB < $dL_{Aeq,k}$ < 6 dB [] Nicht ausreichend viele Messwerte vorhanden ** Keine relevanten Töne									

Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

**Auswertung: Windgeschwindigkeiten bei > 95% Nennleistung
(keine Rückrechnung aus der Leistungskennlinie möglich)**

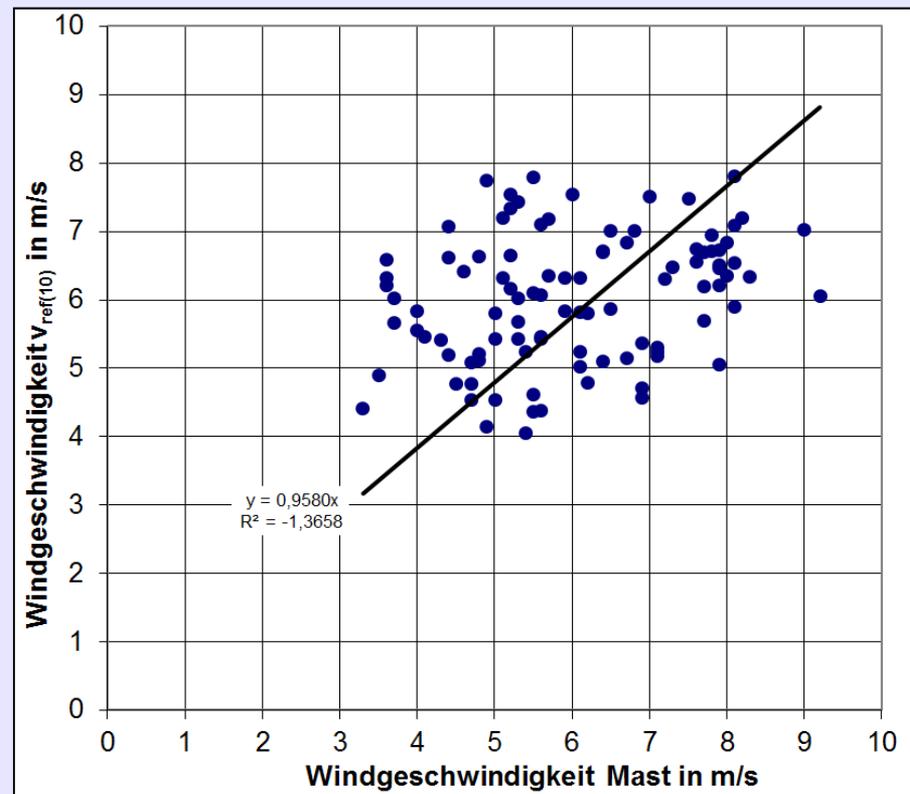
Abgleich

**$v_{\text{Wind}} (\text{Mast}) / v_{\text{Wind}} (\text{Kennlinie})$
bis 95% der Nennleistung**

für größere v-Werte

über Korrekturfaktor aus

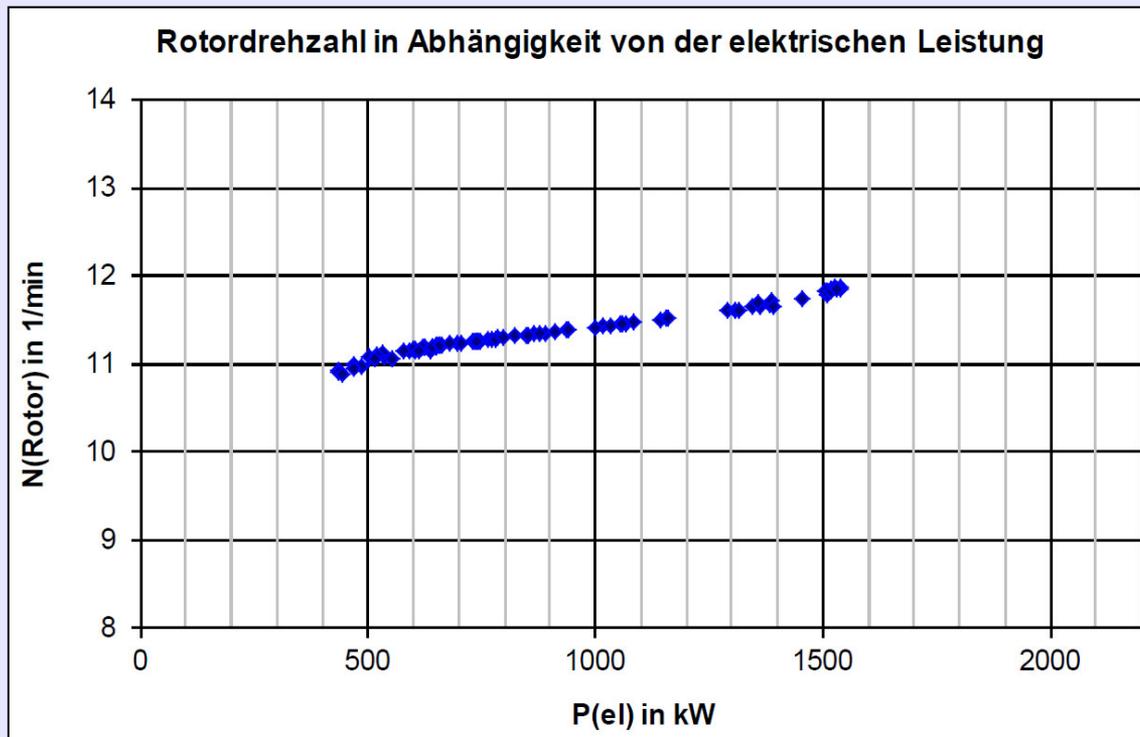
$v_{\text{Wind}} (\text{Mast})$



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Auswertung: Rotordrehzahl

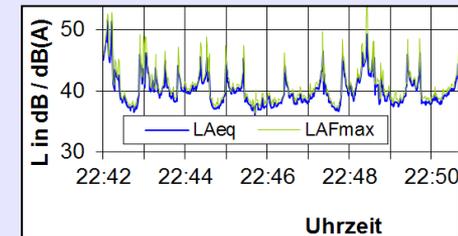
- Daten aus der WEA-Steuerung übernehmen
- u.U. Rückschluss auf den WEA-Betriebsmodus



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Auswertung: Zuschlag für Impulshaltigkeit des Geräusches

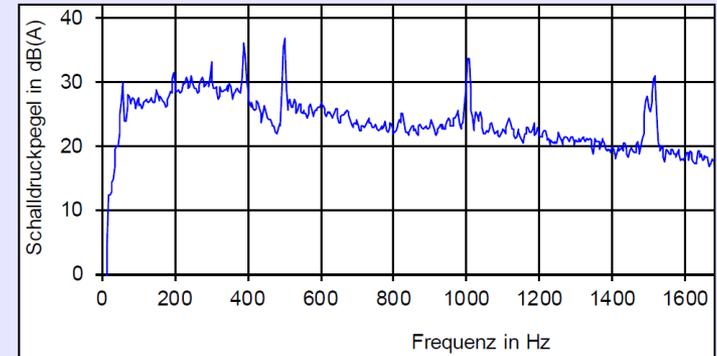
- Differenz zwischen gemitteltem Schalldruckpegel L_{pAeq} und Taktmaximalpegel L_{pAFTEq}
- Mittelwerte über die Bins im Windgeschwindigkeitsbereich
- Definition nach FGW TR1: „scharfe Geräusch-Impulse wie Knallen, Knacken oder Rattern“
- LAI-Hinweise 2016: windkraftanlagentypische Geräuschcharakteristik durch die Drehbewegung der Rotorblätter „in der Regel weder als ton- noch als impulshaltig einzustufen“
- wenn Geräusch subjektiv impulshaltig ist, dann angeben als $K_I = L_{AFTEq} - L_{Aeq}$



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Auswertung: Zuschlag für Tonhaltigkeit des Geräusches

- DIN 61400-11 (Berechnung) und DIN 45681 (Bewertung)
- FFT, Frequenzauflösung z.B. 2 Hz
- Verhältnis "Tonpegel" zu umgebendem Frequenzband ΔL_a
- für jede Windgeschwindigkeitsklasse je 2 Minuten
- wenn Geräusch tonhaltig, dann wirksam im Fernbereich (Immissionsschutz) gemäß LAI-Hinweisen:
 - $K_{TN} \leq 2 \text{ dB}$ entspricht $K_T = 0$
 - $K_{TN} = 2 \text{ dB}$ Messung am maßgeblichen Immissionsort
 - $K_{TN} > 2 \text{ dB}$ Anlage entspricht nicht Stand der Technik



Messverfahren nach EN 61400-11 / FGW

Immissionswirksamer Schalleistungspegel

für die "lauteste" Windgeschwindigkeitsklasse

$$L_W = L_{W_{eq}} + K_T + K_I \quad | \quad \text{Messunsicherheit } U_C$$

Vergleich mit der Immissionsprognose (Genehmigung)

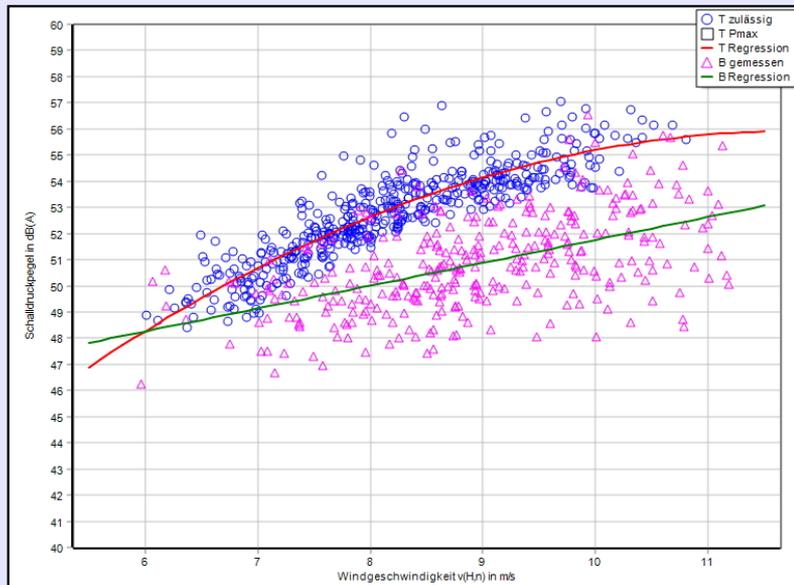
$$L_{W, \text{Messung}} + U_C \leq L_{W, \text{Prognose}} + 1,28 \sigma_{\text{ges}}$$

- Prognosen sollten immer die Unsicherheitsanteile berücksichtigen
- anderenfalls: $L_{W, \text{Messung}} = 104,0 \text{ dB(A)} + 0,7 \text{ dB}$
überschreitet $L_{W, \text{Prognose}}$ von $104,0 \text{ dB(A)}$

Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens

Fremdgeräusche (Vegetation, Straßenverkehr...)

- Messung nur auf nicht oder niedrig bewachsenen Flächen
- Abstand zu Bäumen und Autobahn > 300...500 m
- Messpunkt gemäß Norm liegt am Waldrand, über Straße
- andere WEA abzuschalten (Fremdbetreiber, kurzfristig)



Beispiel: zu hohes Fremdgeräusch

Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens

WEA-Betriebszustand

- schallreduzierter Nacht-Betriebsmodus am Tage für die Messung einzustellen
- Servicepersonal hört vor Ort erstmalig vom Nacht-Modus, obwohl im Genehmigungsbescheid festgeschrieben
- Leistungskennlinie "P über v" an der Anlage nicht einsehbar (oder nur als Ertragskurve)

```
Schalloptimierung
Schalloptimierung:
Aktueller Zustand:
Min. Zeit:
                                aus
                                inaktiv
                                0s/600s
-----
nach Zeit
von: 00:00      12:36:02
bis: 00:00
                                ein
```

Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens

Elektrische Daten der WEA

- Nennleistung 2000 kW laut Typbezeichnung / Genehmigung oder 2050 kW laut Leistungskennlinie ?

		Standardluftdichte $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$		Veränderte Luftdichte $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$	
		Leistungskennlinie P $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [kW]	Leistungsbeiwert c_p $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [-]	Leistungskennlinie P $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [kW]	Leistungsbeiwert c_p $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [-]
Wind	[m/s]				
	13	1.950,0	0,37	1.950,0	0,37
	14	2.050,0	0,31	2.050,0	0,31
	15	2.050,0	0,25	2.050,0	0,25

Kennlinie E70 E4 2 MW berechnet Rev.: 3.3 Gedruckt am: 01.12.2006

- Servicekollegen müssen "schaltberechtigt" sein

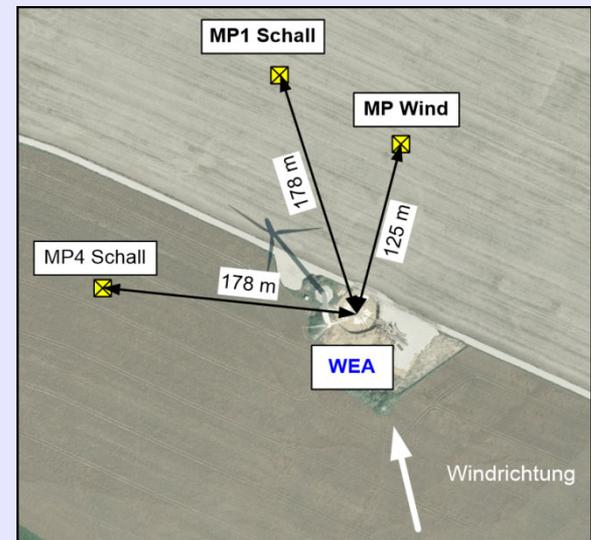
Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens

WEA-Datenübernahme

- je nach Hersteller sehr unterschiedlich möglich
- z.B.:
- nur 10-Min.-Mittelwerte werden aufgezeichnet
 - Uhr des Anlagen-PCs geht erheblich falsch
 - IR-Kundenschnittstelle nur leihweise verfügbar (Dongle, anlagenspezifischer Schlüssel)
 - Abweichungen zwischen selbst gemessener und aufgezeichneter elektrischer Leistung

Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens**Gerichtete Schallabstrahlung der WEA**

- **Anwohnerbeschwerden: lautestes Geräusch, wenn die Rotorebene zum Wohnhaus zeigt (Messpunkt "Schall" liegt in Verlängerung der Rotorachse)**
- **Zusatz-Messpunkte nach DIN 61400-11**
Abgleich einiger Minuten-Werte
Aussage "(keine) erhöhte Schallabstrahlung in andere Richtungen"



Probleme in der Praxis, Fehlereinflüsse, Grenzen des Verfahrens

Fehler-Kenngrößen

$$U_A = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{\text{est}})^2}{N(N-2)}}$$

y Messgröße, y_{est} = aus der Regression ermittelter Schätzwert
N Anzahl der verwendeten Messwerte / Stichproben

Beschreibung		U in dB
Kalibrierung der akustischen Messgeräte	U_{B1}	0,2
Toleranzen in der akustischen Messkette	U_{B2}	0,2
akustische Bedingungen für die schallharte Platte	U_{B3}	0,3
Messabstand vom Mikrofon bis zur Rotornabe	U_{B4}	0,1
akustische Impedanz der Luft	U_{B5}	0,1
Änderungen der Witterungsbedingungen, Turbulenz	U_{B6}	0,4
gemessene/errechnete Windgeschwindigkeit, Anemometer-Kalibrierung	U_{B7}	0,2
Windrichtungsmessung	U_{B8}	0,3

$$U_C = \sqrt{U_{A,s}^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2 + U_{B4}^2 + U_{B5}^2 + U_{B6}^2 + U_{B7}^2 + U_{B8}^2}$$

i.a. 0,5...1 dB

Umgebung und Natur...



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Bei Bedarf und Interesse - bitte Fragen stellen!

**cdf Schallschutz
D. Friedemann
Alte Dresdner Straße 54**

01108 Dresden



**Telefon 0351 88090-57
Fax 0351 88090-66
E-Mail info@cdf-schallschutz.de
Internet cdf-schallschutz.de**