

Wirkung der WEA-Geräusche auf den Menschen

Kai Pies¹, Sergio Martinez², Dan Pies¹

¹ Schalltechnisches Ing.-Büro Pies GbR, kpies@schallschutz-pies.de

² TÜV Rheinland Energy GmbH, sergio.martinez@web.de

Einleitung

Windenergieanlagen tragen maßgeblich zur Umsetzung der Energiewende bei. Die durch diese Anlagen verursachten Geräusche führen jedoch nicht selten zu Beschwerden von Anwohnern, die sich belästigt fühlen. Neben der Höhe des Mittelungspegels und der spektralen Geräuschcharakteristik ist die Amplitudenmodulation (AM) eine wesentliche Größe zur Beschreibung der empfundenen Wirkung der Geräusche.

Aktuelle Untersuchungen legen nahe, dass diese Wirkung der Geräuschmissionen von WEA mittels logistischer Funktionen beschrieben werden kann. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird aufbauend auf dieser Idee eine entsprechende Funktion hergeleitet und vorgestellt.

Eingangsgrößen sind der Mittelungspegel L_{Aeq} sowie der messtechnisch erfasste und ausgewertete Parameter „ p_{AM5} “, dessen Bestimmung und Berechnung in vorangegangenen Veröffentlichungen [1] und [2] beschrieben ist.

Bekannte Belästigungsfunktionen

Eine grundlegende Dosis-Wirkungsbeziehung zur Beschreibung der Belästigung durch WEA-Geräusche wird in der Arbeit von Janssen S.A. et al [3] im Jahr 2011 aufgeführt. Hier wird als Ergebnis von Untersuchungen mit $N=1820$ Teilnehmern in Schweden und in den Niederlanden eine Dosis-Wirkungs-Beziehung entwickelt, wie im Bild 1 beigefügt (FIG. 1 aus [3]). Das Modell [3] stellt die Abhängigkeit der Stärke der Belästigung vom Parameter L_{DEN} dar, der eine maßgebende Größe der EU-Umgebungsärm-Richtlinie darstellt.

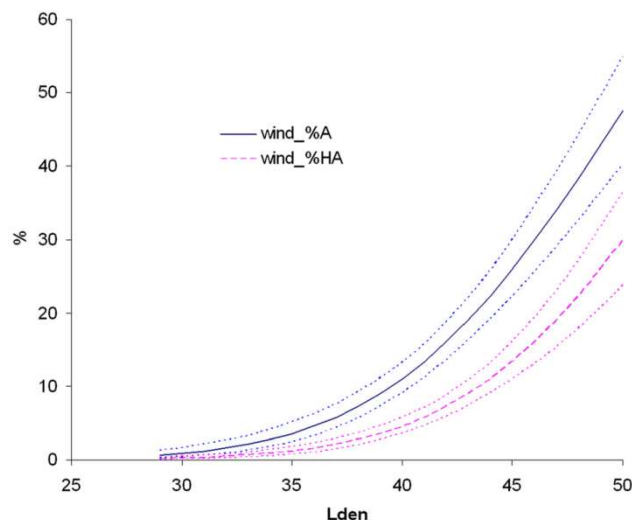


Abbildung 1: Dosis-Wirkungs-Beziehung nach Janssen S. A., Vos H., Eisses A. R. und Pedersen E., A zwischen L_{DEN} und der prozentualen Anzahl von belästigten Anwohnern (%A) und stark belästigten Anwohnern (%HA) außerhalb von Gebäuden aus [3]

Anzumerken ist, dass bei den zugrunde liegenden Untersuchungen, die u.a. von E. Pedersen et al. schon seit 2003 durchgeführt wurden (z.B. [4] und [5]), das Thema AM (Amplitudenmodulation) nur indirekt erwähnt wird.

Eine weitere Untersuchung zu dieser Thematik, bei der die AM unmittelbar eine Rolle spielt, ist die Arbeit von A. Bockstael et al. [6] aus dem Jahr 2012.

Die Ergebnisse beruhen auf Befragungen der Nachbarn im Umfeld von 3 WEA (Rotordurchmesser: 82 m, Nabenhöhe: 90m und elektrische Nennleistung von $P_{el} = 2$ MW). Die WEA werden tagsüber im offenen Betriebsmodus und nachts aufgrund von Beschwerden im schall- und leistungsreduzierten Betriebsmodus (600 kW, max. 12 U/min) betrieben. Die Abstände betragen 300 m, 650 m und 1020 m zum Messpunkt bei einem der Nachbarn, wobei die WEA hintereinander aufgereiht in Richtung des Messpunktes stehen. Die Abstände der anderen Nachbarn zu den WEA liegen in vergleichbaren Größenordnungen.

Die Befragungen der Anwohner erfolgten „Live“ mittels einer web-App und in Anlehnung an den ISO-Standard ISO/TS15666:2003. Dabei konnten die Befragten während ca. 3 Monaten aktuell über ihr Empfinden mittels einer 5-stufigen Skala (keine Belästigung, leicht, mittel, hoch und stark) Auskunft geben. Diese „direkte“ Bewertung führt nach Meinung der Autoren zu einem besseren Ergebnis als nachträgliche Befragungen aus dem Gedächtnis.

Insgesamt konnten 552 Antworten von 3 Familien ausgewertet werden.

Im Ergebnis (vgl. Kapitel Nr. 4.3 aus [6]) wird ein Modell zur Vorhersage von starker Belästigung $P(HA)$ erstellt. Dabei korreliert die erklärte Belästigung mit dem Einfluss von Zustandsvariablen statistisch und kann mit Hilfe einer Gleichung quantifiziert werden. Grundgleichung ist die folgende logistische Funktion:

$$P(HA; X\beta) = \frac{1}{[1 + e^{-X\beta}]} \quad [\%] \quad (1)$$

Die Variable $X\beta$ wird aus einer Linearkombination aus den Werten von simultan erfassten unabhängigen Parametern bestimmt.

Eine Parameteranalyse führt zum Ergebnis, dass das Variablenpaar „Emissions-Schalldruckpegel L_s “ und ein „fluctuations indicator ϕ “ in dB maßgebend sind. Letzterer wird dabei als normierte Amplitude der AM-Frequenz bestimmt und stellt ein Maß für die AM-Schwankungsbreite dar.

Die statistisch ermittelte Gleichung (5) aus [6] zur Bestimmung der Kenngröße $X\beta$ in der o. a. Gl. (1) lautet:

$$X\beta = -7,27 + 0,155 \cdot L_S + 0,00917 \cdot \varphi \quad [\%] \quad (2)$$

Ebenfalls aufbauend auf logistischen Funktionen vergleichen die Autoren Schäffer et al. in [7] die Geräusche von WEA mit den Geräuschen des Straßenverkehrs.

Dabei werden in den durchgeführten Hörversuchen Stimuli mit und ohne AM angeboten. Weiterhin erfolgt eine Unterscheidung in periodisch oder zufällig („random“) auftretende AM. Das Ergebnis ist eine Logit(pHA)-Funktion für die vorhergesagte Wahrscheinlichkeit von starker Belästigung (pHA) in der Form:

$$\text{Logit}(pHA) = \ln(pHA/[1-pHA]) \quad (3)$$

Die Funktion $\text{Logit}(pHA)$ wird aus einer linearen Kombination von Einflussvariablen (Hauptvariable für die WEA stellt der L_{Aeq} im Freien dar) bestimmt, deren Koeffizienten mittels Hörproben und Befragungen statistisch ermittelt werden. Ein Ergebnis der Probandenversuche ist, dass der Unterschied der zufälligen oder periodischen AM keinen großen Einfluss hat. Differenzen zeigen sich zwischen den Signalen mit oder ohne AM. Daraus ergeben sich bei der Untersuchung [7] zwei logistische Funktionen und zwar eine Basis-Funktion ohne AM und eine weitere Logit-Funktion mit AM.

Aus den Daten dieser Arbeit (Gl. 2 auf S. 2958 und Tabelle II auf S. 2957 aus [5]) lassen sich gemäß den Angaben der Autoren folgende Logit(pHA)-Funktionen ermitteln:

$$\text{Ohne AM: } \text{Logit}(pHA) \approx 0,251 (L_{Aeq} - 52,8) \quad (4)$$

$$\text{Mit AM: } \text{Logit}(pHA) \approx 0,24 (L_{Aeq} - 50,3) \quad (5)$$

Trägt man die Funktionen grafisch auf, so ergeben sich die unten aufgeführten Kurven für pHA in Abhängigkeit des L_{Aeq} :

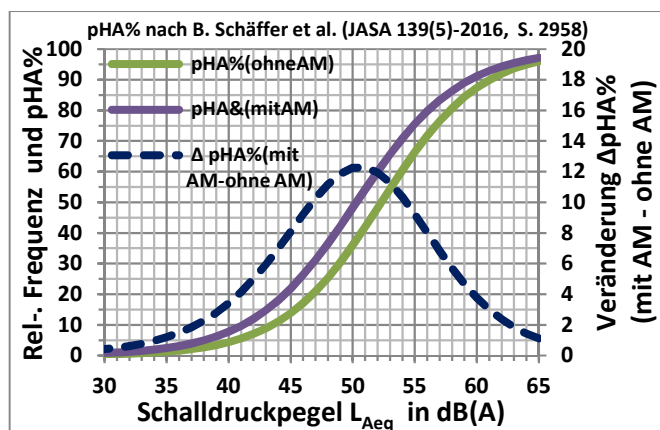


Abbildung 2: Grafische Darstellung der logistischen Funktionen aus den Gleichungen (4) grün und (5) lila, sowie deren Abweichungen blau gestrichelt

Die Funktionen erstrecken sich im Wesentlichen auf einen Bereich des Mittelungspegels L_{Aeq} von 30 bis 65 dB(A) (vgl. [7]). Die logistische Verteilungsfunktion ohne AM erreicht den Wert von 50 % an stark belästigten Personen (pHA%) bei ca. 53 dB(A). Mit zusätzlicher AM sind bereits bei 50 dB(A) die Hälfte der Personen stark belästigt, also 3 dB „früher“. Durch AM entsteht demnach eine Erhöhung der

Anzahl der stark belästigten Personen. Bei einem Mittelungspegel von $L_{Aeq} = 50$ dB(A) sind dies z.B. $\Delta pHA\% = 12$ mehr (vgl. blau gestrichelte Kurve).

Möchte man einen Vergleich zwischen den Abbildungen 1 und 2 herstellen, so kann man den L_{night} als Vergleichsgröße zum L_{Aeq} aus dem L_{DEN} durch Abzug von $\Delta L \sim 6$ dB berechnen (Annahme: Die Anlagen laufen Tag und Nacht im gleichen Betriebszustand). Vergleicht man dann den Wert stark belästigter Personen ohne AM aus Abbildung 2 mit $pHA\% \approx 22$ bei 45 dB(A) mit einem Wert von $pHA\% \approx 30$ bei $L_{DEN} = 51$ dB(A) in Abbildung 1 mit, so führen die beiden Untersuchungen zu ähnlichen Ergebnissen.

Die Darstellung entsprechend der Abbildung 2 lässt die Hypothese zu, dass ausgehend von 30 dB(A) mit steigendem Schallpegel die AM zu einer wachsenden Störwirkung führt. Ab ca. 50 dB(A) ist dieser Einfluss wieder rückläufig. Es ist naheliegend, dass in der Praxis des Immissionsschutzes und bei Anwohnern in der Nähe von WEA Schalldruckpegeln von $L_{Aeq} \geq 50$ dB(A) (vor allem nachts) zu einer starken subjektiven Belästigung führen. Die Aussage in Abbildung 2, dass in 50 % der Fälle eine starke Belästigung zu erwarten sei, ist durchaus plausibel. Vor diesem Hintergrund scheint eine Einschränkung des Bereiches auf Werte zwischen 30 dB(A) und 50 dB(A) sinnvoll für den Immissionsschutz zu sein.

Die Untersuchungsergebnisse [6] und [7] zeigen, dass durch das Auftreten von AM auch in Verbindung mit einer größeren Anzahl von WEA (Windparks), der gefundene Zusammenhang aus Abbildung 2 plausibel ist. Die Arbeit von A. Bockstael [6] führt zudem auf, dass neben dem L_{Aeq} als Parameter auch ein mit der AM gekoppelter Faktor eingeht. Über die Erkenntnisse aus Abbildung 2 hinaus ist demnach zu erwarten, dass auch die Stärke der AM in Form des Wertes p_{AM5} (vgl. hierzu [1] und [2]) berücksichtigt werden muss.

Der Einfluss dieses Parameters erfordert demnach eine nähere Betrachtung.

Herleitung der Belästigungsfunktion

Im Sinne der zuvor aufgeführten Erkenntnisse bietet es sich an, aus der Vielzahl an bestehenden Messdaten für Windparks (vgl. [1], [2] und [9]) einen Vorschlag für eine Belästigungsfunktion $P(A\%;X)$ auszuarbeiten. Dabei wird aufbauend auf [6] und [7] auf die verallgemeinerte Form der logistischen Funktion zurückgegriffen:

$$P(A\%;X) = \frac{a}{[1 + be^{-cX}]} \quad [\%] \quad (6)$$

wobei die Parameter a, b und c anhand der vorliegenden Datensätzen durch Anpassung ermittelt werden. Auf der Grundlage der Messdaten und ihrer Statistik aus [2] (nach Bild 10 und Tabelle 2) wird vorab von folgendem Zusammenhang für die Größe X ausgegangen:

$$X = f_1(L_{Aeq}) + f_2(p_{AM5}) \quad (7)$$

D.h. die Variable X ist die Summe aus linearen Funktionen der Größen L_{Aeq} (Mittelungspegel eines Zeitabschnittes) und

p_{AM5} (AM-Schwankungsbreite eines Zeitabschnittes). Die ist die Grundlage für die „Empfindungs“-Funktion $P(A\%;X)$ nach Gl. (6).

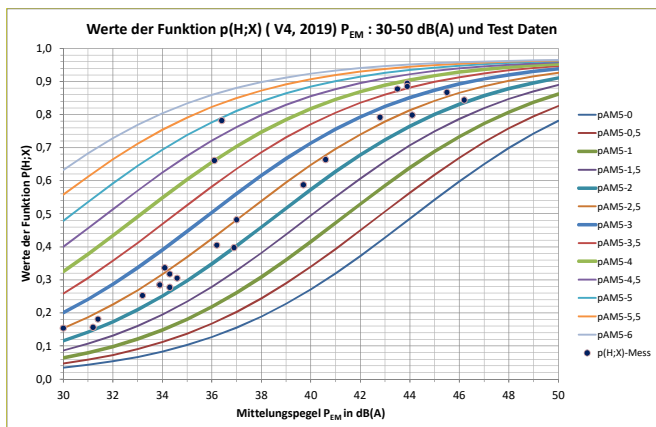


Abbildung 3: Werte der Funktion $P(A\%;X)$ in Abhängigkeit der Variablen des Parameters X nach Gl. (6), (7),(8) und (9). Die „Punkte“ in dieser Darstellung sind die „Messdaten“ nach Tabelle 1 aus [2].

Auf Basis der Messergebnisse und Auswertungen aus [2]:

- Verteilungen L_{Aeq} (p_{EM}), p_{AM5} nach Bild 10,
- Daten für den L_{Aeq} aus Tabelle 2 (P_{EM-m} anstelle von P_{EM} sowie p_{AM5-m} anstelle von P_{AM5})

konnten folgende Funktionen f_1 und f_2 (Gl.7) gebildet werden:

$$f_1(L_{Aeq}) = -2,5 + 0,09 \cdot L_{Aeq} \tag{8}$$

$$f_2(p_{AM5}) = 0,25 \cdot p_{AM5} \tag{9}$$

Durch Vergleich der Funktionen mit den Berechnungen der Messergebnisse ergeben sich die Konstanten a , b , c in Gl. (6) wie folgt:

$$a = 0,97 \quad b = 0,466 \cdot 10^2 \quad c = 2,631$$

Die Konstanten a , b und c der Gl. (6) werden durch Anwendung der Programm-Funktion „logsnp“ aus MathCAD (vgl. Literaturhinweis in [2]) auf der Basis einer logistischen Verteilung bestimmt.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind für 15 Messungen mit je 25 Sekunden die Prognosewerte der Empfindungsfunktion $P(A;X)$ aufgetragen.

Legt man z.B. eine gleichmäßige 5-stufige Belästigungsskala (0 bis < 20%, 20 bis < 40%; usw.) zugrunde, dann erkennt man, dass die Empfindungsfunktion und die damit verbundene Belästigung sowohl vom maßgebenden Wert des Immissionspegels L_{Aeq} als auch von der Bewertung der AM-Schwankungsbreite mit dem Wert p_{AM5} abhängt.

Die Berechnungen mit der vorgeschlagenen Funktion nach Gl. 6 und 7 (mit 8, 9) ergeben die parametrische Darstellung in Abbildung 3 für die Funktion $P(A;X)$ für Werte des L_{Aeq} zwischen 30 bis 50 dB(A) und p_{AM5} zwischen 0 dB bis 6 dB.

Man erkennt, dass die Kurven eine Ähnlichkeit mit der Darstellung nach Bild 2 aufweisen.

Validierung der Funktion durch Hörversuche

Zur Prüfung der zuvor hergeleiteten Belästigungsfunktion wurden Hörversuche an 10 Probanden durchgeführt. Bei den Probanden handelt es sich um Personen, die nicht durch die Geräusche von Windenergieanlagen belästigt sind. So ist für den Umfang der hier durchgeführten Hörversuche sichergestellt, dass die Ergebnisse nicht durch eine Vorprägung der Probanden beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang sei auf die Veröffentlichung von J.Kastka [8] hingewiesen, der für Fluglärmgeräusche zeigen konnte, dass aktive „Fluglärmgegner“ eine um ca. 20 dB höhere Empfindlichkeit gegenüber dem Lärm aufwiesen.

In einem Vorversuch mit 3 Probanden wurde die Länge der Hörproben mit 25 Sekunden festgelegt. Die Auswahl der Soundfiles erfolgte anhand realer Messungen an 5 Immissionsorten. Dabei wurden insgesamt 15 Hörproben mit unterschiedlichen Mittelungspegeln L_{Aeq} und Amplitudenmodulationen p_{AM5} ausgewählt. Die Parameter L_{Aeq} und p_{AM5} sowie die berechneten Werte der Belästigungsfunktion der Hörproben sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 1: Merkmale der 15 Soundfiles

Hörprobe	Parameter			
	L_{Aeq} [dB(A)]	p_{AM5} [dB]	$P(A;X)$	$P(A;X)_{skal.}$
1	44	4,3	0,91	4,5
2	44	4,1	0,91	4,6
3	43	3,9	0,89	4,5
4	44	3,6	0,89	4,5
5	37	6,6	0,90	4,5
6	37	10,5	0,97	4,8
7	38	8,4	0,96	4,8
8	37	4,5	0,76	3,8
9	38	5,6	0,87	4,4
10	34	3,1	0,38	1,9
11	34	2,5	0,32	1,6
12	35	3,0	0,43	2,1
13	34	3,1	0,43	2,2
14	35	3,5	0,55	2,7
15	35	3,4	0,53	2,6

Zur Durchführung der Hörproben wurde durch Vorversuche eine Skala von 0 bis 5 zur Einstufung der Belästigung als zielführend ermittelt. Daher wurden die rechnerischen Werte der Belästigungsfunktion $P(A;X)$ auf eine Skala von 0 bis 5 skaliert. Diese skalierten Werte sind in der letzten Spalte $P(A;X)_{skaliert}$ aufgeführt.

Die Hörproben wurden in einem reflexionsarmen Halbraum über Lautsprecher dargeboten, die in einem Abstand von 1,5 m zu den Probanden positioniert waren. Die Soundfiles wurden so eingepegelt, dass sie an der Hörerposition genau dem Mittelungspegel aus der Tabelle 1 entsprachen.

Den Probanden wurde im Hörversuch folgende Fragestellung vorgegeben: „Wenn das Geräusch vor Deinem Wohnhaus vorliegt, wie stark würde es Dich belästigen?“. Die Einordnung sollte auf einer Skala von 0 (nicht belästigt) bis 5 (stark belästigt) erfolgen.

Jedem Probanden wurden 5 feste Hörproben vorgegeben. Zusätzlich sollten 3 aus 10 möglichen weiteren Hörproben zufällig ergänzt werden. Die Proben durften ohne Vorgabe einer Reihenfolge beliebig oft abgespielt werden.

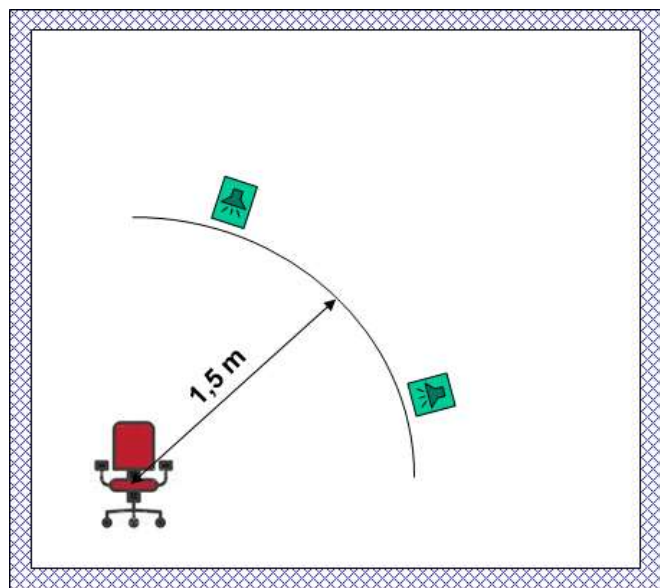


Abbildung 4: Anordnung des Hörversuches im reflexionsarmen Halbraum

Zu Beginn des Hörversuches wurde jedem Probanden eine Hörprobe dargeboten, die einen Wert der skalierten Belästigungsfunktion von $P(A;X)_{\text{skaliert}}$ von ~ 0 aufwies. Dabei handelte es sich um ein Hintergrundgeräusch im Freien ohne Betrieb von Windkraftanlagen mit einem Mittelungspegel von $L_{\text{Aeq}} = 26 \text{ dB(A)}$.

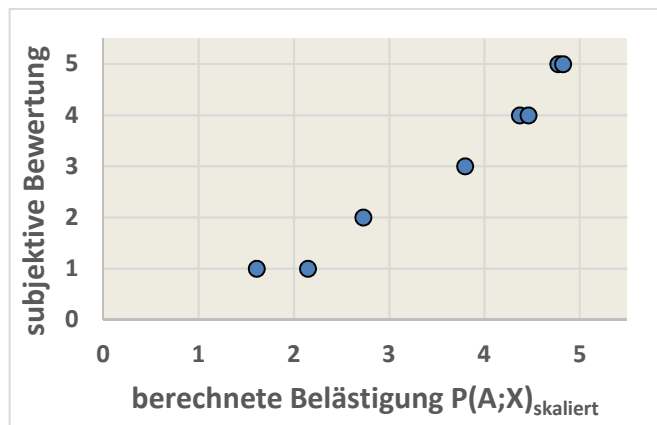


Abbildung 5: Gegenüberstellung der berechneten Belästigung $P(A;X)$ und der subjektiven Bewertung eines Probanden

In der Hauptuntersuchung wurden insgesamt 90 Hörversuche durchgeführt. Die Abbildung 5 zeigt die Auswertung eines einzelnen Probanden. Man erkennt, dass die subjektive Bewertung sehr gut der berechneten Belästigung entspricht. Abbildung 6 in der nachfolgenden Grafik ist das Ergebnis des Kollektivs. Dabei wurden die Bewertungen für jeden der 15 Soundfiles gemittelt und aufgetragen. Hierbei zeigt sich, dass die Bewertungen der einzelnen Hörproben maximal um eine Bewertungsstufe von der berechneten Funktion abweichen.

Das Ergebnis zeigt, dass die gefundene Belästigungsfunktion in Abhängigkeit der beiden akustischen Parameter L_{Aeq} und

P_{AM5} abgebildet werden kann. Die vorgeschlagene Funktion ist somit prinzipiell geeignet, die Belästigung von Probanden vorherzusagen.

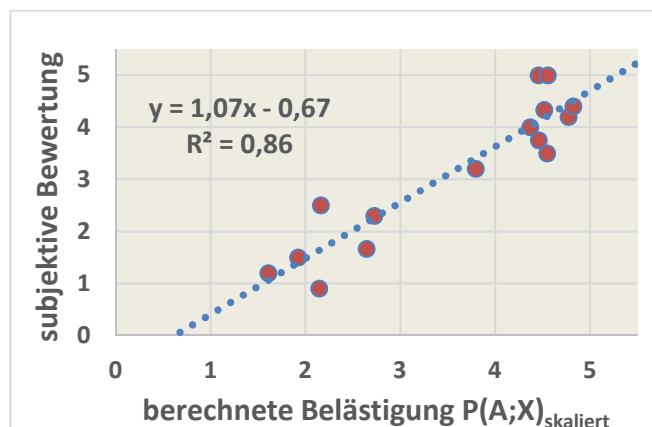


Abbildung 6: Gegenüberstellung der berechneten Belästigung $P(A;X)$ und der Mittelwerte der subjektiven Bewertung von 10 Probanden der 15 Soundfiles

Literatur

- [1] Martinez S., Fennel F., Pies K., Amplitudenmodulation (AM) bei Geräuschen von Windenergieanlagen, Messungen an Windparks, Fortschritte der Akustik - DAGA 2018
- [2] Martinez S., Fennel F., Pies K., Amplitudenmodulation als besondere Geräuschcharakteristik der Windenergieanlagen, Lärmbekämpfung Bd. 13(2018), S. 171-182.
- [3] Janssen S. A., Vos H., Eisses A. R. und Pedersen E., A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources, J. Acoust. Soc. Am. Vol 130, Nr. 6, 2011, S. 3746-3753.
- [4] Pedersen, E., Health aspects associated with wind turbine noise - Results from three field studies, Noise Control Eng. J. 59, 2011, 47-53.
- [5] Pedersen, E., and Persson Wayne, K. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship, J. Acoust. Soc. Am. 116, 2004, 3460-3470
- [6] Bockstael A., Dekonink L., Can A., Oldoni D., De Coensel B. und Boteldooren D.; Reduction of wind turbine noise annoyance: An operational approach, Acta Acustica united with Acustica, Vol 98(2012) 392-401
- [7] Schäffer B., Schlittmeier S.J., Pieren R., Heutschi K., Brink M., Graf R. und Hellbrück J., Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine noise and road traffic noise: A laboratory study, J. Acoust. Soc. Am. 139(5) 2016 S. 2949-2963.
- [8] Kastka J., Bursch-Galetke E., Buchta E, Krauth J., Mau U., Muth T., Schümer R., Siegmann S., Untersuchung zum Lärmkontingenzkonzept: Akzeptanz, Belästigungsverhalten und Meinungsbild der Bevölkerung am Beispiel des Düsseldorfer Flughafens 1987-1995, Fortschritte der Akustik, DAGA1996, Bonn
- [9] K. Pies, P. Daleiden, F. Kemmer, S. C. Martinez, D. Pies, Amplitudenmodulation bei Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen - Beispiele und Einflussgrößen -, Fortschritte der Akustik, DAGA2018, München