

Energiekontor AG
Büro Bernau
Bahnhofplatz 2
16321 Bernau bei Berlin

Unser Zeichen, unsere Nachricht vom
4124

Telefon, Name
Dr. Michael Bellmann
bellmann@itap.de

Datum
08.06.2023

Sitz

itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Amtsgericht Oldenburg
HRB: 12 06 97

Kontakt

Telefon (0441) 570 61-0
Fax (0441) 570 61-10
Mail info@itap.de

Geschäftsführer

Dr. Michael A. Bellmann

Bankverbindung

Oldenburger Volksbank
IBAN:
DE95 2806 1822 0080 0880 00
BIC: GENO DEF1 EDE

Commerzbank AG
IBAN:
DE70 2804 0046 0405 6552 00
BIC: COBA DEFF XXX

USt.-ID.-Nr. DE 181 295 042

Windenergieanlagen Wulkow-Booßen in Brandenburg

Erschütterungstechnische Stellungnahme zu der Herstellung der Fundamentstrukturen mittels Rüttelstopfverfahrens (Version 1)

1. Zusammenfassende Beurteilung

Die *Energiekontor AG* plant ein Onshore-Windparkprojekt am Standort Wulkow-Booßen in der Nähe von Frankfurt Oder im Bundesland Brandenburg. Die Fundamentstruktur der geplanten Windenergieanlagen (WEA) sollen als sogenannte Rüttelstopfsäulen hergestellt werden. Von diesem Gründungsverfahren gehen in der Regel Vibrationen bzw. Erschütterungen aus, die sich im Boden ausbreiten können. Im Rahmen der Planfeststellung dieses genehmigungspflichtigen Windparks sind somit die Auswirkungen auf Bauschäden an der benachbarten, vorhandenen Bebauung sowie die Einwirkung der Erschütterungen auf die Anwohner in den Gebäuden im Sinne der Normenreihe DIN 4150 [3, 4, 5] und der Erschütterungsrichtlinie [2] abzuschätzen.

Aufgrund des derzeit noch nicht abgeschlossenen Planungsstands und der damit verbundenen Unsicherheit hinsichtlich möglicher, relevanter Einflussparameter, wie verwendete Rüttler sowie das Design der Fundamente, sind die Erschütterungen in und an der nahegelegenen Bebauung zur Beurteilung möglicher Schäden an Gebäuden gemäß DIN 4150-3 und Einwirkungen von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden gemäß DIN 4150-2 nicht im Detail gemäß DIN 4150-1 zu prognostizieren, d. h., nicht ohne erhebliche Unsicherheiten. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser schwingungstechnischen Stellungnahme überschlägige Abschätzungen der Erschütterung in und an den benachbarten Gebäuden basierend

auf realen Messdaten und einem Näherungsverfahren für Rüttler mit einer Energie von 1 und 1,7 kNm ausgeführt.

Der geringste Abstand zwischen einer geplanten Windenergieanlage und einem bestehenden Gebäude beträgt 1.056 m (Immissionsort L01 und WEA2). Dem Gebäude wird laut BImSchG und Erschütterungsrichtlinie der Schutzanspruch eines Mischgebiets nach BauNV zugeordnet.

Die beurteilungsrelevanten, zu erwartenden, maximalen Schwinggeschwindigkeiten v_{\max} in der obersten Geschossdecke betragen $\leq 0,106$ mm/s unter Verwendung eines Rüttlers mit einer maximalen Energie von 1,7 kNm. Die Richtwerte für die Beurteilung von Schäden an Gebäuden betragen in der obersten Geschossdecke in horizontaler Richtung 5 mm/s und in vertikaler Richtung 10 mm/s. Aus gutachterlicher Sicht ist selbst bei einer Prognoseunsicherheit von 100 % eine Schädigung des Baubestandes aufgrund des Abstandes auszuschließen.

Aufgrund der fehlenden Angaben zu den zum Einsatz kommenden Rüttlern und fehlender, belastbarer Quellspektren wurde zudem für die Beurteilung der Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden die maximale Schwinggeschwindigkeit v_{\max} mittels eines anerkannten Näherungsverfahrens der DIN 4150-2 in die Beurteilungs-Schwingstärke $KB_{F_{\max}}$ berechnet. Hierbei ergaben sich Werte von $KB_{F_{\max}} \leq 0,08$. Dieser Wert unterschreitet den unteren Immissionsrichtwert $IWO_u = 0,20$ für den Tagzeitraum deutlich, sodass eine erhebliche Belästigung durch Erschütterungen von Menschen in den umliegenden Wohngebäuden ebenfalls tagsüber ausgeschlossen werden kann. Selbst bei einer Prognoseunsicherheit von 100% würde es zu keiner Überschreitung der unteren Immissionsricht- bzw. Anhaltswerte kommen.

Der untere Immissionsrichtwert $IW_r = 0,15$ für den Nachtzeitraum wird ebenfalls eingehalten bzw. deutlich unterschritten. Allerdings ist die überschlägige Berechnung dieser Stellungnahme mit hohen Unsicherheiten verbunden, so dass eine Überschreitung im Nachtzeitraum aus gutachterlicher Sicht als unwahrscheinlich einzuschätzen, aber nicht vollständig auszuschließen ist. Insbesondere ist mit erheblichen Unsicherheiten bei der Ankopplung der Erschütterungen im Boden auf das Gebäudefundament auszugehen. Aus gutachterlicher Sicht und dem Vorsorgeprinzip folgend ist zu empfehlen, zumindest in einem nahegelegenen Wohngebäude normgerechte Erschütterungsmessungen gemäß DIN 4150-2 und Erschütterungsrichtlinie über einen Zeitraum von mindestens einem Bautag mit möglichst mehreren Fundamentgründungen durchzuführen, um die Erschütterungsimmissionen messtechnisch zu ermitteln und die Beurteilungs-Schwingstärke KB_{F_r} nach DIN 4150-2 [4] und Erschütterungsrichtlinie [2] zu bestimmen. Erst nach Vorlage derartiger, belastbarer (normgerechter) und projektspezifischer Messdaten sollte eine Gründung mittels Rüttelstopfverfahren für den Nachtzeitraum und Sonn- und Feiertage, falls notwendig, freigegeben werden.

Selbst bei einer Anwendung eines Rüttlers mit einer maximalen Energie von 2,5 kNm würden sich die gutachterlichen Einschätzungen dieser Stellungnahme nicht ändern. Bei noch größeren Energien der Rüttler sind zumindest für die Ruhezeiten und den Nachtzeitraum Überschreitungen hinsichtlich der Einwirkung von Erschütterungen in Gebäuden nach Erschütterungsrichtlinie und DIN 4150-2 nicht auszuschließen und sollten im Rahmen einer überarbeiteten, überschlägigen Prognose vor Baustart nochmals berechnet und beurteilt werden.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Michael A. Bellmann

Ö. b. u. v. SV für Schwingungen, Erschütterungen und Vibrationen
Fachlich Verantwortlicher der Messstelle für Erschütterungen nach ISO/IEC 17025

2. Einleitung und Aufgabenstellung

Die *Energiekontor AG* plant das Onshore-Windparkprojekt am Standort Wulkow-Booßen in der Nähe von Frankfurt Oder im Bundesland Brandenburg. Dieses Windparkprojekt gilt als genehmigungspflichtige Anlage im Sinne des BImSchG [1], so dass eine Umweltverträglichkeitsstudie für bestimmte Immissionen notwendig wird. Die Fundamentstruktur der geplanten Windenergieanlagen (WEA) sollen als sogenannte Rüttelstopfsäulen hergestellt werden. Bei dieser Art der Fundamentherstellung werden speziell ausgerüstete Rüttler eingesetzt, die Füllmaterial (z. B. Schotter o. ä.) in den Boden einbringen und somit umgebender, nichtbindiger Boden dabei verdichtet wird. Das Rüttelstopfverfahren wird häufig zur Verbesserung der Steifigkeit und der Tragfähigkeit relativ kompressibler und damit wenig tragfähiger, bindiger Bodenschichtungen eingesetzt. Grundsätzlich gehen von diesem Gründungsverfahren Vibrationen bzw. Erschütterungen aus, die in den Boden eingetragen werden.

Im Rahmen der Vorprüfung sollen die von diesem Gründungsverfahren ausgehenden Erschütterungen hinsichtlich möglicher, schädlicher Einflüsse auf die nahegelegene Wohnbebauung und die Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden im Sinne des BImSchG [1] mit den national gültigen Regelwerken DIN 4150-2/3 [4, 5] und der Erschütterungsrichtlinie [2] beurteilt werden.

Der ö. b. u. v. Sachverständige Dr. Michael A. Bellmann (Schwingungen, Erschütterungen und Vibrationen) wurde von der *Energiekontor AG* beauftragt, die zu erwartenden Erschütterungen in einem ersten Arbeitsschritt grob zu überschlagen und die Auswirkungen auf die naheliegende Bebauung und die Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in diesen Gebäuden im Rahmen einer gutachterlichen Stellungnahme zu beurteilen.

Kommentar: Die Begriffe Schwingungen, Erschütterungen und Vibrationen sind synonym zu verwenden.

3. Örtliche Gegebenheiten und derzeitige Projektbeschreibung

Der geplante Windpark wird aus vier Windenergieanlagen bestehen; siehe Abbildung 1. In dem geplanten Windparkgebiet liegen zumeist Böden aus der Weichsel-Eiszeit mit vorwiegend sandigen Böden und Kieseinlagerungen vor und gilt im allgemeinen als nichtbindiger Boden.

Aufgrund des derzeitigen Planungsstands sind die Unterauftragnehmer inkl. eingesetzte Geräte noch nicht bekannt. Auch sind die notwendigen Arbeitsschritte zur Herstellung der Rüttelstopfsäulen (Tiefe und Durchmesser) noch in Planung. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Stellungnahme lediglich eine erste, grobe, überschlägige Abschätzung der zu erwartenden Erschütterungen durchführbar sein.

Die für das Rüttelstopfverfahren zumeist eingesetzten Rüttler besitzen i. d. R. Durchmesser von 30 bis 40 cm. Das Gerätegewicht liegt zumeist bei bis zu 3 t und die verwendete Energie beträgt zumeist zwischen 1 und 2,5 kNm bei eingesetzten Vibrationsfrequenzen zwischen 30 und 60 Hz (hochfrequent). Leistungsstarke und niederfrequente Rüttler (~ 30 Hz) können durchaus auch Energien von > 5 kNm erreichen.

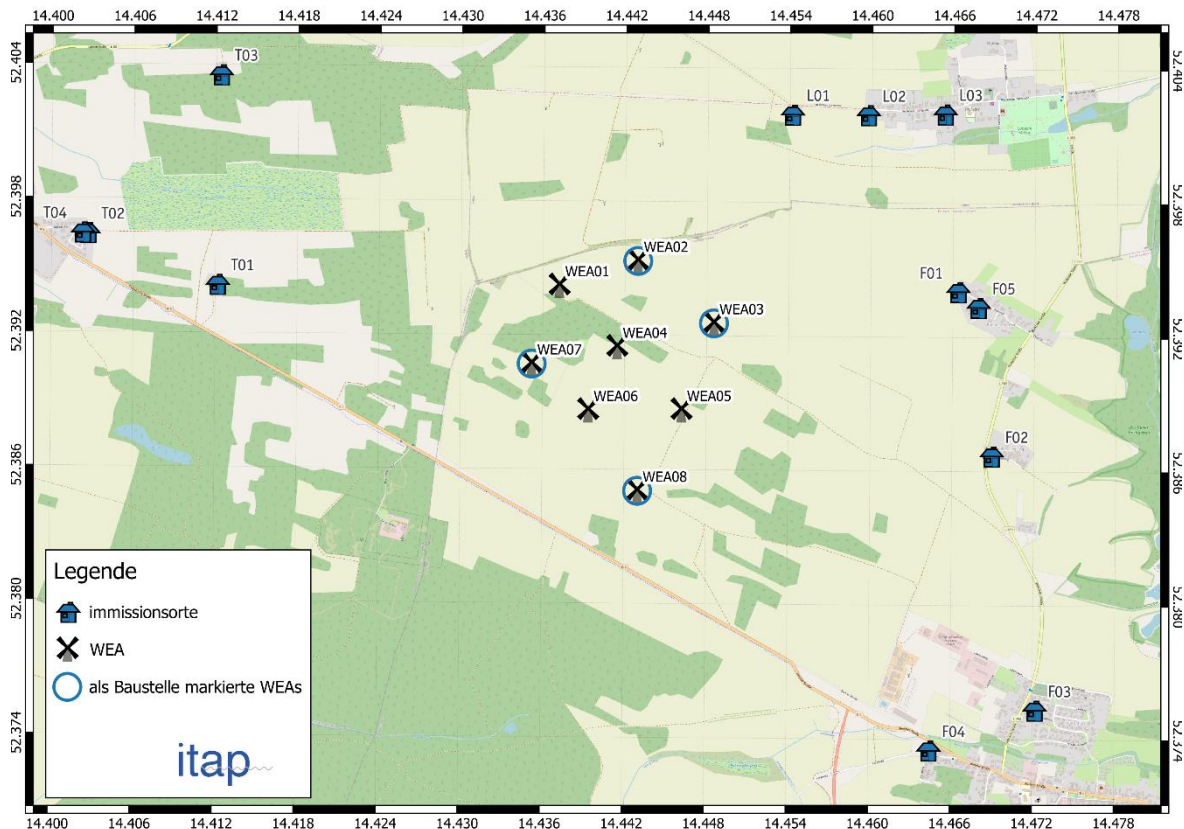


Abbildung 1: Lageplan mit geplanten Windenergieanlagen (WEA) und Immissionsorten (L, F oder T).

4. Beurteilungsgrundlagen

Durch das Rüttelstopfverfahren verursachte Erschütterungsimmissionen sind im Rahmen der Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes [1] nach Vorgaben der Erschütterungsrichtlinie [2] in Verbindung mit der Normenreihe DIN 4150, Teil 2 & 3 [4, 5] zu beurteilen. Die Erschütterungen sind als Dauererschütterung nach der Erschütterungsrichtlinie [2] und der Normenreihe DIN 4150 [4, 5] einzustufen.

In der unmittelbaren Nachbarschaft befinden sich keine geschlossenen Siedlungsstrukturen, sondern lediglich vereinzelte Gebäude. Es ist somit davon auszugehen, dass den vereinzelten Gebäuden der Schutzanspruch eines Mischgebiets nach §6 BauNV zugewiesen werden kann. Nach Erschütterungsrichtlinie ist derartig genutzten Gebäuden der Schutzanspruch hinsichtlich Beurteilungen von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden Tabelle 2, Zeile 3 zuzuordnen. Für die Beurteilung von möglichen Schäden an Gebäuden durch Erschütterungen sind die Schutzansprüche der Tabelle 1, Zeile 2 anzunehmen.

Die maßgeblichen Immissionsrichtwerte für die Begutachtung von Schäden an Gebäuden sind nach Erschütterungsrichtlinie [2] bzw. DIN 4150-3 [5] entsprechend der gegebenen Nutzung anzusetzen; siehe Tabelle 1.

Hinweis: Die Immissionsrichtwerte für kurzzeitige Erschütterungen für die Beurteilung von Schäden an Gebäuden sind deutlich höher, so dass die Annahme von Dauererschütterungen den sensitivsten anzunehmenden Fall darstellt.

Tabelle 1: Zulässige Immissionsrichtwerte gemäß Erschütterungsrichtlinie bzw. Anhaltswerte nach DIN 4150-3 für Dauererschütterungen in mm/s.

Gebäudeart	Dauererschütterungen	
	Oberste Deckenebene, horizontal	Oberste Deckenebene, vertikal*
Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten.	10	10
Wohngebäude und in ihrer Konstruktion und/oder Nutzung gleichartige Bauten.	5	10
Besonders erschütterungsempfindliche Gebäude.	2,5	**

* Vertikale Schwinggeschwindigkeiten führen in der Regel bzw. erfahrungsgemäß bei Geschossdecken nicht zu Schäden, selbst, wenn die bei der statischen Bemessung zulässigen Spannungen voll in Anspruch genommen werden.

** Das Maß der noch unschädlichen Erschütterungseinwirkungen ist im Einzelfall festzulegen.

In Tabelle 2 sind die Anhaltswerte der DIN 4150-2 [4] bzw. die Immissionsrichtwerte der Erschütterungsrichtlinie [2] für die Einwirkungen von Erschütterungen auf den Menschen in Gebäuden dargestellt.

Tabelle 2: Anhaltswerte der DIN 4150-2 [4] bzw. Immissionsrichtwerte der Erschütterungsrichtlinie [3] für Einwirkungen von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden.

Einwirkungsort	tagsüber			nachts		
	IW_u	IW_o	IW_r	IW_u	IW_o	IW_r
1) Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete § 9 BauNVO).	0,40	6,0	0,20	0,30	0,60	0,15
2) Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete § 8 BauNVO).	0,30	6,0	0,15	0,20	0,40	0,10
3) Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen, noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete § 7 BauNVO, Urbane Gebiete § 6a BauNVO, Mischgebiete § 6 BauNVO, Dorfgebiete § 5 BauNVO).	0,20	5,0	0,10	0,15	0,30	0,07
3) Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet § 3 BauNVO, allgemeine Wohngebiete § 4 BauNVO, Kleinsiedlungsgebiete § 2 BauNVO).	0,15	3,0	0,07	0,10	0,20	0,05
5) Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z. B. in Krankenhäusern, in Kurkliniken (§ 11 BauNVO).	0,10	3,0	0,05	0,10	0,15	0,05

Bei Erschütterungsimmissionsmessungen sind die maximalen, bewerteten Schwingstärken KB_{Fmax} mit den Immissionsrichtwerten IW_u und IW_o zu vergleichen. Die Immissionsrichtwerte gelten als überschritten, wenn die maximal bewertete Schwingstärke KB_{Fmax} (einer Richtung) größer als der Immissionswert IW_o ist. Im Falle, dass KB_{Fmax} zwischen IW_u und IW_o liegt, ist die Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} zu berechnen und mit dem Immissionswert IW_r zu vergleichen. Zur Berechnung der Beurteilungsschwingstärke ist ein Beurteilungszeitraum von 16 Stunden tagsüber anzusetzen. Der Beurteilungszeitraum nachts beträgt 8 Stunden.

Die besondere Störwirkung bei Wohngebäuden innerhalb der Ruhezeiten von 06:00 Uhr bis 07:00 Uhr sowie zwischen 19:00 Uhr und 22:00 Uhr wird mit einem Zuschlag (multiplikativer Faktor von 2) bei der Berechnung der Beurteilungsschwingstärke KB_{FTr} berücksichtigt.

5. Ermittlung der zu erwartenden Erschütterungen

5.1 Grundlagen

Erschütterungen sind “mechanische Schwingungen fester Körper mit potentiell schädigender oder belästigender Wirkung”; DIN 4150-3. Mechanische Schwingungen von Festkörpern können durch die zeitlichen Verläufe der kinematischen Größen Schwingweg $s(t)$, Schwinggeschwindigkeit $v(t)$ und Schwingbeschleunigung $a(t)$ beschrieben werden. Eine Umrechnung dieser Größen ist möglich.

Erschütterungen bei Baumaßnahmen, wie z. B. Erd- und Abrissarbeiten, sowie Verdichtungsarbeiten mittels Vibrationswalze oder Einbringung von Fundamentstrukturen mittels Vibrations- oder Schlagrammung, werden im Boden durch Krafteinwirkungen auf seine Oberfläche und/oder dem (Erd-) Boden hervorgerufen. Durch die Krafteinwirkungen breiten sich im Boden Raumwellen aus; zu unterscheiden sind dabei Kompressionswellen (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen). Entlang von Baugrundoberflächen breiten sich zudem sogenannte Rayleigh-Wellen (R-Wellen) aus. An bestehenden Schichtgrenzen können diese Wellen z. T. reflektiert werden.

Ab einem gewissen Abstand zur Quelle (Fernfeld) werden die Schwingungen vorwiegend durch R-Wellen dominiert, so dass eine Prognose möglich wird. Die Oberflächenwellen haben sowohl vertikale, als auch horizontale Ausrichtungskomponenten und breiten sich i. d. R. nahe an der Bodenoberfläche im Fernfeld aus. Die DIN 4150-1 definiert das Fernfeld durch:

$$R_{\text{Fern}} \sim \text{Wellenlänge der Oberflächenwelle (hier Rayleigh-Welle)} \quad \text{Gleichung 1.}$$

Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Quotienten der bodenabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit der R-Welle und der Schwingfrequenz. Für lockere, gelagerte, nichtbindige Böden oder weiche, bindige Böden werden i. d. R. Ausbreitungsgeschwindigkeiten von ca. 150 m/s, für dicht gelagerte Kiese oder Lockergesteine zumeist Werte bis 400 m/s angenommen. Damit ergeben sich bei einer Schwinggeschwindigkeit von z. B. 50 Hz zumeist Abstände zwischen 3 und 8 m. Für kleinere Frequenzen ergeben sich entsprechend größere Abstände.

Aufgrund der Vielzahl von derzeit nicht bestimmbar (Einfluss-) Parametern für die Beurteilung der möglichen Erschütterungen, wie z. B. Größe und Art des zu verwendenden Rüttlers, Anzahl der Fundamentgründungen pro Tag, verwendetes Material und die örtlichen Gegebenheiten des Bodens, um nur einige zu nennen, empfiehlt es sich nicht, eine detaillierte Erschütterungsprognose nach DIN 4150-1 [3] durchzuführen. Die damit verbundene Prognoseunsicherheit würde im Bereich der eigentlichen Prognosewerte rangieren.

Aus diesem Grund werden hier reale Messdaten bei Verwendung eines Rüttelstopfverfahrens mit Rüttlern der Fa. *Keller Grundbau GmbH* mit Energien zwischen 1 und 1,7 kNm in Abbildung 1 zusammengefasst [6, 7, 8].

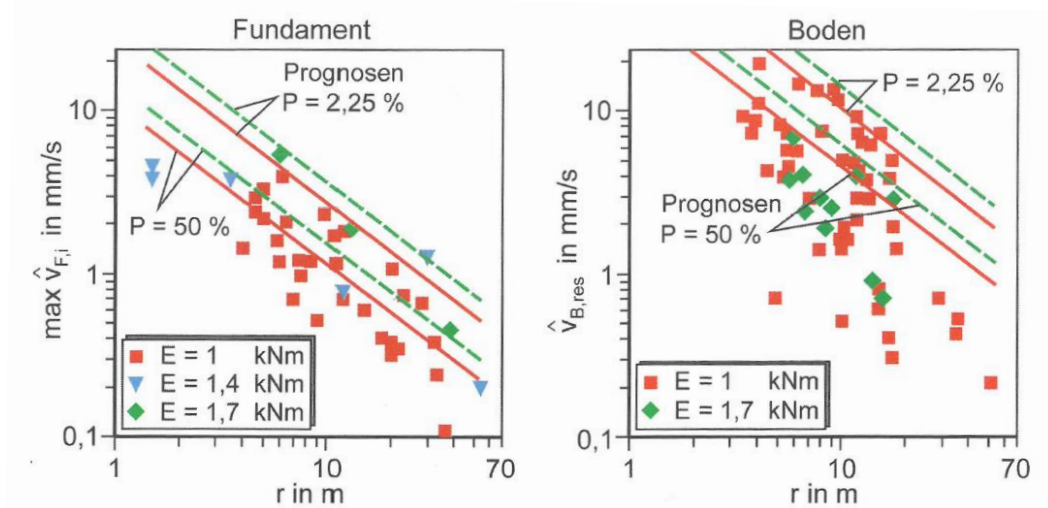


Abbildung 2: Vergleich von Mess- und Prognosewerten für Tiefrüttler [8].

Eine Möglichkeit für die grobe, überschlägige Prognose der zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten im Boden und im Fundament kann nach Literaturangaben mit nachfolgenden Ansätzen ermittelt werden [6,7].

$$v_{B,res} = (48,1 \text{ bis } 116,2) \frac{\sqrt{E}}{r} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\max v_{Fi}(r) = (11,8 \text{ bis } 28,6) \frac{\sqrt{E}}{r} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

E = Energie des eingesetzten Rüttlers,

R = Abstand Quelle – Immissionsort.

Die bei den nachfolgenden Berechnungsergebnissen in Klammern gesetzten Werte beziehen sich auf die Überschreitungswahrscheinlichkeiten: der kleinere Wert liefert eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von P50% und größere Werte von P2,25%. Dieser vereinfachte Prognoseansatz berücksichtigt allerdings weder Geländekanten oder Hindernisse, wie z. B. befestigte Straßen, zwischen Quelle und Gebäude oder unterschiedliche Bodenstrukturen. Zudem wird ein grob pauschalierter Ansatz der Ankopplung zwischen Bodenschwingung und Gebäudefundament angesetzt, der weder Gebäudetypen-, noch Frequenz-abhängig ist.

5.2 Einwirkungen von Erschütterungen auf Gebäude

Gemäß der DIN 4150-3 und der Erschütterungsrichtlinie sind für Dauererschütterungen, die für die oberste Geschossdecke in horizontaler und vertikaler Richtung zu ermittelnden Werte, mit den in Tabelle 1 dargestellten Anhalts- bzw. Immissionsrichtwerten zu vergleichen.

Im vorliegenden Fall beträgt der geringste Abstand zwischen einer geplanten WEA und einem Immissionsort 1.056 m (WEA2 – L01).

Durch eine überschlägige Prognose lassen sich am Fundament des Gebäudes L01 nachfolgende, maximale Schwinggeschwindigkeiten frequenzunabhängig berechnen:

- Fundamentalschwinggeschwindigkeit für Rüttler mit 1,7 kNm Energie:
 - $v_{Fi,max} = 0,035 \text{ mm/s}$ ($P = 2,25\%$),
 - $v_{Fi,max} = 0,015 \text{ mm/s}$ ($P = 50\%$),
- Fundamentalschwinggeschwindigkeit für Rüttler mit 1,0 kNm Energie:
 - $v_{Fi,max} = 0,027 \text{ mm/s}$ ($P = 2,25\%$),
 - $v_{Fi,max} = 0,012 \text{ mm/s}$ ($P = 50\%$).

Übertragung der Erschütterungen vom Fundament bis zur obersten Geschossdecke

Bei der Übertragung von Erschütterungen vom Fundament eines Gebäudes bis zur obersten Geschossdecke verstärken sich die Erschütterungen in vertikaler und horizontaler Richtung zumeist. Zudem treten die maximalen Schwinggeschwindigkeiten in der obersten Geschossdecke bei deren Eigenfrequenz auf. In der Literatur [7, 9] sind für vertikale Deckenresonanzen Werte zwischen 15 bis 35 Hz (zumeist 20 bis 25 Hz) für Stahlbetondecken im Wohnungsbau und 5 bis 15 Hz (zumeist 7 bis 10 Hz) für weitgespannte Stahlbetondecken im Industriebau zu finden.

In horizontaler Richtung wird zumeist die Eigenfrequenz des Gebäudes maximal angeregt, die von der Geschoszahl des Gebäudes abhängig ist. Horizontale Gebäudeeigenfrequenzen liegen meistens unterhalb von 5 Hz bei Gebäuden mit 1. und 2. Obergeschoss und sind damit deutlich kleiner als die erwarteten Anregungsfrequenzen der Erschütterungsquelle.

Die Erschütterungsimmissionen in horizontaler Richtung in der obersten Geschossdecke können im ungünstigsten Fall einen um den Faktor 2 höheren Wert als die am Fundament annehmen [7, 9]. In vertikaler Richtung ist eine Vergrößerung um den Faktor 3 im ungünstigsten Fall möglich [9].

Tabelle 3: Gegenüberstellung der zulässigen Immissionsrichtwerte gemäß Erschütterungsrichtlinie [2] bzw. Anhaltswerten nach DIN 4150-3 [4] für Dauererschütterungen in mm/s und die durch überschlägige Prognose ermittelten Erschütterungsimmisionen, verursacht durch Verdichtungsarbeiten an der WEA2 im Wohngebäude IO3.

Geräteenergie	Parameter	Prognoseergebnis	Immissionsrichtwerte
1,7 kNm	Schwinggeschwindigkeit horizontale, oberste Geschossdecke:	0,029 mm/s (P = 50%) 0,071 mm/s (P = 2,25%)	5 mm/s (Wohngebäude)
	Schwinggeschwindigkeit vertikale, oberste Geschossdecke:	0,044 mm/s (P = 50%) 0,106 mm/s (P = 2,25%)	10 mm/s (Wohngebäude)
1,0 kNm	Schwinggeschwindigkeit horizontale, oberste Geschossdecke:	0,022 mm/s (P = 50%) 0,054 mm/s (P = 2,25%)	5 mm/s (Wohngebäude)
	Schwinggeschwindigkeit vertikale, oberste Geschossdecke:	0,034 mm/s (P = 50%) 0,081 mm/s (P = 2,25%)	10 mm/s (Wohngebäude)

Die ermittelten Schwinggeschwindigkeiten für die Verdichtungsarbeiten mittels Rüttelstopfverfahrens unterschreiten die zulässigen Immissionsrichtwerte bzw. Anhaltswerte für Wohngebäude (Tabelle 2) in horizontaler und in vertikaler Richtung an der obersten Geschossebene im Gebäude L01 deutlich. Die Erschütterungsrichtlinie führt für diesen Fall aus [2]:

Es ist somit im Sinne des BImSchG [1] in Verbindung mit der Normenreihe DIN 4150 [3, 4] und der Erschütterungsrichtlinie [2] davon auszugehen, dass die o. g. Erschütterungsimmisionen keine Schäden im Sinne der Normenreihe DIN 4150 verursachen.

Qualität der Ermittlung der Erschütterungsimmisionsprognose

Die durchgeführte, überschlägige Prognose der zu erwartenden Erschütterungsimmisionen am Wohngebäude L01 können aus den nachfolgenden Gründen als konservativ, d. h. „schwingungstechnisch schlimmster, anzunehmender Fall“, betrachtet werden:

- Es wurden keine erhöhten Bodendämpfungen durch das Gelände in Form von Straßen, Absätzen oder nichtbindigen Bodenschichtungen angenommen.
- Zudem wurden die Prognosen für zwei unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten berechnet.

- Für den Übertragungsfaktor der Fundamentalschwinggeschwindigkeiten in die oberste Deckenebene wurden die Werte 2,0 für die horizontale und 3,0 für die vertikale Deckengeschossebene angenommen. Dies sind laut Literatur [z. B. 7, 9] und eigenen Messerfahrungen [6] die praktisch maximalen Übertragungsfaktoren in einem Gebäude, die i. d. R. nur bei Anregungen mit der Eigenfrequenz des Gebäudes eintreten können.

5.3 Einwirkungen von Erschütterungen auf Menschen in Gebäude

Die Wahrnehmung von Erschütterungen bei Menschen ist u. a. abhängig von der Frequenz und der Körperhaltung (z. B. [9, 10]). Eine detaillierte Prognose der durch Menschen in Gebäuden wahrnehmbaren Erschütterungen ist aufgrund der fehlenden Quellspektren des Rüttelstopfverfahrens, der frequenzabhängigen Ausbreitung im Boden und der Ankopplung ans Gebäudefundament bzw. der Ausbreitung im Gebäude im Detail nicht möglich. Die DIN 4150-2 gibt jedoch für genau diesen Fall ein Näherungsverfahren in Kapitel 7 an, mit dem der erschütterungstechnisch „schlimmste anzunehmende Fall“ grob abschätzbar ist. Für diesen Fall ist mit einer Unsicherheit von bis zu 15 % auszugehen, die im nachfolgenden aus Sicherheitsgründen auf die Prognoseergebnisse hinzuaddiert wird.

In dem Näherungsverfahren werden die maximalen Schwinggeschwindigkeiten (hier aus Kapitel 5.2) zugrunde gelegt und mit einem bewährten Erfahrungswert (c_F aus Tabelle 3 der DIN 4150-2; für dieses Projekt $c_F = 0,9$) multipliziert. Zudem wird ein Verfahren für die Umrechnung der maximalen, Frequenz-unabhängigen Schwinggeschwindigkeit in ein KB-bewertetes Signal vorgestellt (Gleichung 6 und 7 der DIN 4150-2).

In Tabelle 4 sind die überschlägigen, beurteilungsrelevanten Werte für KB_{Fmax} für die in Tabelle 3 zugrundeliegenden, maximalen Schwinggeschwindigkeiten zusammengefasst und den relevanten Anhalts- bzw. Immissionsrichtwerten gegenübergestellt.

Die ermittelten, beurteilungsrelevanten, bewerteten, maximalen Schwingstärken KB_{Fmax} für die Verdichtungsarbeiten des Rüttelstopfverfahrens unterschreiten die zulässigen Immissionsrichtwerte bzw. Anhaltswerte I_{Wu} für Wohngebäude (Tabelle 4) in horizontaler und in vertikaler Richtung in der obersten Geschossebene im Gebäude L01 deutlich. Die Erschütterungsrichtlinie führt für diesen Fall aus [2]:

Es ist somit im Sinne des BImSchG [1] in Verbindung mit der Normenreihe DIN 4150 [3, 4] und der Erschütterungsrichtlinie [2] davon auszugehen, dass die o. g. Erschütterungsimmissionen keine erhebliche Belästigung auf Menschen durch Erschütterungen in Gebäuden verursachen.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der zulässigen Immissionsrichtwerte gemäß Erschütterungsrichtlinie [2] bzw. Anhaltswerten nach DIN 4150-3 [4], die Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden bei den Verdichtungsarbeiten an der WEA2 im Wohngebäude L01 haben.

Geräte- energie	Maximale Beurteilungs- Schwingstärke KB_{Fmax}	Immissionsrichtwerte					
		tagsüber			nachts		
		IW_u	IW_o	IW_r	IW_u	IW_o	IW_r
1,7 kNm	Horizontal 0,05 (P2,25%) 0,02 (P50%)	0,20	5,0	0,10	0,15	0,30	0,07
	Vertikal 0,08 (P2,25%) 0,03 (P50%)						
1,0 kNm	Horizontal 0,04 (P2,25%) 0,02 (P50%)						
	Vertikal 0,06 (P2,25%) 0,03 (P50%)						

Qualität der Ermittlung der Erschütterungsimmissionsprognose

Die durchgeführte, überschlägige Prognose der zu erwartenden Erschütterungsimmissionen am Wohngebäude L01 können aus den nachfolgenden Gründen als konservativ, d. h. „schwingungstechnisch schlimmster, anzunehmender Fall“, betrachtet werden:

- Es wurden keine erhöhten Bodendämpfungen durch das Gelände in Form von Straßen, Absätzen oder Bodenschichtungen angenommen.
- Zudem wurden die Prognosen für zwei unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten berechnet (Überschreitungswahrscheinlichkeit 2,25% und 50%).
- Es wurde im Näherungsverfahren ein Unsicherheitsfaktor von 15% auf die eigentlichen, überschlägigen Prognoseergebnisse hinzuaddiert, die durch die Wahl der Konstanten c_f im Näherungsverfahren entstehen könnten.
- Für den Übertragungsfaktor der Fundamentalschwinggeschwindigkeiten in die oberste Deckenebene wurden die Werte 2,0 für die horizontale und 3,0 für die vertikale Deckengeschosebene angenommen. Dies sind laut Literatur [z. B. 7, 9] die praktisch maximalen Übertragungsfaktoren in einem Gebäude, die i. d. R. nur bei Anregungen mit der Eigenfrequenz des Gebäudes eintreten können.

6. Verwendete Gesetze, Normen, Richtlinien und Hilfsmittel

- [1] **BImSchG:** „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG), aktuelle Fassung
- [2] **Erschütterungsrichtlinie** Hinweise zur Messung, Beurteilung und Verminderung von Erschütterungsimmissionen. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), aktueller Stand
- [3] **DIN 4150-1** Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen (2001)
- [4] **DIN 4150-2** Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden (06/1999)
- [5] **DIN 4150-3** Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen (12/2016)
- [6] Rizkallah, Achmus, Kaiser, Hilmer, Vogel Engelhardt, Raabe, Pfeiffer,, Helmbrecht, Kuhn, Bargstädt, Weyhe, Englert, Fuchs & Rizkallah. „**Bauschäden im Hoch- und Tiefbau - Band 1: Tiefbau**“, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN978-3-8167-7292-7, 2007
- [7] Achmus, M. „**Prognose und Bewertung von Bauwerksererschütterungen infolge Tiefbauarbeiten**“, Bautechnik 92, Heft 9, S. 617-623, 2015
- [8] Achmus, M.; Kaiser, J.; tom Wörden, F. „**Bauwerksererschütterungen durch Tiefbauarbeiten, Grundlagen – Messergebnisse – Prognosen. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau**“, Universität Hannover, Heft 61, 2005.
- [9] Griffin MJ: „**Handbook of Human Vibration**“ Academic Press, ISBN 0-12-303041-2, 1990.
- [10] Bellmann MA: „**Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on passenger’s comfort inside vehicles**“ Dissertation an der Universität Oldenburg, Shaker Verlag, 2002.