

SCHALLTECHNISCHER BERICHT R-2-2021-0343.02

Bestimmung einer Musteranlage als Abstandshalter einer Flächennutzungsplanung im Gemeindegebiet der Stadt Willebadessen

Der vorliegende Bericht R-2-2021-0343.02 ersetzt den vorangegangenen Bericht R-2-2021-0343.01 vom 30.11.2022 vollständig.

Datum:

05.12.2022

Auftraggeber:

Stadt Willebadessen
Fachbereich Bauen und Planen
Abdinghofweg 1
34439 Willebadessen

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Oliver Bunk

1.) Zusammenfassung

Die Stadt Willebadessen im Kreis Höxter in Nordrhein-Westfalen erwägt einen neuen Flächennutzungsplan (F-Plan) mit der Nutzung von Windenergie zu erstellen. Für die Überplanung der auszuweisenden Flächen soll eine Musteranlage im Vorfeld entworfen werden, um damit die zur Verfügung stehenden Flächen nachhaltig im Sinne der zukünftigen technischen Entwicklung der Windenergie zu nutzen.

Dabei soll die Musteranlage dem technologischen Fortschritt der kommenden fünf bis acht Jahre entsprechen und somit eine Planungsgrundlage hinsichtlich Größe der WEA selbst, dem Planungsprozess hinsichtlich dem Flächenkontingent sowie Fragen zur Infrastruktur abbilden.

Für die Dimensionierung wurde der aktuelle Stand der Windenergie betrachtet und mit Hilfe von Abwägungen aus dem Trend der letzten Jahre, Interviews mit den Herstellern zum Status Quo der Windenergie und möglichen technischen Fortschritten sowie zukünftiger Ausrichtungen auf dem Markt wie auch eigener Recherchen zu Randthemen der Windenergie bewertet.

Auf Grundlage unserer abschließenden Bewertung empfehlen wir für die Musteranlage folgende Dimensionen anzusetzen:

| | |
|------------------------------|--------------------|
| Nennleistung: | 8 MW |
| Rotordurchmesser: | 200 m |
| Nabenhöhe: | 220 m |
| Gesamthöhe: | 320 m |
| Schallleistungspegel: | 108,0 dB(A) |

Anzumerken ist, dass in bestimmten Konstellationen der Gegebenheiten am Standort wie Flächenverfügbarkeiten, Vorbelastung, Artenschutz, Luftfahrt, der Anlagendimensionen oder der Aufstellung an sich (Parkwirkungsgrad, Baulasten etc.) die Planung von kleineren WEA-Größen wirtschaftlich und planerisch von Vorteil ist.

Vorliegender Bericht wurde nach bestem Wissen und Gewissen mit größter Sorgfalt erstellt. Dieser Bericht enthält 43 Seiten inkl. drei Anlagen. ¹⁾

Der vorliegende Bericht R-2-2021-0343.02 ersetzt den vorangegangenen Bericht R-2-2021-0343.01 vom 30.11.2022 vollständig. Es wurden redaktionelle Änderungen auf Seite 12 und in der Abbildung 6 Ergänzungen vorgenommen.

Rheine, 05.12.2022 OB / BB

KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG

Bericht verfasst durch:
Fachgebietsleiter Windenergie:

geprüft und freigegeben durch



i. V. Dipl.-Ing. Oliver Bunk

Projektleiter
stellvertr. fachlich verantwortlich
Geräusche Gruppe V



i. V. Dipl.-Ing. Frank Henkemeier

fachlich verantwortlich
Geräusche Gruppe V
Erschütterungen Gruppe VI

¹⁾ Die Weitergabe von Daten oder Informationen ist dem Auftraggeber gestattet. Authentisch ist dieses Dokument nur mit Originalunterschrift. Bezüglich der Urheberrechte verweisen wir auf die jeweils gültigen KCE-Beratungsbedingungen.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|--|----|
| 1.) | Zusammenfassung | 2 |
| 2.) | Überlegungen zur zukünftigen Entwicklung Windenergie an Land | 6 |
| 2.1. | Aktueller technischer Stand WEA | 6 |
| 2.2. | Regionale Unterschiede der Anlagenkonfiguration | 8 |
| 2.3. | Vergleich Installationen WEA Nordrhein-Westfalen und Deutschland | 10 |
| 3.) | Weiterführende Überlegungen | 14 |
| 3.1. | Strompreisentwicklung | 14 |
| 3.2. | Herstellungskosten | 14 |
| 3.3. | Netzeinspeisung | 15 |
| 3.4. | Flächenverfügbarkeit | 15 |
| 3.5. | Anlagenvielfalt | 15 |
| 3.6. | Logistik und Transport | 16 |
| 3.7. | Aufbau von WEA | 16 |
| 3.8. | Akzeptanz von WEA | 17 |
| 3.9. | Flugverkehr | 17 |
| 3.10. | Design von WEA | 18 |
| 3.11. | Bodenverhältnisse | 18 |
| 3.12. | Parallele Nutzung bereits bebauter WEA-Flächen mit weiteren regenerativen Energien | 19 |
| 3.13. | WEA und Vögel | 20 |
| 4.) | Fazit Musteranlage | 21 |
| 4.1. | Dimensionen Musteranlage | 21 |
| 4.2. | Graphischer Vergleich Musteranlage | 22 |
| 5.) | Überlegungen zum Immissionsverhalten der Musteranlage | 24 |
| 5.1. | Schalleistungspegel der Musteranlage | 24 |
| 5.2. | Frequenzspektrum der Musteranlage | 26 |
| 5.3. | Schallausbreitung der Musteranlage | 28 |

| | | |
|-----|-------------------------------|----|
| 6.) | Bearbeitungsgrundlagen | 32 |
| 7.) | Abkürzungen und Formelzeichen | 34 |
| 8.) | Anlagen | 35 |

2.) Überlegungen zur zukünftigen Entwicklung Windenergie an Land

Vor gut einem Jahr hat Vestas in einer Pressemitteilung [1] verkündet, die leistungsstärkste Windenergieanlage der Welt mit 15 MW im Testzentrum Østerild in Dänemark zu errichten. Dabei handelt es sich um den Prototypen Vestas V236-15.0 MW für die Offshore-Windenergie mit einem Rotordurchmesser von 236 m und einer Gesamthöhe von 280 m, der in der zweiten Jahreshälfte 2022 installiert werden soll. Vestas sagt: „Die Errichtung des Prototyps unterstreicht, wie die V236-15.0 MW die Messlatte für technologische Innovation, Industrialisierung und Skalierung in der Windenergiebranche höher legen wird.“ [Anders Nielsen, Vestas, 2021].

In einer weiteren Pressemitteilung aus Oktober 2022 [2] wird seitens Vestas über die Fertigstellung des Prototyps V236-15.0 MW berichtet und dass die WEA nun für weitere Tests vorbereitet wird, bevor diese zum Testzentrum Østerild gebracht und errichtet wird.

Kann nun davon ausgegangen werden, dass der technologische Fortschritt in der Windenergie an Land ebenfalls diesen Weg des Wachstums einschlägt? Können diese Dimensionen ebenfalls für die Musteranlage übernommen werden?

Es stellen sich daraus folgend nun zwei Fragen: erstens, welchen Einfluss hat eine Entwicklung einer Multimegawatt-Maschine aus dem Offshorebereich auf die Entwicklung der Windenergie an Land? Und zweitens, ist hier ein technologischer Status im Offshorebereich eins zu eins hinsichtlich der Dimensionen von größeren WEA in Bezug auf Leistung, Rotordurchmesser und Nabenhöhe übertragbar?

Im Folgenden werden einige allgemeine Überlegungen zum aktuellen Stand der Windenergie an Land, dem potentiellen Wachstum der Windenergie und den damit verbundenen Randthemen rund um die Errichtung der Windenergieanlagen angestellt.

2.1. Aktueller technischer Stand WEA

Um einen ersten Überblick über die technische Entwicklung der Windenergieanlagen in Deutschland zu erhalten, kann ein Blick in den Report zum Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland für das Jahr 2021 [3] geworfen werden.

Dieser fasst alle Daten der im Jahr 2021 installierten WEA zusammen. In 2021 wurden 484 neue WEA an Land errichtet und weisen folgende Eckdaten im Mittel auf:

| Durchschnittliche Anlagenkonfiguration | Zubau Jahr 2021 | Veränderung zum Vorjahr |
|--|-----------------|-------------------------|
| Anlagenleistung | 3.978 kW | + 17 % |
| Rotordurchmesser | 133 m | + 10 % |
| Nabenhöhe | 140 m | + 4 % |
| Gesamthöhe | 206 m | + 6 % |

Tabelle 1: Durchschnittliche Anlagenkonfiguration in 2021 gemäß [3]

Gegenüber den vorherigen Jahren 2020 und 2019 haben die WEA-Dimensionen, hier insbesondere bei installierter Leistung sowie bei den Rotordurchmessern, einen gewaltigen Technologiesprung erfahren. Die stetige Entwicklung der WEA-Technologie resultiert zum größten Teil aus immer wieder neuen Anlagentypen, die den Markt erreichen.

Unsere Recherchen [4] zeigen allerdings auch, dass momentan bei den drei Top-WEA-Herstellern in Deutschland der Trend erkennbar ist, dass die Vielfalt der WEA-Typen, bezogen auf die Leistung und der angebotenen WEA-Typen, innerhalb des Portfolios der Hersteller schrumpfen. Enercon bietet mittlerweile keine WEA unterhalb von 2,3 MW, Vestas sogar unterhalb von 3,45 MW und Nordex unterhalb von 3,6 MW installierter Nennleistung mehr an. Bezogen auf den Rotordurchmesser stellt Enercon mit minimal 71 m gegenüber den beiden anderen Herstellern Vestas und Nordex mit minimal 117 m die kleinste verfügbare WEA auf dem Markt zur Verfügung.

Weiterhin zeigen die Recherchen [4] für die Hersteller, bezogen auf die maximal verfügbaren Anlagengrößen, ein ähnliches Bild: alle Hersteller, außer Vestas mit 7,2 MW und Siemens-Gamesa mit 7,0 MW, bieten eine installierte Nennleistung um die 6 MW an. Bezogen auf den maximalen Rotordurchmesser im Portfolio der Hersteller etablieren sich Durchmesser in der Größenordnung 175 m, bei den Herstellern GE und eno energy dagegen nur im Bereich um die 160 m.

Anmerkung:

Berücksichtigt wurden bei der Recherche [4] nur WEA-Hersteller, die bislang in 2022 gemäß dem Windenergie-Hersteller Ranking 2022 [5] Windenergieanlagen errichtet haben. Die Firma MAX-wyn GmbH (Max Bögel GmbH), die in diesem Ranking ebenfalls gelistet ist, errichtet zwar WEA, produziert diese aber nicht selber und findet deshalb keine Erwähnung.

| Hersteller | WEA-Typ | Installierte Nennleistung | Rotordurchmesser | Größte verfügbare Nabenhöhe |
|---------------------------|------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|
| ENERCON GmbH | E-175 EP5 | 6,0 MW | 175 m | 160 m |
| Vestas Deutschland GmbH | V172-7.2 | 7,2 MW | 172 m | 175 m |
| Nordex SE | N175/6.X | 6,2 MW | 175 m | 179 m |
| GE Renewable Germany GmbH | GE-164 | 6,0 MW | 164 m | 167 m |
| Siemens Wind Power GmbH | SG 7.0-170 | 7,0 MW | 170 m | k. A. |
| VENSYS Energy AG | VS170 | 5,8 MW | 170 m | 160 m |
| ENO Energy GmbH | eno160 | 6,0 MW | 160 m | 165 m |

Tabelle 2: Aktuell größten verfügbaren Windenergieanlagen verschiedener Hersteller gemäß eigener Recherche [4] anhand des Hersteller-Rankings 2022 [5], Stand Oktober 2022

2.2. Regionale Unterschiede der Anlagenkonfiguration

Verschiedene Anlagenstandorte in Deutschland bedingen verschiedene Ansprüche an die Anlagenkonfigurationen bzw. -dimensionen. So sind in Norddeutschland hohe Turmhöhen nicht unbedingt notwendig, da die Zunahme des logarithmischen Windprofils mit der Höhe schon früh erreicht ist und größere Türme Mehrkosten verursachen bei gleichzeitig weniger Zunahme der zu erwartenden Energie. Ebenso verhält es sich mit den Rotordurchmessern, die in nördlichen Gebieten Deutschlands eher kleiner gewählt werden, da es sich hier meist um Starkwindstandorte handelt und die Lasten durch Böen deutlich höher sind als im Binnenland. Weitere Randbedingungen für die Anlagengröße in den Bundesländern sind Infrastruktur, verfügbare Flächen, Zuwegungen, bestehende WEA am Standort, Repoweringmöglichkeiten, örtliche Beschränkungen oder Auflagen sowie Verfügbarkeiten der WEA-Typen.

Eine Übersicht hierzu gibt der Report Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland für das 1. Halbjahr 2021 [6]. Dieser zeigt auf, dass die Küstenländer Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern mit die kleinsten Nabenhöhen und Rotordurchmesser besitzen. Binnenländer weisen einen ähnlichen Trend auf, Thüringen bildet hier die Ausnahme und ist 2022 Spitzenreiter in puncto Rotordurchmesser und Nabenhöhe.

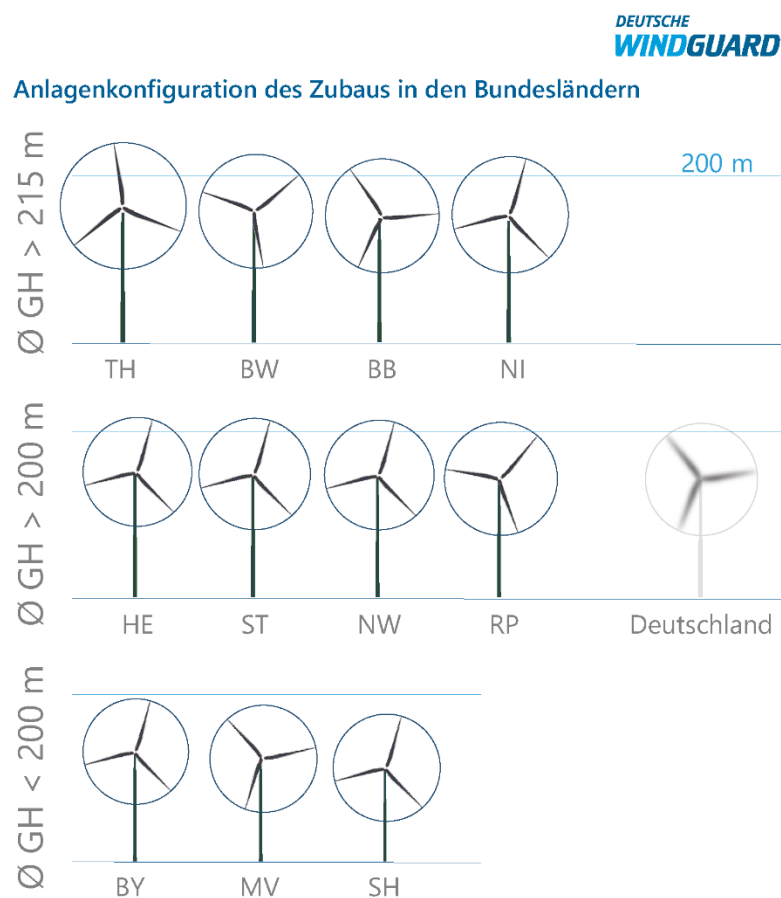


Abbildung 1: Unterschiede Anlagenkonfiguration des Zubaus in den Bundesländern gemäß [6] in 2021

2.3. Vergleich Installationen WEA Nordrhein-Westfalen und Deutschland

Um nun in eine Prognose für eine Musteranlage in der Gemeinde Willebadessen zu gehen, sind die regionalen Gegebenheiten zu bewerten. Dazu werden die Daten des Bundesdurchschnittes mit den Daten des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (NRW) verglichen.

| Zubau 1. Halbjahr 2022 | Anlagenleistung | Rotordurchmesser | Nabenhöhe | Gesamthöhe |
|---------------------------|-----------------|------------------|-----------|------------|
| Deutschland | 4.103 kW | 133 m | 134 m | 201 m |
| Nordrhein-Westfalen | 3.987 kW | 133 m | 144 m | 211 m |

Tabelle 3: Durchschnittliche installierte Anlagenkonfiguration bundesweit und in Nordrhein-Westfalen im Vergleich 1. Halbjahr 2022 gemäß [7]

Die Daten NRW zeigen eine geringere Anlagenleistung als der Bundesdurchschnitt. Dies könnte sich aus der hohen Anzahl der in Nordrhein-Westfalen installierten Enercon-WEA ableiten, die tendenziell gegenüber den Mitbewerbern eine geringere installierte Nennleistung bei gleichem Rotordurchmesser besitzen. Der Rotordurchmesser ist sowohl in NRW als auch im Bundesdurchschnitt gleich. Dagegen werden in Nordrhein-Westfalen im Schnitt höhere Nabenhöhen installiert als bundesweit, was auch wiederum eine höhere Gesamthöhe zufolge hat.

Für die Bildung eines Trends wurden die von der WindGuard seit 2012 erhobenen Daten ausgewertet. Aus den erhobenen Daten für installierte Leistung, Rotordurchmesser und Nabenhöhe der letzten zehn Jahre wurde eine (lineare) Trendlinie gebildet.

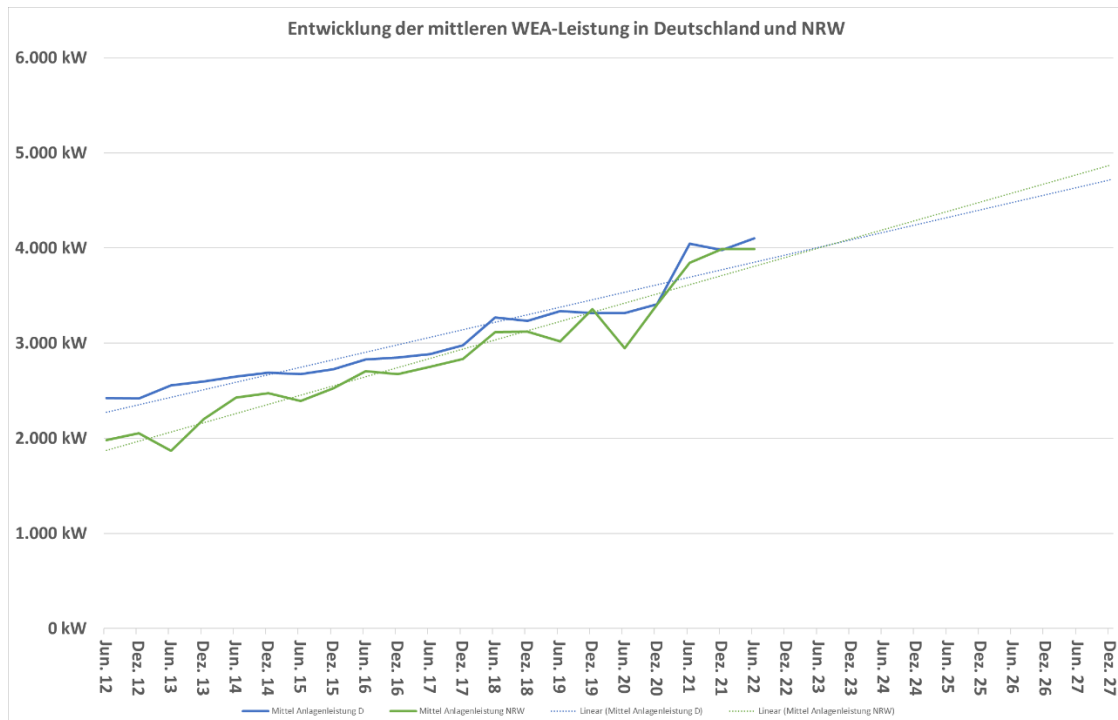


Abbildung 2: Bildung eines Trends zur installierten jährlichen mittleren elektrischen Leistung bundesweit und in NRW

Die Daten zeigen über den untersuchten Zeitraum der letzten zehn Jahre eine allmähliche Annäherung der mittleren installierten Nennleistung in NRW an die bundesweite Datenlage. Wie die Trendkurven zeigen, wird sich der Trend zukünftig umkehren. Die Trendkurven zeigen bei einer Vorschau von fünf Jahren eine zukünftige installierte Leistung von 5 MW im Mittel.

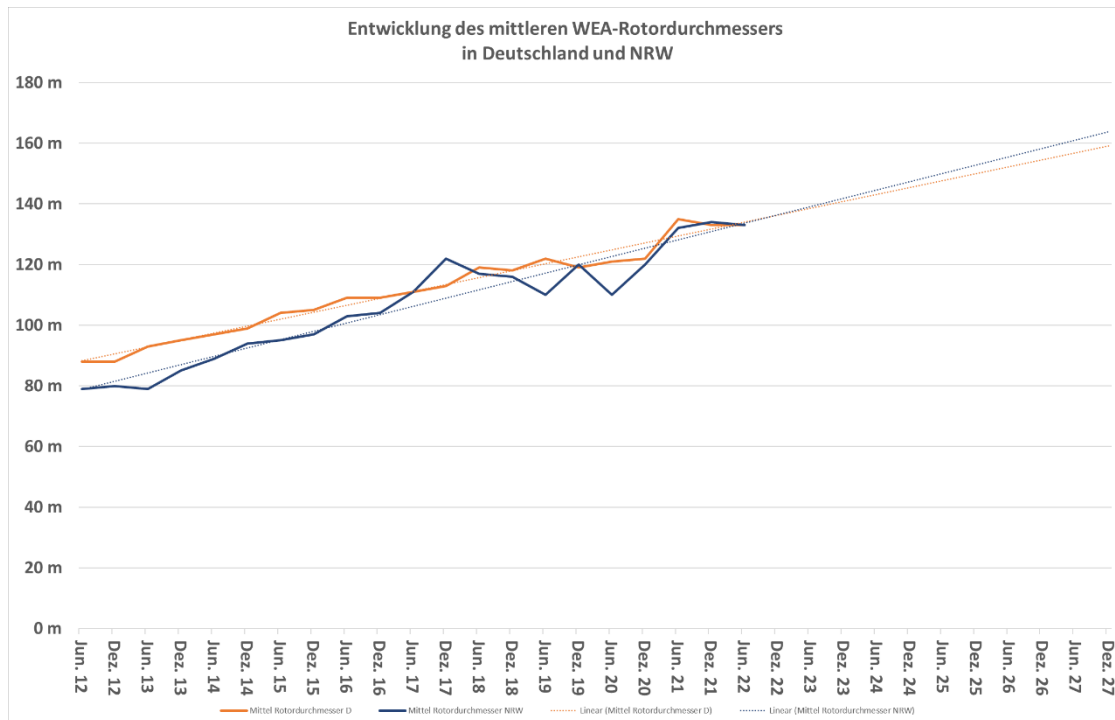


Abbildung 3: Bildung eines Trends zum installierten mittleren Rotordurchmesser bundesweit und in NRW

Für die ermittelten Daten des mittleren Rotordurchmessers zeigt der untersuchte Zeitraum der letzten zehn Jahre ebenfalls eine allmähliche Annäherung der Werte aneinander in NRW an die bundesweite Datenlage. Wie die Trendkurven zeigen, ist der Trend gerade dabei sich umkehren. Die Trendkurven zeigen bei einer Vorschau von fünf Jahren einen zukünftigen Rotordurchmesser von 160 m im Mittel.

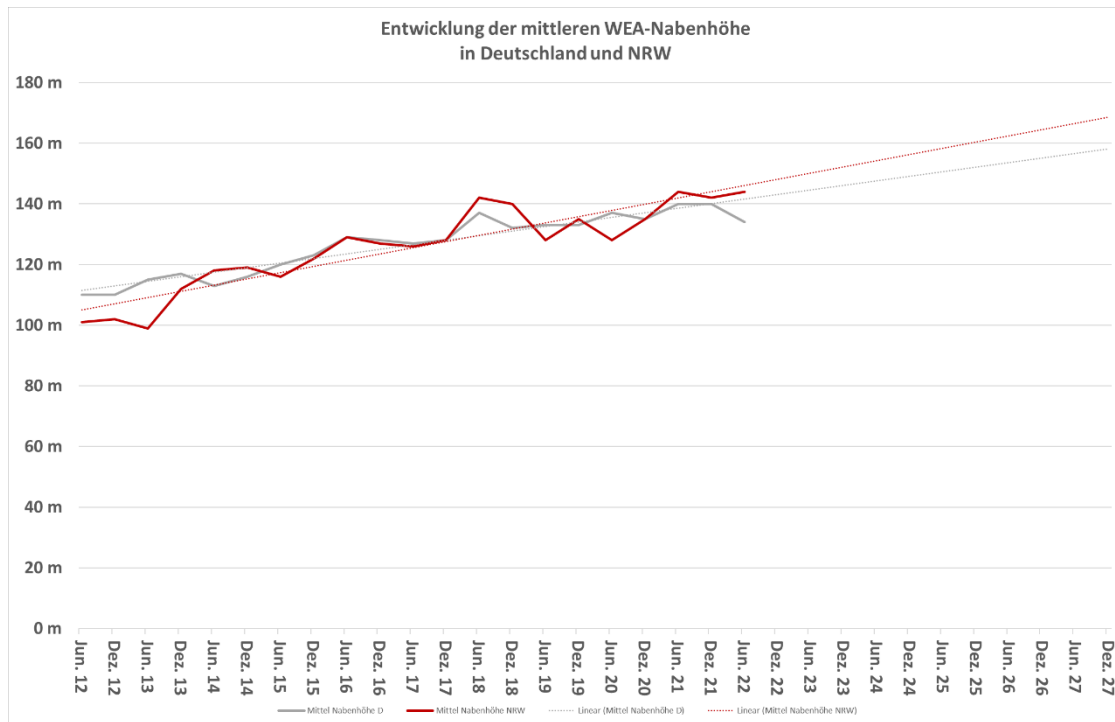


Abbildung 4: Bildung eines Trends zur installierten mittleren Nabenhöhe bundesweit und in NRW

Die Daten der installierten mittleren Nabenhöhe für den untersuchten Zeitraum der letzten zehn Jahre zeigen, dass sich bereits in der Vergangenheit vor ca. vier Jahren der Trend der höheren installierten mittleren Nabenhöhen in NRW zu der bundesweiten Datenlage umgekehrt hat. Somit werden in NRW mittlerweile grundsätzlich höhere mittlere Nabenhöhen installiert als bundesweit. Die Trendkurven zeigen bei einer Vorschau von fünf Jahren eine zukünftige installierte mittlere Nabenhöhe von 170 m im Mittel für NRW.

3.) Weiterführende Überlegungen

Im Folgenden sollen noch einmal die mit der Aufstellung einer Windenergieanlage verbundenen Randthemen gedanklich angerissen und hinsichtlich der Dimensionierung der Musteranlage bewertet werden.

3.1. Strompreisentwicklung

Die momentane Entwicklung der öffentlichen Strompreise bedingt mehr Ressourcen im Bereich der regenerativen Energien (politisches Ziel). Somit sind größere und somit leistungsstärkere WEA für eine zukünftige Versorgung von Vorteil.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.2. Herstellungskosten

Die Hersteller stehen seit längerem unter preislichem Druck die Stromgestehungskosten zu senken und attraktive Preise für die Planer und Betreiber zu bieten. Dies zeigt sich schon durch Insolvenz des Herstellers Senvion wie auch durch den Zusammenschluss von Firmen (Enercon & Lagerwey oder Siemens & Gamesa), um Synergien zu nutzen.

Die durch die aktuellen Kriegshandlungen in der Ukraine ausgelöste Energiekrise und andererseits damit ebenfalls bestehende Verknappung verteuert derzeit die Preise und lässt Neuentwicklungen möglicherweise langsamer ablaufen. Jedoch sind Neuanlagen mit größeren Dimensionen einerseits bezüglich des immer geringeren Flächenangebotes in Deutschland notwendig und andererseits werden derzeit politischen Ziele ausgesprochen, die eine größere Anlagengeneration notwendig macht.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.3. Netzeinspeisung

Größere installierte Leistungen und die damit verbundenen höheren erzielten Erträge müssen Netzeinspeisepunkte finden, die diese Strommengen aufnehmen können. Zudem geht der Ausbau der Stromnetze nur langsam voran. Dies wäre ein Punkt, der gegen zukünftige höhere Leistungen spricht.

Einschätzung: Trend zu aktuellen WEA.

3.4. Flächenverfügbarkeit

Die Planer berichten, dass die größeren Dimensionen von Windenergieanlagen dazu führen, dass diese meist nur in neu ausgewiesenen Flächen oder beim Repowering genutzt werden können. Der Zubau bei bestehenden Windparkflächen, also eine Platzierung zwischen Alt-WEA oder am Rand eines Windfeldes erlaubt meist nicht die größten Anlagen- generationen, sondern Zwischenstufen.

Des Weiteren werden die zur Verfügung stehenden Flächen aufgrund der größeren Dimensionierungen hinsichtlich Nabenhöhe und Rotordurchmesser immer ausgesuchter und möglicherweise kleiner, da die Abstände zur Wohnbebauung wachsen müssen (Stichwort erdrückende Wirkung oder teilweise Schallausbreitung). Somit sind WEA, die eine höhere Leistung auf wenig Raum vereinen, attraktiv.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.5. Anlagenvielfalt

Die Anlagenvielfalt hat die letzten Jahre abgenommen. Kleinere Leistungen unter 2 MW sind kaum noch bei den Herstellern anzutreffen, der Trend geht schon immer zu größeren WEA. So sind in den Portfolios der Hersteller Verschiebungen des WEA-Angebotes nach oben zu sehen. Die Entwicklungen waren und sind im Bereich der Windenergie hinsichtlich der Dimensionen der Windenergieanlagen stets aufgrund von neuen Materialien oder Technologien schnell umgesetzt worden. Ein Festhalten an älteren und damit ausgereiften WEA-Typen ist eher selten.

Des Weiteren zeigen die aktuellen Forschungsthemen noch weiteres Verbesserungspotential im Bereich der Windenergie, insbesondere der Materialien und der Optimierung [8].

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.6. Logistik und Transport

Die immer größeren Dimensionierungen und Gewichte von Windenergieanlagen stellen die Hersteller beim Transport und der Aufstellung vor immer größere Herausforderungen. Hier werden in Bezug auf die Rotorblätter mittlerweile durch die Hersteller geteilte Blätter oder Spezialfahrzeuge genutzt. Modulare Systeme der Hersteller lassen eine Vormontage beim Hersteller mit anschließendem Zusammenbau auf der Baustelle zu. In Bezug auf die Turmhöhen werden diese in Segmenten auf der Baustelle angeliefert, um dann vor Ort zusammengesetzt zu werden. Aktuell verwenden die Turmhersteller meist Hybridtürme, bei denen ein Stahlsegment auf einen vor Ort montierten Betonturm aufgesetzt wird. Dies spart Kosten und lässt höhere Nabenhöhen realisieren.

Einschätzung: Trend zu aktuellen WEA.

3.7. Aufbau von WEA

Da die größeren WEA eine höhere Last durch die größere Rotorfläche und dem damit verbundenen Winddruck erfahren, sind größere Fundamente und somit mehr Beton notwendig. Zudem kommen größere Kräne für größere Turmhöhen hinzu, was die Stellflächen vor Ort ebenfalls vergrößert. Da diese Stellflächen größtenteils rückgebaut werden können, ist dieser Aspekt zweitrangig. Bislang hat sich der Markt für die Peripherie von Windenergieanlagen parallel mitentwickelt, da die Hersteller z. B. die Kranhersteller mit in die Entwicklungsprozesse einbinden.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.8. Akzeptanz von WEA

Aus den Erfahrungen mit Anwohnern und Betroffenen bei Veranstaltungen, Gesprächen bei Ortsterminen, Windfesten oder Gerichtsterminen etc. wird schnell klar, dass Windenergie überwiegend gewollt ist, jedoch hinsichtlich der Sichtbarkeit und insbesondere der Größe auch Grenzen gesetzt werden sollen. Dagegen drehen größere WEA aufgrund der langen Flügel und der damit verbundenen gleichbleibenden Blattspitzengeschwindigkeiten deutlich langsamer als kleinere WEA.

Die Schallausbreitung und der Schattenwurf spielen dabei ebenfalls eine große Rolle. Hinsichtlich der Schallausbreitung sind ähnliche oder leicht höhere Schallleistungspegel als bei heutigen WEA zu erwarten. Zudem warten die Hersteller mittlerweile mit schallreduzierten Betriebsweisen auf, die im Nachtzeitraum niedrige Schallleistungspegel realisieren. Bezogen auf den Schattenwurf wirken sich höhere Nabenhöhe und größere Rotorfläche dagegen insofern negativ aus, als dass sich die Schattenwurfzeiten wie auch die -weite erhöhen. Hier helfen zeit- und helligkeitsgesteuerte Sensoren zur Abschaltung der Anlage und somit zur Vermeidung von unzulässigen Überschreitungen. Für den Betreiber bedeutet dies Abregelungen im Nachtzeitraum sowie tagsüber längere Abschaltzeiten. Die Ausfallzeiten wirken sich für den Betreiber auf die Energieproduktion aus, sind aber in der Regel wirtschaftlich auffangbar.

Einschätzung: Trend zu aktuellen WEA.

3.9. Flugverkehr

Weiterhin werden in Bezug auf Verkehrsflughäfen abstandsabhängige Kriterien für die Errichtung von Windenergieanlagen gelten. Auch führt die derzeit sich etablierende bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung (BKN) zu einer weiteren Entlastung der Anwohner. Mittlerweile dürfen WEA auch näher an Radaranlagen zur Flugsicherung gebaut werden [9].

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.10. Design von WEA

Das grundsätzliche Design von Windenergieanlagen wird heutzutage kaum noch verändert. Pitch-WEA mit aufgelöster Struktur oder direkt gekoppeltem Ringgenerator haben sich seit Mitte der Neunziger etabliert. Seitdem werden einzelne Baugruppen oder Komponenten stets verbessert. Auch zukünftig werden Windenergieanlagen das gleiche Design wie heute aufweisen:

- Pitch-WEA, möglicherweise adaptive Blattverstellung (Regelung Einzelblätter),
- Dreiblattrotor,
- Anbringung von Serrations an Rotorblätter (dann Standard),
- Drehzahlen sind abhängig vom Rotordurchmesser, respektive der Blattspitzengeschwindigkeit, somit werden diese noch langsamer drehen in Zukunft,
- der Gondelaufbau wird zukünftig noch modularer, um die WEA an gewünschte Spezifikationen anpassen zu können,
- das Gondeldesign wird aus Kostengründen zukünftig einfacher gestaltet und meist Quaderförmig aussehen,
- installierte elektrische Nennleistung, Rotordurchmesser und Nabenhöhen werden in Leistung und Größe ansteigen.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.11. Bodenverhältnisse

Die Bodenformation in der Gemeinde Willebadessen besteht hauptsächlich aus Karst. Zwar beeinflusst Karst die Bauweise des Fundamentes, stellt für die Errichtung einer WEA und insbesondere für hohe Nabenhöhen oder größere Rotordurchmesser kein Ausschlusskriterium dar.

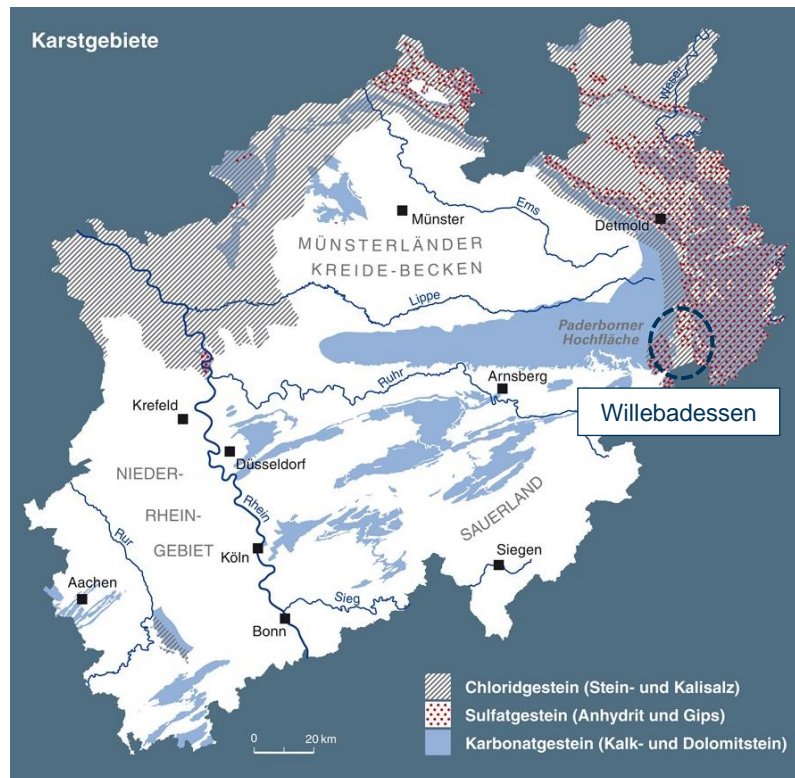


Abbildung 5: Karstgebiete in NRW gemäß [10]

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.12. Parallele Nutzung bereits bebauter WEA-Flächen mit weiteren regenerativen Energien

Aufgrund der Flächenknappheit überlegen Projektierer und Betreiber die gemeinsame Nutzung von Photovoltaik auf den bereits befestigten Kranstellflächen der WEA. Unserer Einschätzung nach stellt der Eiswurf in den Wintermonaten eine potentielle Gefahr für die Module der Photovoltaik dar. Die „niedrige“ installierte Leistung einer Photovoltaikanlage lässt sich leicht durch das Anheben der Dimensionen einer WEA, wie z. B. Erhöhung der elektrischen Leistung, größerer Rotordurchmesser und einen höhere Nabenhöhe ersetzen.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

3.13. WEA und Vögel

Aufgrund der größeren Rotordurchmesser verbunden mit höheren Nabenhöhen stellen Windenergieanlagen für Vögel ein größeres Hindernis dar. Allerdings wurde in den letzten Jahren intensiv an Vogelerfassungssystemen mit Deep Learning gearbeitet. So schalten die WEA automatisch in einen Trudelbetrieb, wenn über Kamerasysteme Vögel mit Anflug auf die WEA erkannt werden, womit das Kollisionsrisiko für die Vögel deutlich vermindert wird.

Einschätzung: Trend zu größeren WEA.

4.) Fazit Musteranlage

Die in Kapitel 2.3 errechneten Trends der elektrischen Leistung mit 5 MW, der Rotordurchmesser mit 160 m sowie der Nabenhöhen mit 170 m für die nächsten fünf Jahre zeigen Werte auf, die heute schon bei Neuinstallationen erreicht werden. Weiterhin zeigen unsere Erfahrungen bei Beobachtung des Marktes für Neuplanungen und den damit verbundenen Schallimmissionsprognosen deutlich größere Dimensionen als der ermittelte Durchschnitt.

Bezogen auf die Beurteilungen der Einzelthemen der weiterführenden Überlegungen in Kapitel 3.) ergibt sich überwiegend zusätzlich der Trend zu Windenergieanlagen mit größeren Dimensionen.

4.1. Dimensionen Musteranlage

In Bezug auf die installierte mittlere Anlagenleistung hat diese die letzten zwei Jahre zwar einen größeren Sprung vollzogen, liegt im Trend jedoch nur bei 5 MW installierter Leistung. Aus den heute schon installierten Leistungen von 6 MW bis 7 MW sowie den geführten Interviews mit den Herstellern gehen wir jedoch von einer installierten elektrischen Leistung von 8 MW in fünf bis acht Jahren aus.

Ähnlich verhält es sich bei der Datenlage der untersuchten installierten mittleren Rotordurchmesser. Vor zwei Jahren gab es bei den Herstellern einen größeren Sprung zu größeren Rotoren. Dieser Trend verharrt allerdings seit zwei Jahren bei dieser Größenordnung im mittleren Durchmesser von unter 140 m. Schaut man sich jedoch die aktuellen Entwicklungen der Hersteller von 170 m bis 175 m (vergleiche hierzu Tabelle 2) an, ist zu sehen, dass der prognostizierte Trend schon überholt ist. Nach unserer Auffassung sind damit in den nächsten fünf bis acht Jahren Rotordurchmesser von 200 m die Regel.

Für die mittleren installierten Nabenhöhen ist im Trend seit ca. vier Jahren eine Seitwärtsbewegung bei einer mittleren Nabenhöhe von 140 m mit nur minimalem Anstieg zu sehen. Unserer Auffassung nach etabliert sich mit der nächsten Anlagengeneration der höheren installierten Leistungen auch wieder die nächste Generation der Turmhöhen, im Moment gut zu sehen bei den aktuellen Neuvorstellungen der Hersteller (siehe Tabelle 2) mit mindestens 160 m und des Herstellers Nordex führend mit fast 180 m Nabenhöhe. Aus den

Gesprächen in der Windbranche mit Turmherstellern sind Nabenhöhen oberhalb 200 m realisierbar, stoßen dann aber an wirtschaftliche Grenzen. Wir prognostizieren in den nächsten fünf bis acht Jahren Nabenhöhen von maximal 220 m.

In den geführten Interviews wurde ebenfalls klar, dass die Windbranche einen weiteren technologischen Fortschritt anstrebt, die Hersteller momentan aber sich selber in die Gewinnzone bringen müssen. Daher sind nicht die technischen Grenzen in den nächsten fünf bis acht Jahren entscheidend, sondern dass die Technik ausreift und verlässliche Windenergieanlagen auf dem Markt verfügbar sind.

Auf der erhobenen Datenlage sowie unseren Überlegungen empfehlen wir für die Verwendung einer Musteranlage im Gemeindegebiet Willebadessen folgende Dimensionen anzusetzen:

| | |
|--------------------------|--------------|
| Nennleistung: | 8 MW |
| Rotordurchmesser: | 200 m |
| Nabenhöhe: | 220 m |

Aus den prognostizierten Daten ergibt sich damit für die Musteranlage eine maximale Gesamthöhe von 320 m.

4.2. Graphischer Vergleich Musteranlage

Für einen Vergleich der Dimensionen der aktuellen im Mittel errichteten Anlagengeneration und der prognostizierten Musteranlage werden die Daten aus dem ersten Halbjahr 2022 in NRW mit den erhobenen Daten der Musteranlage graphisch gegenübergestellt.

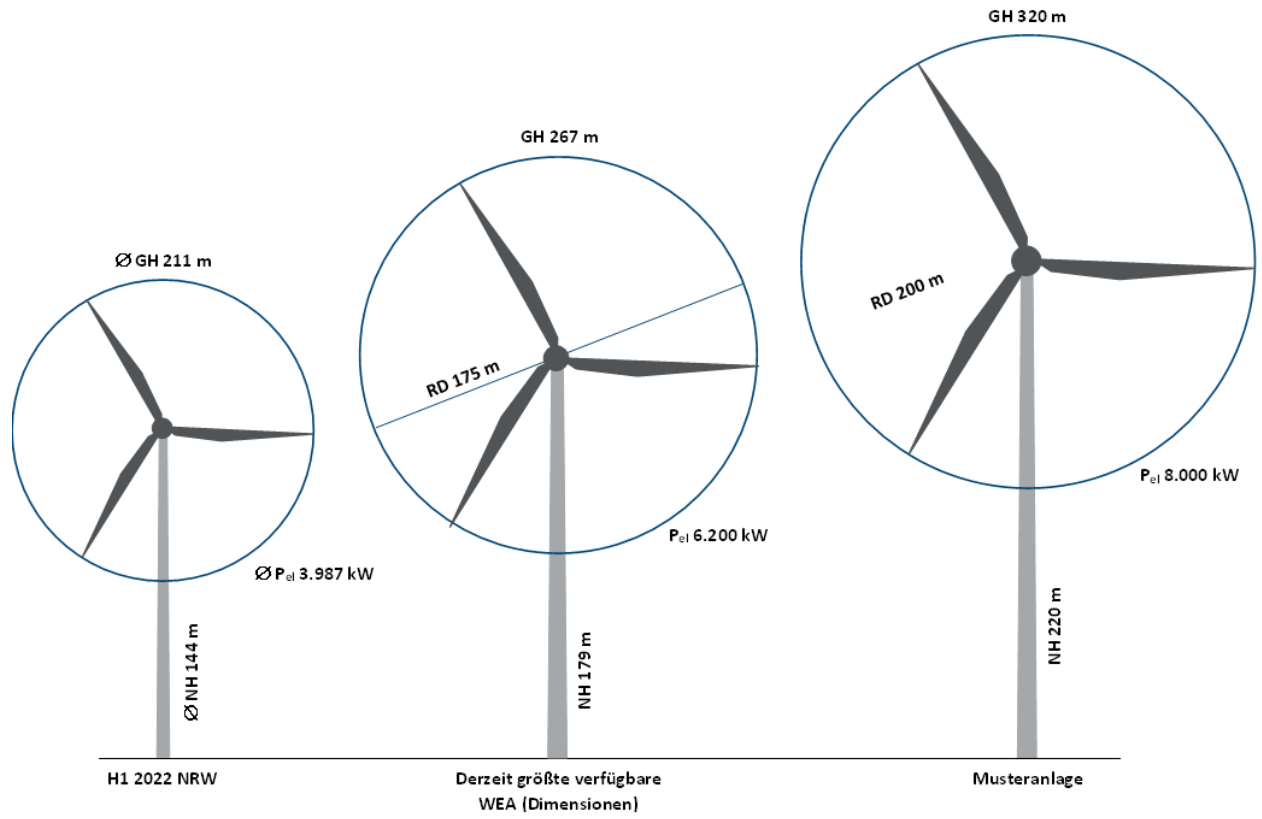


Abbildung 6: Maßstäblicher Größenvergleich mittlere Daten 1. Halbjahr 2022 NRW, derzeit größte verfügbare WEA (in Dimensionen, nicht Nennleistung) sowie Musteranlage

5.) Überlegungen zum Immissionsverhalten der Musteranlage

Im Folgenden werden noch Überlegungen zum Schallverhalten der Musteranlage ange stellt, da die akustischen Eigenschaften im Planungsprozess großen Anteil an Aufstel lungsvarianten und Wirtschaftlichkeit, resultierend aus den Betriebsweisen im Nachtzeit raum, besitzen.

5.1. Schalleistungspegel der Musteranlage

Der anfangs des Berichtes erwähnte Prototyp Vestas V236-15.0 MW [1] für die Offshore-Windenergie mit einem Rotordurchmesser von 236 m und einer Gesamthöhe von 280 m besitzt laut Vestas einen Schalleistungspegel von $L_{WA} = 118$ dB(A). Dieser Pegel ist aller dings für eine Anlage im Offshorebereich konzeptioniert, bei der es auf Ertrag ankommt. Für WEA der Windenergienutzung an Land wird heutzutage der Aspekt einer leisen An lage mit in den Vordergrund gestellt, da dies in der Planung mittlerweile ein gewichtiges Kaufargument ist.

Für die seitens der Hersteller aktuellen größten WEA sind folgende Angaben zum Schall leistungspegel, jeweils im offenen Betriebsmodus ohne Schall- oder Leistungsreduzie rung, verfügbar.

| Hersteller | WEA-Typ | Installierte Nennleistung | Rotordurchmesser | Schalleis tungspegel |
|---------------------------|------------|---------------------------|------------------|----------------------|
| ENERCON GmbH | E-175 EP5 | 6,0 MW | 175 m | 106,5 dB(A) |
| Vestas Deutschland GmbH | V172-7.2 | 7,2 MW | 172 m | 106,9 dB(A) |
| Nordex SE | N175/6.X | 6,2 MW | 175 m | 106,0 dB(A) |
| GE Renewable Germany GmbH | GE-164 | 6,0 MW | 164 m | 107,0 dB(A) |
| Siemens Wind Power GmbH | SG 7.0-170 | 7,0 MW | 170 m | k. A. |
| VENSYS Energy AG | VS170 | 5,8 MW | 170 m | 106,8 dB(A) |
| ENO Energy GmbH | eno160 | 6,0 MW | 160 m | 108,1 dB(A) |

Tabelle 4: Schalleistungspegel der aktuell größten verfügbaren Windenergieanla gen verschiedener Hersteller gemäß eigener Recherche [4] anhand des Hersteller-Rankings 2022 [5], Stand Oktober 2022

Hier ist erkennbar, dass die aktuelle 6 MW-Klasse ihre Schalleistungspegel im Bereich von $L_{WA} = 107$ dB(A) besitzt.

Für eine weitere Prognose wurden alle gängigen WEA-Daten von 500 kW bis zu den aktuellen WEA (inklusive der Anlagen aus Tabelle 4) zusammengetragen (siehe Anlage 2).

Bezüglich der Schalleistungspegel sind Clusterbildungen für verschiedene WEA-Größen möglich, die hier farblich markiert wurden. So zeigen sich für die Leistungsklassen 2 MW bis 4,5 MW wie auch von 4,5 MW bis 7,5 MW jeweils ähnliche Schalleistungspegel. Wir interpretieren die Daten so, dass sich für die Musteranlage aufgrund des nächsten größeren Schrittes bezüglich der neuen Dimension ein neues Cluster ergeben wird.

Aus der erhobenen Datenlage sowie unseren Überlegungen empfehlen wir für die Verwendung einer Musteranlage im Gemeindegebiet Willebadessen folgende akustische Grundlage:

Schalleistungspegel L_{WA} : 108,0 dB(A)

Somit ist die Musteranlage 1 dB lauter als die heute aktuellen Windenergieanlagen bei gleichzeitiger Verdopplung der im ersten Halbjahr 2022 mittleren installierten Anlagenleistung von ca. 4 MW [7].

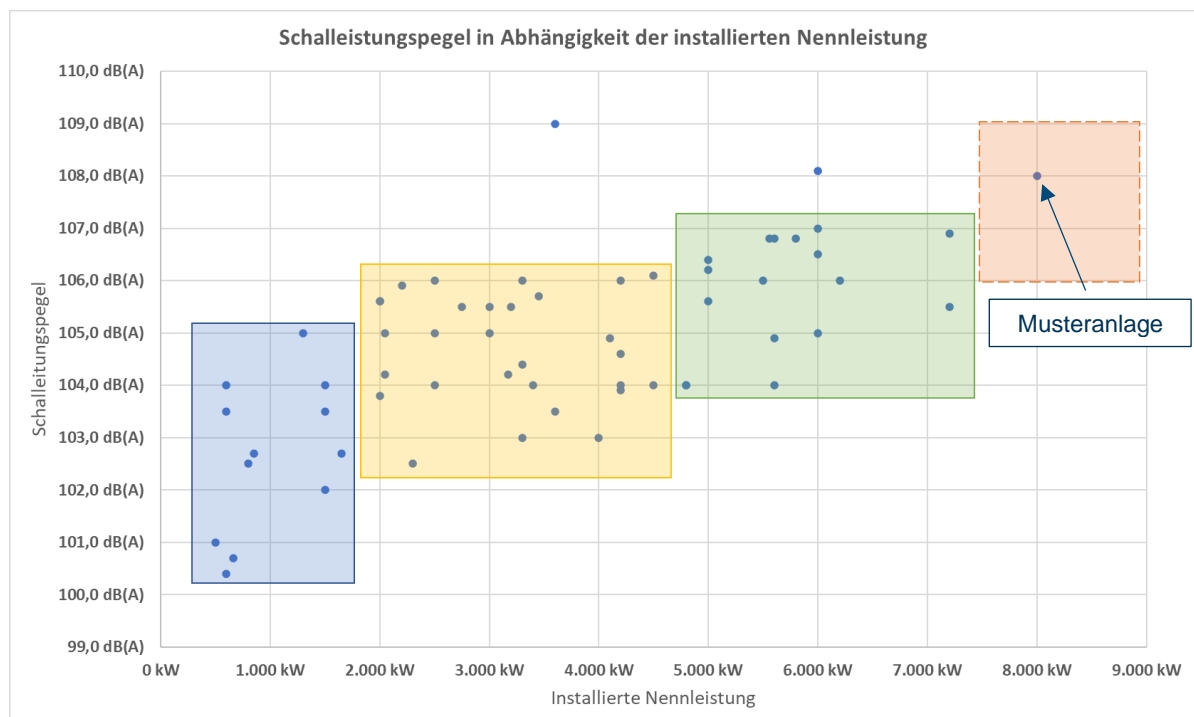


Abbildung 7: Schalleistungspegel über installierter elektrischer Leistung aller gängiger WEA-Typen und Clusterbildung

5.2. Frequenzspektrum der Musteranlage

Aufgrund der Bauweise und / oder des Designs von Windenergieanlagen unterscheiden sich die Anlagen nicht nur hinsichtlich des Schalleistungspegels, sondern auch hinsichtlich des Frequenzspektrums. Im Moment kann im Markt zwischen hoch-, mittel- oder tiefrequentem Oktavspektrum unterschieden werden. Dies bedeutet, dass in den entsprechenden Frequenzabschnitten die jeweilige Frequenzanteile ausgeprägter sind.

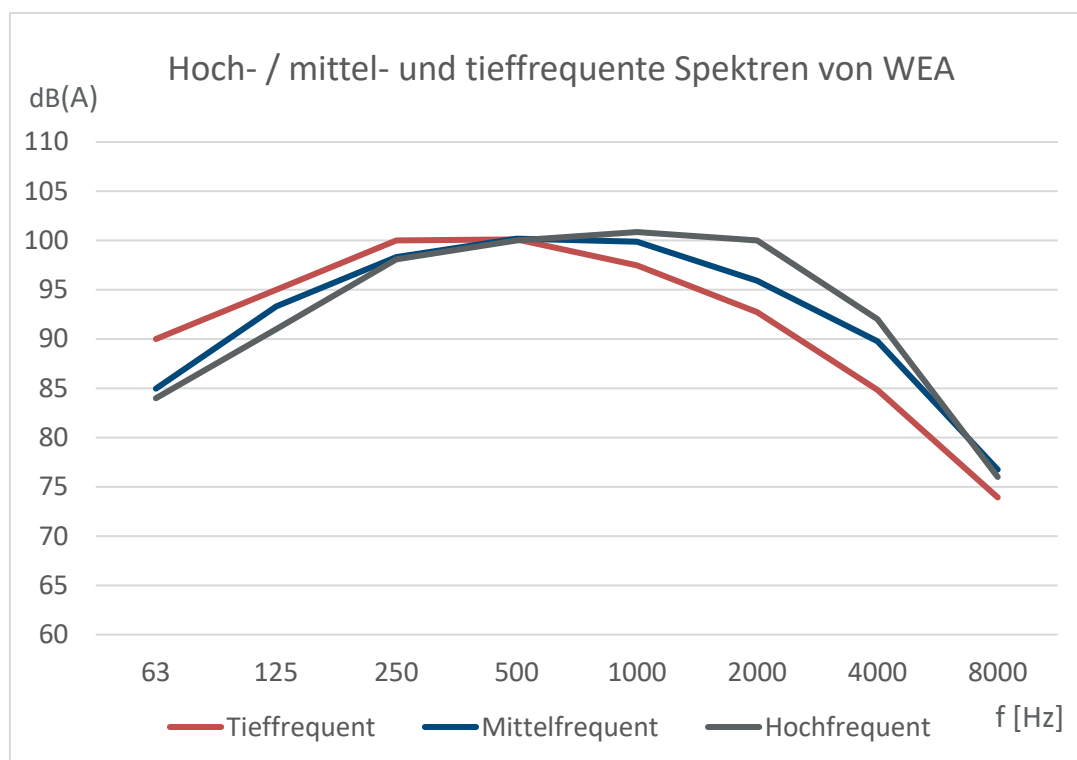


Abbildung 8: Beispiele von Frequenzgängen verschiedener WEA

Je nachdem, wie ein Oktavspektrum einer Windenergieanlage aufgebaut ist, wirkt sich diese bei der späteren Ausbreitungsberechnung unterschiedlich aus. Hohe Frequenzen werden stärker auf dem Schallausbreitungsweg durch die Luftabsorption gedämpft als tiefere Frequenzen. Demnach ist eine WEA mit einem hochfrequenten Oktavspektrum bei gleichem Schalleistungspegel an den Immissionsorten in weiterer Entfernung leiser als eine WEA mit tieffrequenterem Frequenzspektrum.

Daher ist es schwierig, ein allgemeingültiges „Muster-Frequenzspektrum“ für eine WEA abzubilden, welches später als Referenz zur Ausbreitungsberechnung verwendet werden soll. Daher werden die aus Tabelle 4 verwendeten Oktavspektren arithmetisch gemittelt, um einen repräsentativen Querschnitt abzudecken. Für folgende WEA lagen Oktavdaten vor:

| Hersteller | WEA-Typ | Installierte Nennleistung | Rotordurchmesser | Schalleistungspegel |
|---------------------------|------------|---------------------------|------------------|---------------------|
| ENERCON GmbH | E-175 EP5 | 6,0 MW | 175 m | 106,5 dB(A) |
| Vestas Deutschland GmbH | V162-7.2 | 7,2 MW | 162 m | 105,5 dB(A) |
| Nordex SE | N163/6.X | 6,2 MW | 163 m | 106,4 dB(A) |
| GE Renewable Germany GmbH | GE-5.x-158 | 5,3 MW | 158 m | 106,0 dB(A) |
| Siemens Wind Power GmbH | SG 6.0-155 | 6,0 MW | 155 m | 105,0 dB(A) |
| VENSYS Energy AG* | VS115-4.1* | 4,1 MW* | 115 m* | 104,9 dB(A)* |
| ENO Energy GmbH* | k. A. | k. A. | k. A. | k. A. |

(*) Anmerkung: Für die WEA der eno energy lagen keine Daten vor. Die WEA der VENSYS Energy AG vom Typ VS115-4.1 MW [16] ist zwar derzeit die größte Anlage des Herstellers, wird aber nicht in die Auswertung mit aufgenommen, da sowohl der Rotordurchmesser wie auch die Leistung in ihren Dimensionen zu weit von den Vorgaben entfernt sind.

Tabelle 5: Aktuell verfügbare Schalleistungspegel der größten verfügbaren Windenergieanlagen verschiedener Hersteller gemäß eigener Recherche [4] anhand des Hersteller-Rankings 2022 [5], Stand Oktober 2022

Für die meisten der ursprünglich ausgesuchten WEA aus (*) Anmerkung: Für die WEA der eno energy lagen keine Daten vor. Die WEA der VENSYS Energy AG vom Typ VS115-4.1 MW [16] ist zwar derzeit die größte Anlage des Herstellers, wird aber nicht in die Auswertung mit aufgenommen, da sowohl der Rotordurchmesser wie auch die Leistung in ihren Dimensionen zu weit von den Vorgaben entfernt sind.

Tabelle 5 liegen aufgrund des Prototypenstatus noch keine belastbaren Oktavbanddaten vor, auch da es sich teilweise erst noch um Ankündigungen handelt. Daher wurde bei der Auswahl auf die nächst kleinere WEA des Herstellers ausgewichen, deren Oktavbanddaten vorliegen.

Nach Mittelung von fünf WEA-Typen [11] [12] [13] [14] [15] von fünf unterschiedlichen WEA-Herstellern und anschließender Normierung auf den Wert des Gesamtschalleistungspegels mit $L_{WA} = 108,0 \text{ dB(A)}$ ergibt sich folgendes Oktavspektrum für die Musteranlage:

| | | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frequenz [Hz] | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 8.000 |
| Oktavpegel [dB(A)] | 80,1 | 90,0 | 96,3 | 100,4 | 102,1 | 102,6 | 100,2 | 92,8 | 77,2 |

Tabelle 6: Oktavspektrum Musteranlage, normiert auf $L_{WA,Okt} = 108,0$ dB(A)

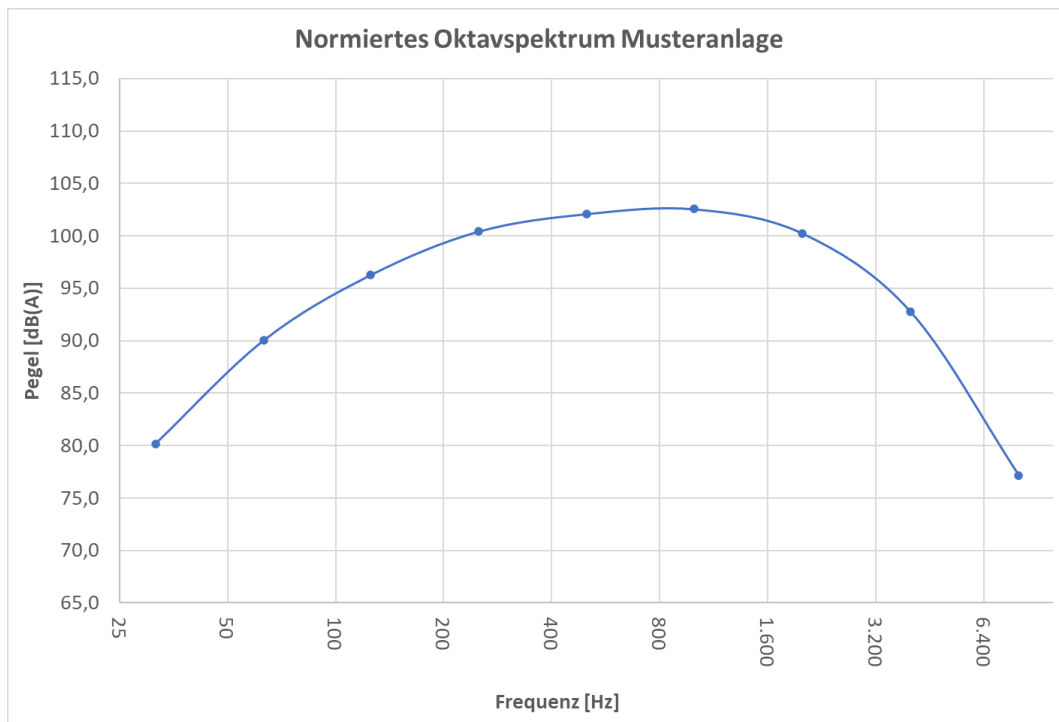


Abbildung 9: Oktavspektrum Musteranlage, normiert auf $L_{WA,Okt} = 108,0$ dB(A)

5.3. Schallausbreitung der Musteranlage

Mit dem in Kapitel 5.1 festgelegten maximalen Schalleistungspegel der Musteranlage von $L_{WA} = 108,0$ dB(A) wird die Schallausbreitung über die Entfernung nach dem Interimsverfahren [17] dargestellt. Hier sollen die Abstände der Musteranlage für die verschiedenen Gebietseinstufungen der TA Lärm [18] im Nachtzeitraum dargestellt werden.

Die Schalleistung der Musteranlage beträgt im offenen Betrieb $L_{WA} = 108,0$ dB(A). Planungen für Windenergieanlagen zeigen jedoch immer wieder, dass es Standorte gibt, die in Zusammenhang mit kleineren Abständen zu maßgeblichen Wohnbebauungen leisere Betriebsmoden benötigen. Hierfür wird ebenfalls eine Abschätzung getätigt und die leisesten Betriebsmoden mit zugehörigem Schalleistungspegel und reduzierten Nennleistungen

der aktuell größten verfügbaren Windenergieanlagen verschiedener Hersteller (analog Tabelle 5) recherchiert.

| Hersteller | WEA-Typ | Reduzierte Nennleistung | Reduzierter Betriebsmode | Schalleistungspegel |
|---------------------------|------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| ENERCON GmbH | E-175 EP5 | 2.000 kW | NR8 | 99,0 dB(A) |
| Vestas Deutschland GmbH | V172-7.2 | 5.220 kW | SO 06 | 98,0 dB(A) |
| Nordex SE | N175/6.X | 2.580 kW | Mode 18 | 97,0 dB(A) |
| GE Renewable Germany GmbH | GE-164 | 4.090 kW | NRO 100 | 100,0 dB(A) |
| Siemens Wind Power GmbH | SG 7.0-170 | k. A. | k. A. | 97,0 dB(A) |
| VENSYS Energy AG | VS170 | k. A. | Mode 8 | 97,0 dB(A) |
| ENO Energy GmbH | eno160 | k. A. | k. A. | k. A. |

Tabelle 7: Schalleistungspegel zu den leisesten Betriebsmoden der aktuell größten verfügbaren Windenergieanlagen verschiedener Hersteller gemäß eigener Recherche [4] anhand des Hersteller-Rankings 2022 [5], Stand Oktober 2022

Es ist erkennbar, dass die aktuelle 6 MW- bzw. 7 MW-Klasse eine Reduzierung des Schalleistungspegel bis hinunter zu $L_{WA} = 97 \text{ dB(A)}$ realisieren kann, was allerdings je nach Bauart oder Hersteller zu erheblichen Leistungsreduzierungen und somit Ertragseinbußen führt.

Dies bestätigt den aktuellen Trend aus 2022, bei der z. B. der Hersteller Nordex momentan für sein Flaggschiff N149/5.X STE den schallreduzierten Mode 18 mit $L_{WA} = 95,5 \text{ dB(A)}$ anbietet. Andere Hersteller wie Enercon mit $L_{WA} = 94,5 \text{ dB(A)}$ im Betriebsmodus NR IXs für die E-160 EP5 5.560 kW TES oder Vestas mit der V150-4.0/4.2MW STE im Betriebsmodus SO 13 mit $L_{WA} = 97,0 \text{ dB(A)}$ bestätigen diese Entwicklung.

Aus der erhobenen Datenlage sowie unseren Überlegungen empfehlen wir für die Verwendung einer Musteranlage folgende akustische Untergrenze:

Reduzierter Schalleistungspegel $L_{WA,red}$: 98,0 dB(A)

Auf Grundlage der erhobenen Schalleistungspegel sowohl für den lautesten als auch für den leisesten Betrieb wurde mittels den Interimsverfahrens die jeweiligen Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Entfernung mit einem ebenen Modell (ohne Geländestruktur) exemplarisch berechnet. Auf den Schalleistungspegel wird jeweils der Sicherheitszuschlag von $SZ = 2,1 \text{ dB}$ aufaddiert, welcher sich aus der Unsicherheit der Produktstreuung

$\sigma_P = 1,2$ dB für eine Einfachmessung, der Unsicherheit der Messung mit $\sigma_R = 0,5$ dB und der Prognoseunsicherheit $\sigma_{Prog} = 1,0$ dB zusammensetzt.

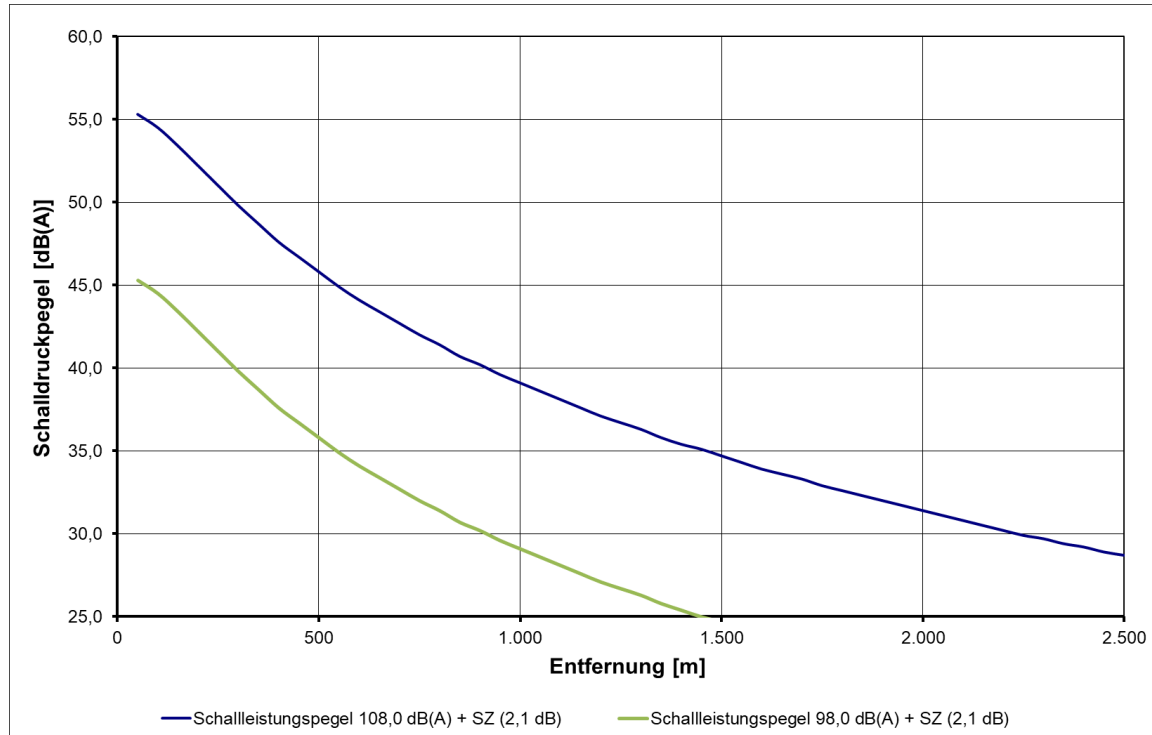


Abbildung 10: Schalldruckpegel über die Entfernung für die Musteranlage, sowohl für den lautesten Betrieb mit $L_{WA} = 108,0$ dB(A), als auch für den leistungsten Modus mit $L_{WA,red} = 98,0$ dB(A) zzgl. jeweils einem oberen Vertrauensbereich von $SZ = 2,1$ dB

Entsprechend den Gebietseinstufungen gemäß TA Lärm [18] unter 6.1 Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden ergeben sich gemäß Abbildung 10 für den relevanten Nachtzeitraum folgende Abstände als Richtwerte.

| Gebietseinstufung | Immissionsrichtwert nachts | Entfernung | |
|--|----------------------------|--|---|
| | | offener Betrieb mit $L_{WA} = 108,0$ dB(A) | schallreduzierter Betrieb mit $L_{WA} = 98,0$ dB(A) |
| Industriegebiete | 70 dB(A) | -- 1) | -- 2) |
| Gewerbegebiete | 50 dB(A) | > 300 m | -- 2) |
| Kerngebieten, Dorfgebiete und Mischgebiete | 45 dB(A) | > 550 m | > 100 m |
| Allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete | 40 dB(A) | > 950 m | > 300 m |
| Reine Wohngebiete | 35 dB(A) | > 1.500 m | > 550 m |
| Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten | 35 dB(A) | > 1.500 m | > 550 m |

1) keine Angabe, da aufgrund der Nabenhöhe von 220 m am Fußpunkt der WEA ein maximaler Schalldruckpegel von $L_p = 56$ dB(A) ankommt

2) keine Angabe, da aufgrund der Nabenhöhe von 220 m am Fußpunkt der WEA ein maximaler Schalldruckpegel von $L_p = 46$ dB(A) ankommt

Tabelle 8: Abstände der Musteranlage zu den Gebietseinstufungen nach TA Lärm [18] im Nachtzeitraum in Abhängigkeit des Betriebsmodus (Angaben auf 50 m gerundet)

Anmerkung:

Es ist anzumerken, dass es sich bei der Tabelle 10 um die reinen Abstände resultierend aus der Ausbreitungsberechnung und den jeweiligen Gebietseinstufungen handelt. Weitere zusätzliche Kriterien können zu größeren Abständen führen.

6.) Bearbeitungsgrundlagen

Für die Ermittlung der Geräuschemissionen werden folgende Normen, Vorschriften und Unterlagen herangezogen:

- [1] Vestas errichtet die mit 15 MW leistungsstärkste Windkraftanlage der Welt in Dänemark, Pressemitteilung IWR, abgerufen am 15.10.2021,
- [2] Vestas präsentiert die neue 15 MW Gondel, Pressemitteilung Windindustrie in Deutschland, abgerufen am 05.10.2022
- [3] Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Jahr 2021, Deutsche WindGuard GmbH, erschienen 2022
- [4] Eigene Recherche mit Abruf der Webseiten der Herstellerfirmen Enercon (<https://www.enercon.de/produkte/>), Vestas (<https://www.vestas.de/de-de/anlagentechnologie/unsere-anlagen>), Nordex (<https://www.nordex-online.com/de/product/produkte/>), Siemens-Gamesa (<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore>), Vensys (<https://www.vensys.de/windkraftanlagen/>), eno energy GmbH (<https://www.eno-energy.com/windenergieanlagen/>), Max Bögel (<https://max-boegl.de/leistungsbereiche/erneuerbare-energien>), Dipl.-Ing. Oliver Bunk, KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, abgerufen am 14.10.2022
- [5] Windenergie-Hersteller Ranking, Pressemitteilung auf Windbranche.de (<https://www.windbranche.de/wirtschaft/unternehmen/hersteller-ranking>), abgerufen am 14.10.2022
- [6] Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland für das 1. Halbjahr 2021, Deutsche WindGuard GmbH, erschienen 2021
- [7] Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland für das 1. Halbjahr 2022, Deutsche WindGuard GmbH, erschienen 2022
- [8] DLR testet Hightech-Rotorblätter für Forschungswindpark erfolgreich, Pressemitteilung Windbranche.de, abgerufen am 14.10.2022
- [9] Windräder dürfen näher an Radaranlagen gebaut werden, Zeit online, 01. August 2022, abgerufen am 14.10.2022

- [10] Vorkommen von Karstgebieten, Fachinformationssystem Geologie von Nordrhein-Westfalen des Geologischen Dienstes NRW, GD NRW, <https://www.gd.nrw.de>, abgerufen am 17.10.2022
- [11] Technisches Datenblatt Oktavbandpegel Betriebsmodus 0 s ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 / 6000 kW, D02772025/0.4-de, Enercon GmbH, 14.10.2022
- [12] Eingangsgrößen für Schallimmissionsprognosen Vestas V162-6.8/7.2 MW, 0117-3576.V03, Vestas Deutschland GmbH, 19.07.2022
- [13] Octave sound power levels / Oktav-Schallleistungspegel Nordex N163/6.X, F008_277_A19_IN, Revision 02, Nordex Energy SE & Co. KG, 08.11.2021
- [14] Technische Dokumentation Windenergieanlagen 4.x/5.x-158 - 50 Hz, Schallleistung - Normalbetrieb und Schallreduzierter Betrieb gemäß FGW, Rev. 02 – DE, GE Renewable Energy, 14.09.2020
- [15] Schallemissionen SG 6.0-155, LK Rev. 0, AM 0 – N8, SGRE ON SG 6.0-155 Schallemissionen, LK Rev. 0, AM 0 - N8, D2340474/004, Siemens Gamesa Renewable Energy, 21.04.2021
- [16] Prognostizierte Schallleistungspegel VENSYS 115 - 4,1 MW Rev. C, Schalldatenblatt VENSYS AG, 31.10.2019
- [17] Dokumentation zur Schallausbreitung – Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Ergänzung zu DIN ISO 9613-2 und DIN EN 61400-11, Fassung 2015-05.1
- [18] TA Lärm, Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm), Ausgabe August 1998, letzte Änderung durch die Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5)

7.) Abkürzungen und Formelzeichen

| | | |
|---------------|---|---|
| Ø | = | Mittlere |
| GH | = | Gesamthöhe [m] |
| L_{WA} | = | Schalleistungspegel [dB(A)] |
| $L_{WA, Okt}$ | = | Oktav-Schalleistungspegel pro Oktavfrequenz [dB(A)] |
| NH | = | Nabenhöhe [m] |
| RD | = | Rotordurchmesser [m] |
| WEA | = | Windenergieanlage |
| WP | = | Windpark |

8.) Anlagen

Anlage A: Datengrundlage der Berechnung der Windenergieentwicklung in Deutschland von 2012 bis 2022

Anlage B: Auswertung der Entwicklung der Schalleistungspegel über die installierte Nennleistung

Anlage C: Ermittlung eines mittleren Oktavspektrums aus den aktuellen WEA auf dem Markt

Anlage D: Auswertung des Schalldruckpegels über die Entfernung für die Musteranlage

Anlage A: Datengrundlage der Berechnung der Windenergieentwicklung in
Deutschland von 2012 bis 2022

| Entwicklung der Anlagenkonfigurationen in Deutschland und NRW | | | | | | | | | | | |
|---|------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|--|-----------------------|--|
| Zeitraum | Stichtag | Deutschland | | | | NRW | | | | Mittel Gesamthöhe NRW | Mittel spezifische Flächenleistung NRW |
| | | Mittel Anlagenleistung D | Mittel Rotordurchmesser D | Mittel Nabenhöhe D | Mittel spezifische Flächenleistung D | Mittel Anlagenleistung NRW | Mittel Rotordurchmesser NRW | Mittel Nabenhöhe NRW | Mittel spezifische Flächenleistung NRW | | |
| H1 2012 | 30.06.2012 | 2.425 kW | 88 m | 110 m | 399 W/m ² | 154 m | 1.983 kW | 79 m | 101 m | 405 W/m ² | 141 m |
| H2 2012 | 31.12.2012 | 2.420 kW | 88 m | 110 m | 398 W/m ² | 154 m | 2.053 kW | 80 m | 102 m | 408 W/m ² | 142 m |
| H1 2013 | 30.06.2013 | 2.557 kW | 93 m | 115 m | 376 W/m ² | 162 m | 1.870 kW | 79 m | 99 m | 382 W/m ² | 139 m |
| H2 2013 | 31.12.2013 | 2.598 kW | 95 m | 117 m | 367 W/m ² | 165 m | 2.202 kW | 85 m | 112 m | 388 W/m ² | 155 m |
| H1 2014 | 30.06.2014 | 2.650 kW | 97 m | 113 m | 359 W/m ² | 162 m | 2.427 kW | 89 m | 118 m | 390 W/m ² | 163 m |
| H2 2014 | 31.12.2014 | 2.690 kW | 99 m | 116 m | 361 W/m ² | 166 m | 2.477 kW | 94 m | 119 m | 357 W/m ² | 166 m |
| H1 2015 | 30.06.2015 | 2.676 kW | 104 m | 120 m | 323 W/m ² | 172 m | 2.395 kW | 95 m | 116 m | 348 W/m ² | 164 m |
| H2 2015 | 31.12.2015 | 2.727 kW | 105 m | 123 m | 326 W/m ² | 176 m | 2.525 kW | 97 m | 122 m | 345 W/m ² | 171 m |
| H1 2016 | 30.06.2016 | 2.828 kW | 109 m | 129 m | 313 W/m ² | 184 m | 2.705 kW | 103 m | 129 m | 335 W/m ² | 181 m |
| H2 2016 | 31.12.2016 | 2.848 kW | 109 m | 128 m | 314 W/m ² | 183 m | 2.675 kW | 104 m | 127 m | 328 W/m ² | 179 m |
| H1 2017 | 30.06.2017 | 2.887 kW | 111 m | 127 m | 310 W/m ² | 183 m | 2.750 kW | 111 m | 126 m | 292 W/m ² | 182 m |
| H2 2017 | 31.12.2017 | 2.976 kW | 113 m | 128 m | 309 W/m ² | 185 m | 2.833 kW | 122 m | 128 m | 299 W/m ² | 189 m |
| H1 2018 | 30.06.2018 | 3.272 kW | 119 m | 137 m | 299 W/m ² | 197 m | 3.116 kW | 117 m | 142 m | 293 W/m ² | 201 m |
| H2 2018 | 31.12.2018 | 3.233 kW | 118 m | 132 m | 303 W/m ² | 191 m | 3.120 kW | 116 m | 140 m | 302 W/m ² | 198 m |
| H1 2019 | 30.06.2019 | 3.337 kW | 122 m | 133 m | 292 W/m ² | 194 m | 3.018 kW | 110 m | 128 m | 324 W/m ² | 183 m |
| H2 2019 | 31.12.2019 | 3.317 kW | 119 m | 133 m | 302 W/m ² | 193 m | 3.359 kW | 120 m | 135 m | 302 W/m ² | 195 m |
| H1 2020 | 30.06.2020 | 3.319 kW | 121 m | 137 m | 294 W/m ² | 197 m | 2.949 kW | 110 m | 128 m | 307 W/m ² | 183 m |
| H2 2020 | 31.12.2020 | 3.407 kW | 122 m | 135 m | 298 W/m ² | 196 m | 3.406 kW | 120 m | 135 m | 301 W/m ² | 196 m |
| H1 2021 | 30.06.2021 | 4.046 kW | 135 m | 140 m | 285 W/m ² | 207 m | 3.848 kW | 132 m | 144 m | 290 W/m ² | 210 m |
| H2 2021 | 31.12.2021 | 3.978 kW | 133 m | 140 m | 286 W/m ² | 207 m | 3.991 kW | 134 m | 142 m | 290 W/m ² | 209 m |
| H1 2022 | 30.06.2022 | 4.103 kW | 133 m | 134 m | 295 W/m ² | 201 m | 3.987 kW | 133 m | 144 m | 290 W/m ² | 211 m |

Tabelle 9: Aufbereitete Daten zur Abschätzung eines Trends aus dem öffentlichen Datenpool der WindGuard zum Status der Windenergie 2012 bis 2022

Anlage B: Auswertung der Entwicklung der Schalleistungspegel über die installierte Nennleistung

| Darstellung im offenen Betrieb, Angaben Werte Hersteller, Serrations wurden berücksichtigt wenn auswählbar | | | | | |
|--|-----------------|---------------------|------------------|-----------------------------|--|
| WEA | Leistung | Schalleistungspegel | Rotordurchmesser | Spezifische Flächenleistung | |
| E-40/5.40 | 500 kW | 101,0 dB(A) | 40 m | 398 W/m ² | |
| TW-600 | 600 kW | 103,5 dB(A) | 43 m | 413 W/m ² | |
| N-43 | 600 kW | 104,0 dB(A) | 43 m | 413 W/m ² | |
| V44 | 600 kW | 100,4 dB(A) | 44 m | 395 W/m ² | |
| V47 | 660 kW | 100,7 dB(A) | 47 m | 380 W/m ² | |
| E-53 | 800 kW | 102,5 dB(A) | 53 m | 363 W/m ² | |
| V52 | 850 kW | 102,7 dB(A) | 52 m | 400 W/m ² | |
| N-60 | 1.300 kW | 105,0 dB(A) | 60 m | 460 W/m ² | |
| MD-70 | 1.500 kW | 102,0 dB(A) | 70 m | 390 W/m ² | |
| GE-1.5sl | 1.500 kW | 104,0 dB(A) | 77 m | 322 W/m ² | |
| VENSYS-77 | 1.500 kW | 103,5 dB(A) | 77 m | 322 W/m ² | |
| V66 | 1.650 kW | 102,7 dB(A) | 66 m | 482 W/m ² | |
| V80 | 2.000 kW | 105,6 dB(A) | 80 m | 398 W/m ² | |
| V90 | 2.000 kW | 105,6 dB(A) | 90 m | 314 W/m ² | |
| MM-100 | 2.000 kW | 103,8 dB(A) | 100 m | 255 W/m ² | |
| MM-82 | 2.050 kW | 105,0 dB(A) | 82 m | 388 W/m ² | |
| MM-92 | 2.050 kW | 104,2 dB(A) | 92 m | 308 W/m ² | |
| eno100-2.2 | 2.200 kW | 105,9 dB(A) | 100 m | 280 W/m ² | |
| E-82 E2 | 2.300 kW | 102,5 dB(A) | 82 m | 436 W/m ² | |
| N-80 | 2.500 kW | 104,0 dB(A) | 80 m | 497 W/m ² | |
| N-90 | 2.500 kW | 105,0 dB(A) | 90 m | 393 W/m ² | |
| N-100 | 2.500 kW | 106,0 dB(A) | 100 m | 318 W/m ² | |
| GE-2.75-120 | 2.750 kW | 105,5 dB(A) | 120 m | 243 W/m ² | |
| E-101 | 3.000 kW | 105,5 dB(A) | 101 m | 374 W/m ² | |
| VENSYS-120 | 3.000 kW | 105,0 dB(A) | 120 m | 265 W/m ² | |
| 3.2M114 | 3.170 kW | 104,2 dB(A) | 114 m | 311 W/m ² | |
| 3.2M122 | 3.200 kW | 105,5 dB(A) | 122 m | 274 W/m ² | |
| V112-3.3MW STE | 3.300 kW | 104,4 dB(A) | 112 m | 335 W/m ² | |
| V126-3.3MW STE | 3.300 kW | 106,0 dB(A) | 126 m | 265 W/m ² | |
| N-131/3300 STE | 3.300 kW | 103,0 dB(A) | 131 m | 245 W/m ² | |
| 3.4M140 | 3.400 kW | 104,0 dB(A) | 140 m | 221 W/m ² | |
| V117-3.45MW STE | 3.450 kW | 105,7 dB(A) | 117 m | 321 W/m ² | |
| N-117/3600 STE | 3.600 kW | 103,5 dB(A) | 117 m | 335 W/m ² | |
| GE-3.6-137 | 3.600 kW | 109,0 dB(A) | 137 m | 244 W/m ² | |
| eno114-4.0 | 4.000 kW | 103,0 dB(A) | 115 m | 385 W/m ² | |
| VENSYS-115 | 4.100 kW | 104,9 dB(A) | 115 m | 395 W/m ² | |
| V136-4.2MW STE | 4.200 kW | 103,9 dB(A) | 136 m | 289 W/m ² | |
| E-138 | 4.200 kW | 106,0 dB(A) | 138 m | 281 W/m ² | |
| eno140-4.2 | 4.200 kW | 104,0 dB(A) | 141 m | 269 W/m ² | |
| V150-4.2MW STE | 4.200 kW | 104,6 dB(A) | 150 m | 238 W/m ² | |
| N-149/4500 STE | 4.500 kW | 106,1 dB(A) | 149 m | 258 W/m ² | |
| GE-4.5-158 | 4.500 kW | 104,0 dB(A) | 158 m | 230 W/m ² | |
| eno126-4.8 | 4.800 kW | 104,0 dB(A) | 126 m | 385 W/m ² | |
| GE-4.8-158 | 4.800 kW | 104,0 dB(A) | 158 m | 245 W/m ² | |
| SG5.0-132 | 5.000 kW | 106,2 dB(A) | 132 m | 365 W/m ² | |
| E-147 EP5 E2 | 5.000 kW | 106,4 dB(A) | 147 m | 295 W/m ² | |
| N-149/5000 STE | 5.000 kW | 105,6 dB(A) | 149 m | 287 W/m ² | |
| GE-5.5-158 | 5.500 kW | 106,0 dB(A) | 158 m | 281 W/m ² | |
| E-160 EP 5 E3 | 5.560 kW | 106,8 dB(A) | 160 m | 277 W/m ² | |
| V150-5.6MW STE | 5.600 kW | 104,9 dB(A) | 150 m | 317 W/m ² | |
| eno152-5.6 | 5.600 kW | 106,8 dB(A) | 152 m | 309 W/m ² | |
| V162-5.6MW STE | 5.600 kW | 104,0 dB(A) | 162 m | 272 W/m ² | |
| VENSYS-170 | 5.800 kW | 106,8 dB(A) | 170 m | 256 W/m ² | |
| SG6.0-155 | 6.000 kW | 105,0 dB(A) | 155 m | 318 W/m ² | |
| eno160 | 6.000 kW | 108,1 dB(A) | 160 m | 298 W/m ² | |
| GE-164 | 6.000 kW | 107,0 dB(A) | 164 m | 284 W/m ² | |
| E-175 EP5 | 6.000 kW | 106,5 dB(A) | 175 m | 249 W/m ² | |
| N-175/6.XMW | 6.200 kW | 106,0 dB(A) | 175 m | 258 W/m ² | |
| V162-7.2MW STE | 7.200 kW | 105,5 dB(A) | 162 m | 349 W/m ² | |
| V172-7.2MW | 7.200 kW | 106,9 dB(A) | 172 m | 310 W/m ² | |
| Musteranlage | 8.000 kW | 108,0 dB(A) | 200 m | 255 W/m² | |

Tabelle 10: Datengrundlage für Auswertung der Entwicklung des Schalleistungspegels (Herstellerangaben) über der installierten elektrischen Leistung

Anlage C: Ermittlung eines mittleren Oktavspektrums aus den aktuellen WEA auf dem Markt

Anlage D: Auswertung des Schalldruckpegels über die Entfernung für die Musteranlage

| Entfernung dp [m] | Schalleistungspegel 108,0 dB(A) + SZ (2,1 dB) | Schalleistungspegel 98,0 dB(A) + SZ (2,1 dB) |
|----------------------|--|---|
| | [dB(A)] | [dB(A)] |
| 50 | 55,3 | 45,3 |
| 100 | 54,5 | 44,5 |
| 150 | 53,4 | 43,4 |
| 200 | 52,2 | 42,2 |
| 250 | 51,0 | 41,0 |
| 300 | 49,8 | 39,8 |
| 350 | 48,7 | 38,7 |
| 400 | 47,6 | 37,6 |
| 450 | 46,7 | 36,7 |
| 500 | 45,8 | 35,8 |
| 550 | 44,9 | 34,9 |
| 600 | 44,1 | 34,1 |
| 650 | 43,4 | 33,4 |
| 700 | 42,7 | 32,7 |
| 750 | 42,0 | 32,0 |
| 800 | 41,4 | 31,4 |
| 850 | 40,7 | 30,7 |
| 900 | 40,2 | 30,2 |
| 950 | 39,6 | 29,6 |
| 1.000 | 39,1 | 29,1 |
| 1.050 | 38,6 | 28,6 |
| 1.100 | 38,1 | 28,1 |
| 1.150 | 37,6 | 27,6 |
| 1.200 | 37,1 | 27,1 |
| 1.250 | 36,7 | 26,7 |
| 1.300 | 36,3 | 26,3 |
| 1.350 | 35,8 | 25,8 |
| 1.400 | 35,4 | 25,4 |
| 1.450 | 35,1 | 25,0 |
| 1.500 | 34,7 | 24,7 |
| 1.550 | 34,3 | 24,3 |
| 1.600 | 33,9 | 23,9 |
| 1.650 | 33,6 | 23,6 |
| 1.700 | 33,3 | 23,2 |
| 1.750 | 32,9 | 22,9 |
| 1.800 | 32,6 | 22,6 |
| 1.850 | 32,3 | 22,3 |
| 1.900 | 32,0 | 22,0 |
| 1.950 | 31,7 | 21,6 |
| 2.000 | 31,4 | 21,3 |
| 2.050 | 31,1 | 21,1 |
| 2.100 | 30,8 | 20,8 |
| 2.150 | 30,5 | 20,5 |
| 2.200 | 30,2 | 20,2 |
| 2.250 | 29,9 | 19,9 |
| 2.300 | 29,7 | 19,7 |
| 2.350 | 29,4 | 19,4 |
| 2.400 | 29,2 | 19,2 |
| 2.450 | 28,9 | 18,9 |
| 2.500 | 28,7 | 18,7 |

Tabelle 12: Datengrundlage für die Schalldruckpegel über die Entfernung der Musteranlage, sowohl für den lautesten Betrieb mit $L_{WA} = 108,0$ dB(A), als auch für den leistungsmäßigsten Modus mit $L_{WA,red} = 98,0$ dB(A) zzgl. jeweils einem oberen Vertrauensbereich von $SZ = 2,1$ dB