



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Anwendungspotentiale von mittelgroßen Windkraftanlagen in Europa

verfasst von

Steven PLATTNER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Mai 2022

Betreut von:

Univ. Prof. Dipl.-Phys. Dr.phil.nat. Liebert Wolfgang
Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Wien, Mai 2022

Steven PLATTNER (eigenhändig)

Diese Masterarbeit ist meinen liebenden Eltern gewidmet.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Masterarbeit unterstützt haben, sei es in fachlicher Hinsicht oder durch persönliche Hilfeleistung. Liebe Monika, lieber Luca, liebe Caro, Danke für Eure Zeit.

Vielen Dank auch an Herrn Mag. Dr. Markus Drapalik für die Bereitschaft und Unterstützung bei der Betreuung meiner Masterarbeit.

Mein allergrößter Dank gebührt jedoch meiner Mutter und meinem Vater, die mir immer zur Seite gestanden haben und mir Zuversicht in schwierigen Momenten gaben. Ohne Euch wäre mein Erfolg nicht möglich gewesen!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Das Konzept der Windkraft als nachhaltige Energiequelle	2
1.1.1	Geschichtliche Entwicklung der Windkraftanlagen	2
1.1.2	Physikalisches Grundprinzip der Energiegewinnung	3
1.1.3	Zuwachs an Windkraftanlagen in Europa	6
1.2	Große Windkraftanlagen für die Energiebereitstellung im Versorgungsnetz	9
1.2.1	Technischer Aufbau einer großen Windkraftanlage	9
1.2.2	Strategische Planung von Windkraftprojekten	11
1.2.3	Standortwahl	16
1.3	Kleinwindkraftanlagen	18
1.3.1	Technische Kategorisierung kleiner Windkraftanlagen	19
1.3.2	Voraussetzungen für das Aufstellen von Kleinwindkraftanlagen	21
1.3.3	Kleinwindkraftanlagenprojekt	25
2	Material & Vorgehensweise	26
2.1	Allgemeine Einführung zum Thema Windkraftanlagen	26
2.2	Experteninterviews mit Windkraftanlagenherstellern	26
3	Ergebnisse	29
3.1	Online-Marktanalyse und Experteninterviews	29
3.2	Charakterisierung mittelgroßer Windkraftanlagen	30
3.2.1	Vergleich verschiedener mittelgroßer Windkraftanlagenmodelle	30
3.2.2	Betriebskonzepte für mittelgroße Windkraftanlagen	34
3.2.3	Herstellungsprozess	36
3.3	Positionierung von mittelgroßen Windkraftanlagen	38
3.3.1	Standortwahl	38
3.3.2	Vereinfachungen im Genehmigungsprozess	42
3.3.3	Beeinträchtigungen der unmittelbaren Umgebung durch mittelgroße Windkraftanlagen	44
3.3.4	Förderungen	46
3.4	Hauptanreize für den Bau einer mittelgroßen Windkraftanlage	48
3.4.1	Entwicklung der Energiekosten in Europa	48
3.4.2	Wirtschaftlichkeit	50
3.4.3	Gesellschaftliche Aspekte	52
3.5	Mittelgroße Windkraftanlagen im Rahmen der Energiewende	53
3.5.1	Windkraft als dezentrale Energiequelle zur Stärkung der Nachfrageelastizität	53
3.5.2	Anschluss von Windkraftanlagen an das Versorgungsnetz	54
3.5.3	Kombination von Speichertechnologien mit mittelgroßen Windkraftanlagen	56
4	Zusammenfassung und Diskussion	59
5	Schlussfolgerung und Ausblick	62
6	Literaturliste	63
7	Abkürzungsverzeichnis	68
8	Nomenklatur	69
9	Abbildungsverzeichnis	70
10	Tabellenverzeichnis	72

11	Anhang A: Interview-Fragebogen	73
12	Anhang B: Interview-Transkript.....	74
12.1	Interview mit Guschewski, Februar 2022	74
12.2	Interview mit Vales, März 2022	80
12.3	Interview mit Overpelt, März 2022.....	83

Kurzfassung

Die elektrische Energiegewinnung mit Windkraftanlagen ist von essentieller Bedeutung für eine nachhaltige Stromversorgung in Europa. Neben den großen Megawatt Windturbinen, die Energie direkt in das Verteilnetz einspeisen und Kleinwindkraftanlagen die ausschließlich für die Eigenstromversorgung kleiner Verbraucher konzipiert sind, gibt es noch die sogenannten mittelgroßen Windkraftanlagen. Sie stehen mit ihren potentiellen Anwendungsbereichen im Mittelpunkt dieser Arbeit. Um eine reale und rezente Beurteilung der Möglichkeiten diese Anlagen in den bestehenden und zukünftigen Markt der nachhaltigen Energieproduktion zu integrieren, abgeben zu können, wurden Hersteller, die auf die Produktion und den Vertrieb von mittelgroßen Windturbinen spezialisiert sind, interviewt. Mittelgroße Windkraftanlagen unterscheiden sich, abgesehen von einer kleineren Leistung und niedrigeren Nabenhöhe, aus technischer Sicht nicht von großen Anlagen. Mittelgroße Windkraftanlagen sind auf dem europäischen Markt für den Netzparallelbetrieb ausgelegt und erlauben es dem Betreiber seinen Strombedarf selbst decken zu können, sowie Überschüsse in das Netz abzugeben. Argumente für die Anschaffung einer Anlage dieser Größe, ist in erster Linie der wirtschaftlich positive Effekt durch Stromkosteneinsparungen. Steigende Energiekosten und der Wunsch nach mehr Unabhängigkeit vom Versorgungsnetz, sind Indikatoren für ein positives Wachstumspotential. Wichtige Rahmenbedingungen sind ausreichende Jahresdurchschnittswindgeschwindigkeiten in Höhen unter 50 m und geförderte attraktive Einspeisevergütungen in Verbindung mit hohen Strompreisen. In südlichen Gebieten Europas kommen mittelgroße Windkraftanlagen wegen ihres spezifischen Leistungsbereiches bei schwachen Netzabschnitten zum Einsatz. Sollten sich die Strompreise, bedingt durch eine Verknappung der Energiebereitstellung bei gleichem Verbrauch, erhöhen, wird es zu einer gesteigerten Nachfrage für mittelgroße Windkraftanlagen kommen.

Abstract

The generation of electrical energy with wind turbines is of essential importance for a sustainable supply of power in Europe. In addition to large megawatt wind turbines, that feed energy directly into the distribution grid, and small wind turbines, that are designed exclusively for the self-supply of small consumers, so-called 'mid-size wind turbines' are used as well. These and their potential application are the focus of this thesis. To give an accurate assessment of the different possibilities to integrate these kinds of wind turbines into current and future markets of sustainable energy production, manufacturers that are specialize in the production and sale of mid-size wind turbines where interviewed. From a technical point of view, mid-size wind turbines do not differ from large turbines, other than having a smaller output and lower hub heights. In Europe, mid-size wind turbines operate in parallel with the grid which allows the operator to autonomously cover his electricity needs and transfer excess electricity into the grid. Arguments for purchasing a wind turbine of this size are primarily based on the positive economic effect of saving on electricity expenses. Rising energy prices and the desire for more independence from the supply grid, are indicators of positive growth potential for mid-size wind turbines. Important framework conditions are sufficient annual average wind speeds at heights below 50 m as well as subsidized and attractive feed-in tariffs in connection with high electricity prices. In southern areas of Europe, mid-size wind turbines are used because of their specific power range in weak and outdated sections of the grid. A possible rise in electricity prices due to a supply shortage of available energy while consumption needs stay at the current level, would expectably lead to a higher demand for mid-sized wind turbines.

1 Einleitung

Um die vom Menschen verursachte Klimakatastrophe rechtzeitig zu verhindern, ist eine dekarbonisierte Energieversorgung dringend notwendig. Beschlüsse, wie das Pariser Klimaabkommen oder das Kyoto Protokoll sollten, um die Nachfrage nach billiger Energie ohne Rücksicht auf die klimatische Situation und den damit verbundenem exzessiven Ausstoß von CO₂ zu reduzieren, politischen Druck auf Länder und Industrien ausüben.

Erfreulicherweise stellt sich die Energieproduktion, die noch bis vor ein paar Jahrzehnten komplett auf fossilen Energieträgern basierte, langsam auf eine Nutzung von erneuerbaren Energiequellen um. Dabei spielt die Erzeugung von "grünem Strom" durch Windkraft eine wichtige Rolle (Strauch, 2020, S1f). Im Vergleich zu bis vor wenigen Jahren hat sich der Anteil an klimaneutraler Stromgewinnung mit Hilfe von Windkraft in den westlichen Industrieländern deutlich erhöht. Aufgrund von stark schwankenden Windgeschwindigkeiten ist eine gleichmäßige permanente Versorgung mit elektrischer Energie auf nationaler Ebene mit Windturbinen nicht möglich. Daher müssen zurzeit, zum Ausgleich der Volatilität und des zusätzlich teilweise defizitären elektrischen Stromangebotes, konventionelle Kraftwerke im Hintergrund bereitstehen (Siddique & Thakur, 2020, S1f)

Im Gegensatz zu den durch stark verbesserte Technologien immer größeren und leistungsfähigeren Windturbinen, finden sich vermehrt sogenannte Kleinwindkraftanlagen für den lokalen Energiebedarf. Diese verbessern, abgesehen positiven ökologischen Aspekten, die gesellschaftliche Akzeptanz der Windkraftnutzung (Watson et al., 2019, S8f). Die Idee selbstständig Energie mit einer eigenen Windkraftanlage produzieren zu können, gewinnt immer mehr an Interesse und Aufmerksamkeit. Angelehnt an das Konzept der Kleinwindkraftanlagen, gibt es Firmen, welche sich auf die Entwicklung von „mittelgroßen“ Windturbinen konzentrieren, die in einem Leistungsbereich von 100 bis 750 Kilowatt arbeiten. In Deutschland erleichtern diese baulich deutlich kleineren Windkraftanlagen für Gewerbegebiete kommunale Genehmigungsverfahren. Die mittelgroße Windkraftanlage ist für ein Unternehmen mit hohem Energieverbrauch ein attraktives Konzept den Stromeigenbedarf kostengünstig zu decken (UmweltDialog, 2020; Köpke, 2021).

Um auf die Thematik der mittelgroßen Windkraftanlagen und deren Nischenmarkt eingehen zu können, wird zunächst die Entwicklung und Funktionsweise von Windkraftanlagen überblicksmäßig erklärt. Anschließend werden die für einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb notwendigen technischen und rechtlichen Aspekte sowie erforderlichen Standortbedingungen großer und kleiner Windkraftanlagen erläutert. Dabei zeigt sich, welchen Einfluss Anlagengröße und installierte Leistung auf den Anwendungsbereich haben.

Mit den Erkenntnissen, die sich aus dem Vergleich der unterschiedlichen Windkraftanlagengrößen in der Einleitung ergeben, wird das Konzept der mittelgroßen Windkraftanlagen analysiert und aufgearbeitet. Ziel der Arbeit ist es die Forschungsfrage „Welche Anwendungspotenziale und dafür notwendigen Rahmenbedingungen gibt es für Windkraftanlagen im mittelgroßen Leistungsbereich innerhalb Europas?“ anhand der erzielten Ergebnisse zu beantworten. Aus den gewonnenen Resultaten ergibt sich eine Schlussfolgerung mit Hinblick auf die Zukunft mittelgroßer Windkraftanlagen und deren Einsatzmöglichkeiten.

1.1 Das Konzept der Windkraft als nachhaltige Energiequelle

Zu Beginn der Einleitung wird die technische Realisierung und das physikalische Grundprinzip der Stromgewinnung aus Windkraftanlagen beschrieben. Anschließend wird der Ausbau der Windenergie in Europa und die damit verbundene Problematik für das Versorgungsnetz veranschaulicht.

1.1.1 Geschichtliche Entwicklung der Windkraftanlagen

Die Nutzung von Windenergie ist den Menschen schon seit Jahrtausenden hinreichend bekannt. Es finden sich die ersten Windmühlen im 7. Jahrhundert nach Christus im mittleren Osten. Erst ab dem Mittelalter etablierten sich Windräder auf dem europäischen Kontinent. Die technische Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie war erst umsetzbar, nachdem neue grundlegende Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre und der damit entstandenen Elektrotechnik gewonnen wurden. Die Aussicht auf wirtschaftliche Gewinne war der zentrale Anstoßeffekt und führte in relativ kurzer Zeit zur Serienproduktion von effizienten Windkraftanlagen. Eine Vergrößerung der Windkrafträder war gleichbedeutend mit einer deutlichen Ausweitung der installierten Leistung. Aufgrund von steigenden Marktpreisen bei fossilen Brennstoffen im Zusammenhang mit der Ölkrise der 70er Jahre, erhöhte sich das Interesse an alternativen Möglichkeiten zur Stromgewinnung. Ausgelöst durch den zunehmenden Energiemangel, als Folge einer stetig wachsenden Elektrifizierung und wirtschaftlichen Produktivitätssteigerung, wurde die Erzeugung von Windstrom konkurrenzfähig. Dänemark, Deutschland, Niederlande und die Vereinigten Staaten, insbesondere Kalifornien, sind zu Vorreitern der Windkraftnutzung und -förderung geworden. Die technische Entwicklung führte bereits vor der Jahrtausendwende zur Inbetriebnahme von Windkraftanlagen mit dramatisch angestiegenen mittleren Betriebsleistungen im Megawattbereich. Der technologische Fortschritt, widerstandsfähigere Materialien, kostengünstigere und einfachere Montageverfahren, sowie verbesserte Optik für die

Integration in die Kulturlandschaft waren verantwortlich für den Durchbruch der Windturbinen (Heier, 2018). Mittlerweile werden Windkraftanlagen nicht nur an Land, sondern auch auf hoher See, bedingt durch höhere und konstantere Windgeschwindigkeiten installiert. Sogenannte Offshore-Windkraftanlagen auf offenem Meer, benötigen zwar einen wesentlich größeren technischen Aufwand und verbessertes Know-How, generieren aber gleichzeitig ungleich größere Mengen an elektrischer Energie. Offshore-Forschungsprojekte und dadurch neue entstandene Innovationen erwecken zusätzliches Interesse von Investoren (Igwemezie et al., 2019, S181ff).

1.1.2 Physikalisches Grundprinzip der Energiegewinnung

Ursache des Windes sind unterschiedliche Temperaturen in der Erdatmosphäre, bedingt durch die Sonneneinstrahlung. Da die erwärmte Luft, bei gleichbleibendem Atmosphärendruck an Dichte verliert und dadurch leichter wird, kommt es zur Entstehung von Winden. Die mit einer bestimmten Geschwindigkeit strömenden Luftmassen enthalten kinetische Energie. Windkraftanlagen entnehmen den durch das Windrad strömenden Luftmassen, einen wesentlichen Teil ihrer translatorischen kinetischen Energie und wandeln diese zuerst in mechanische Rotationsenergie und dann in elektrische Energie um. Die Berechnung der Windkraftanlagenleistung beginnt bei der Energie des Windes, die durch die Fläche strömt, welche von den Rotorblättern der Windkraftanlage überstrichen wird (Jarass et al., 2009, Zahoransky, 2019). Die kinetische Energie des Windes E_{kin} setzt sich aus der Luftmasse m und der Windgeschwindigkeit vor dem Windrad v_{vor} zusammen (1) (Gasch et al., 2005, S179).

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{vor}^2 \quad (1)$$

Die Leistung vor der Windkraftanlage P ergibt sich dann wie folgt aus dem Luftmassenstrom pro Zeiteinheit $\frac{dm}{dt}$ und der Windgeschwindigkeit (2) (Gasch et al., 2005, S179).

$$P = \frac{d}{dt} E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot v_{vor}^2 \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

Der Luftmassenstrom ist abhängig von der von den Rotorblättern überstrichene Fläche A , der Dichte der Luft ρ und der Windgeschwindigkeit (3) (Gasch et al., 2005, S181).

$$\frac{dm}{dt} = A \cdot \rho \cdot v_{vor} \quad (3)$$

Daraus folgt aus den Formeln (2) und (3) die vor der Windkraftanlage ankommende Leistung des Windes (4) (Gasch et al., 2005, S181).

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v_{vor}^3 \quad (4)$$

Diese theoretisch vorhandene Leistung kann jedoch von der Windkraftanlage nicht vollständig aufgenommen werden, denn sonst käme es zu einem Abfall der Windgeschwindigkeit auf null, und damit zum Stillstand. Die abgeführte Leistung $P_{Nutzleistung}$ errechnet sich somit an Leistung vor und nach der Windkraftanlage (5) (Hau, 2016, S86).

$$P_{Nutzleistung} = P_{vor} - P_{nach} \quad (5)$$

Für die Kalkulation (6) wird der Abfall der Geschwindigkeit berücksichtigt und daher die Durchschnittsgeschwindigkeit verwendet (Patel, 2005, S28).

$$P_{Nutzleistung} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot \left(\frac{v_{vor} + v_{nach}}{2} \right) \cdot (v_{vor}^2 - v_{nach}^2) \quad (6)$$

Nach mathematischer Umformung der Gleichung (6) ergibt sich die Formel für die Nutzleistung (7), in der ein Wirkungsfaktor c_p angeführt (8) wird (Patel, 2005, S28).

$$P_{Nutzleistung} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v_{vor}^3 \cdot c_p \quad (7)$$

$$c_p = \frac{\left(1 + \frac{v_{nach}}{v_{vor}} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_{nach}^2}{v_{vor}^2} \right)}{2} \quad (8)$$

Der hiermit über die gemessenen Windgeschwindigkeiten berechenbare Wirkungsfaktor (Leistungsbeiwert), auch nach seinem Erfinder Betzfaktor benannt, gibt eine gute Möglichkeit den Wirkungsgrad der Windkraftanlagenkonstruktion zu beurteilen. Der aus der Formel für den Betzfaktor, sich ergebende theoretische Maximalwert von 0,6 kann, auch ohne andere den Wirkungsgrad noch zusätzlich negativ beeinflussende Faktoren miteinzubeziehen, nach oben nicht überschritten werden. Die angeführten Berechnungen, geben ausschließlich Auskunft über den Gehalt an kinetischer Energie, der von jeder Windkraftanlage theoretisch abgeführt werden kann. Änderungen thermodynamischer Zustandsgrößen wie Druck und Temperatur der Luftmassen im Nahbereich der Windkraftanlage werden hier nicht angeführt (Gasch et al., 2005; Patel, 2005).

Die bis dato erfolgreichste Konstruktion für eine maximale Effizienz ist der Auftriebsläufer bei dem die Rotorblätter wie Flugzeugtragflügel konstruiert sind. Eine senkrecht zur konvex gewölbten Oberseite des Rotorblattes wirkende Kraft, bedingt durch die anströmende Luft des Windes, erzeugt die Drehbewegung über den Bernoulli-Effekt. Dieser aerodynamische

Auftrieb wird noch durch eine, sich zur Geschwindigkeit des Windes zusätzlich vektoriell zu addierende Umlaufgeschwindigkeit, ausgelöst durch die Rotorblattbewegung verstärkt. Die resultierende höhere Auftriebskraft führt zu einem Anstieg von Drehmoment und Leistung (Gasch et al., 2005; Patel, 2005).

Das Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblätter zu Windgeschwindigkeit, die sogenannte Schnelllaufzahl liegt bei Auftriebsläufern immer deutlich über dem Wert 1, siehe Abbildung 1. Über den idealen Rotorblatteinstellwinkel lässt sich der Wirkungsgrad je nach Windstärke, jederzeit leicht optimieren. Um die doch sehr komplexen strömungstechnischen Erfordernisse (starker Auftrieb und gleichzeitig geringer Luftwiderstand) erfüllen zu können, hat sich bei der Gestaltung der Rotorblätter, eine ähnlich der Flugzeugtragfläche, aber in sich verdrehte nach radial spitz zulaufende Form, nach langer Entwicklung herauskristallisiert. Bei der technischen Umsetzung haben sich Dreiblattroten, die zu einer vibrationsarmen gleichmäßigen Drehbewegung führen, durchgesetzt (Heier, 2018; Jaeger, 2021).

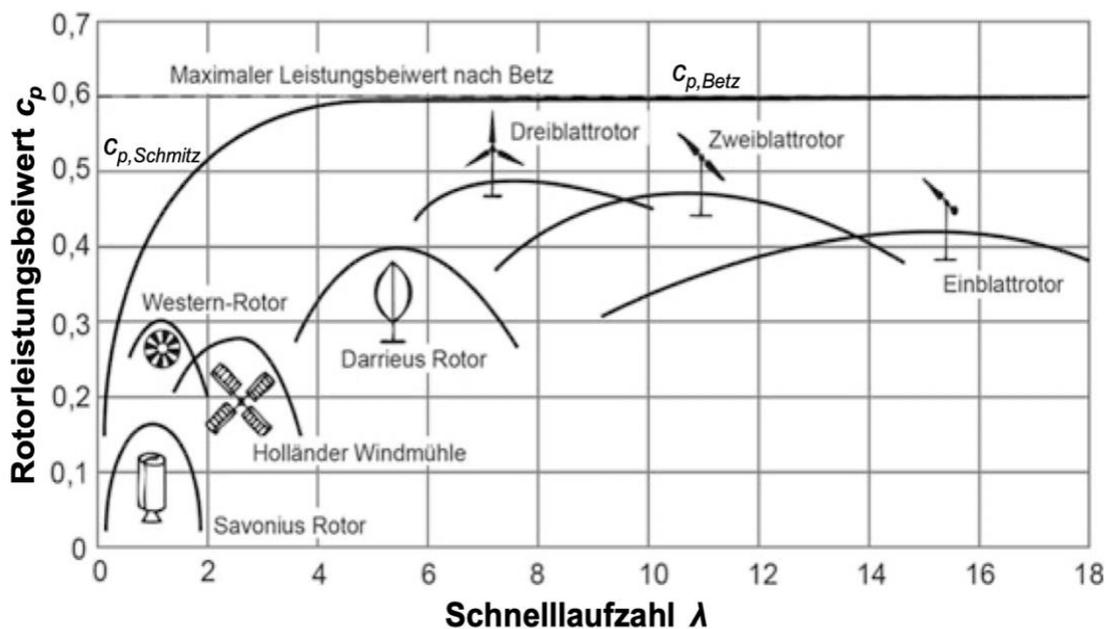


Abbildung 1: Leistungsbeiwert-Kennlinien unterschiedlicher Windturbinen (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S537)

Das schwingungsarme Zusammenspiel der Rotorblätter senkt die Kosten für die Instandhaltung und verlängert die Lebensdauer der Anlage. Die lokalen Wetterbedingungen haben den größten Einfluss auf Wartungsbedarf und Wirtschaftlichkeit (Jaeger, 2021).

1.1.3 Zuwachs an Windkraftanlagen in Europa

Die immer größer werdenden Windkraftanlagen sind eine Folge des physikalischen Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und erzielbarer Leistung. Höhere Türme und immer längere Rotorblätter stellen jedoch besondere Anforderungen an Material und Verarbeitung. Trotz teilweise hoher Investitionskosten, mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz und politischer Richtungslosigkeit, hat die Bedeutung der Energie aus Windkraftanlagen seit zwei Jahrzehnten stetig zugenommen. Im Jahr 2012 wurden 7 Prozent des elektrischen Energiebedarfes aller EU-Mitgliedstaaten durch Windkraft gedeckt (McKenna et al., 2016, S1213). Sieben Jahre später war es bereits mehr als das Doppelte. In Europa wurde bis 2019 nach Aussage des Bundesverbandes WindEnergie, eine gesamte Leistung von 205 Gigawatt installiert. In Abbildung 2 ist gut zu erkennen, wie das Wachstum an Windkraftanlagen jedes Jahr kontinuierlich voranschreitet. In den letzten Jahren haben Länder wie Großbritannien, Spanien und Frankreich mit ihren installierten Windkraftleistungen Deutschland übertroffen (Bundesverband WindEnergie, 2020).

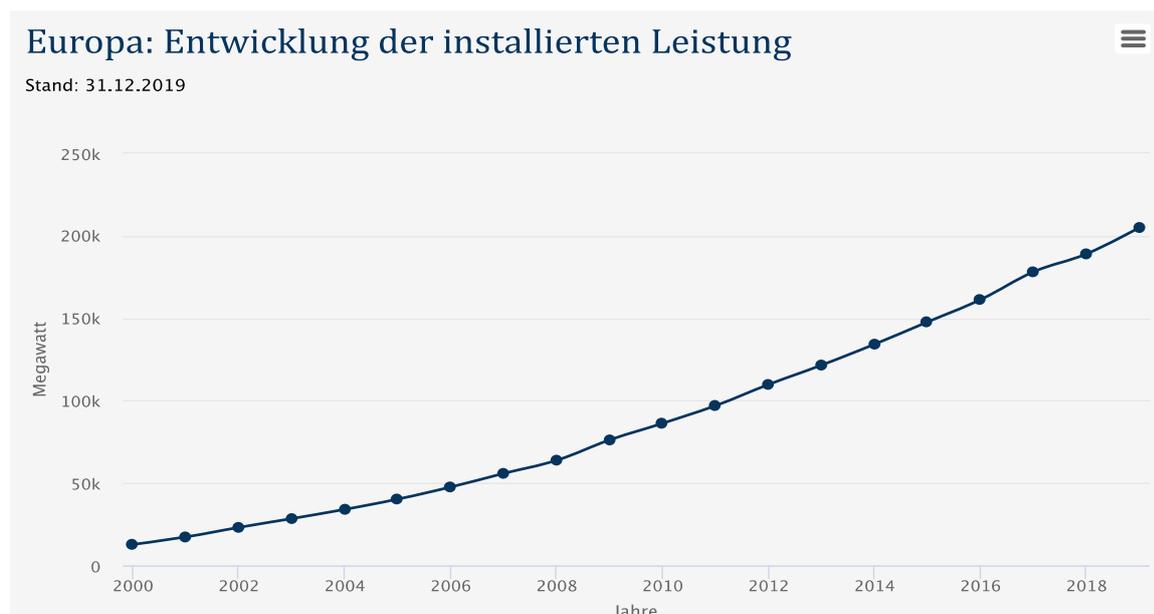


Abbildung 2: Steigende Installierte Leistung in Europa von 2000 bis 2019 (Bundesverband WindEnergie, 2020, o.S.)

Die Bundesrepublik Deutschland war neben Dänemark eines der ersten Länder die Windparks an ihr Versorgungsnetz angeschlossen hat. Bereits in den 90er Jahren sorgte die Politik, durch Förderprogramme und geeignete Gesetze, für gute Rahmenbedingungen. Obwohl der Ausbau von Windkraftanlagen, insbesondere bei Onshore-Konstruktionen zurück geht, ist die Windenergie für die nachhaltige Stromproduktion ein wesentlicher Faktor (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020).

1.1.3.1 Windkraft als Leittechnologie der Energiewende

Die in der gesamten Europäischen Union durchschnittlich produzierte Strommenge im Jahr 2018 aus Windenergie war fast dreimal höher als die aus Photovoltaik. Gleichzeitig ist die installierte Leistung der Windkraftwerke nur eineinhalb Mal größer als die in Solarzellen (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020). Der dadurch deutlich erkennbar größere Anteil von Windenergie an der Stromproduktion begründet sich in den stark unterschiedlichen Grundvoraussetzungen für einen geeigneten Betrieb. Abgesehen von lokalen Standortbedingungen ist die Stromgewinnung aus der Photovoltaik nur unter stark eingeschränkten Bedingungen möglich. Eine effiziente Energiegewinnung ist außerdem in großem Maße von der Jahres- und Tageszeit abhängig. Im Gegensatz dazu, finden sich leichter entsprechende Rahmenbedingungen für das Betreiben von Windkraftanlagen (Boretti & Castelletto, 2020, S1). Die in Europa installierten Windkraftleistungen bewegen sich im Gigawatt Bereich. Es muss allerdings zwischen der installierten Leistung eines Atom- oder Kohlekraftwerkes und der einer Windkraftanlage unterschieden werden. Bei der installierten Leistung einer Windturbine wird die Nennleistung gemeint, die bei Windgeschwindigkeiten von über 13 m/s erzeugt wird. Da die Windgeschwindigkeit und damit auch die Leistung des Windes fluktuiert, ist die durchschnittliche Leistung einer Windturbine viel geringer als die installierte Leistung. Nach einem Vergleich verschiedener Windparks in Deutschland, beträgt die durchschnittliche Leistung von Onshore-Anlagen zwischen einem Drittel und einem Viertel der installierten Leistung. Im Gegensatz dazu, kann ein Kraftwerk, welches fossile Brennstoffe als Energiequelle benutzt, seine installierte Leistung dem Versorgungsnetz zur Verfügung stellen (Holler & Gaukel, 2019).

1.1.3.2 Das Problem der Residuallast

Die fluktuierende Energiebereitstellung aus regenerativen Energiequellen, wie die der Windkraft, ist ein komplexes Problem für Netzbetreiber. Windkraftanlagen erzeugen Spannungsunterschiede, Frequenzschwankungen und Speicherverluste. Diesen Nachteil der regenerativen Stromerzeugungstechnologie muss das Versorgungsnetz absorbieren und ausgleichen. In jedem Land benötigt es daher bis jetzt konventionelle Kraftwerke, um eine Netzstabilität für die Bevölkerung gewährleisten zu können (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020). „Wie groß der Einfluss der diskutierten Restriktionen auf das windtechnische Potenzial im Einzelnen ist, hängt vor allem vom Verhältnis der Windstromerzeugung zum gesamten elektrischen Energieaufkommen, von den durch das Windenergieangebot vorgegebenen Fluktuationen und von der Gegen- oder Gleichläufigkeit dieser Erzeugung mit der zeitabhängigen Nachfragecharakteristik, ab“ (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S571).

Die zu kompensierende Leistung im Netz wird Residuallast genannt und ist der Stromverbrauch, der durch die Windkraftanlagen nicht zur Verfügung gestellt werden kann. Eine Netzdestabilisierung verursacht durch Unterdeckung der Residuallast, kann sehr weitreichende Folgen nach sich ziehen und bis zu einem Blackout führen. Um solch ein Szenario verhindern zu können und gleichzeitig die Umstellung auf CO₂ neutralem Strom, beziehungsweise Elektrizität aus Windenergie zu fördern, benötigt es interdisziplinäre Lösungsansätze. Ein verbessertes Stromnetz und eine sinnvolle Verteilung der elektrischen Energie wird bei zunehmender Zahl an Windkraftanlagen notwendig sein. Dies wird zu einem effizienteren Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage führen. Besonders vielversprechend ist der länderübergreifende Netzausbau, der das europäische Versorgungsnetz anpassungsfähiger gegenüber Nachfrageschwankungen macht. Eine gewisse Flexibilität sollte jedoch auch beim Verbraucher Voraussetzung sein. Energieintensive Gewerbe- und Industrieunternehmen sollten sich auch aus eigenem Antrieb, mit dem Thema der Strombedarfsdeckung beschäftigen (Haas et al., 2015, 18Sff).

So wie es einen Mangel an Leistung aufgrund von zu wenig verfügbarer Windenergie gibt, kommt es auch manchmal zum umgekehrten Fall. Bei einer Überproduktion, verursacht durch optimale Auslastung der Windkraftanlagen und geringer Energienachfrage sind Speichersysteme wichtige Elemente eines modernen Energienetzwerkes (Siddique & Thakur, 2020, S1). Konzepte wie die Verwendung von Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen als Kurzzeitspeicher zur Förderung der Netzflexibilität oder die Speicherung von Primärenergie durch Erzeugung und Lagerung von Synthesegas werden bereits getestet und in kleinem Rahmen implementiert. Eines der ältesten und wirtschaftlichsten Herangehensweisen der Netzstabilisierung, ist die Nutzung der Wasserkraft. Dabei spielen die Pumpspeicherkraftwerke als optimale Langzeitspeichersysteme mit einer enormen Speicherkapazität und gut steuerbarer Entladungszeit eine wesentliche Rolle. Die Verwendung von Wasserkraft zur Energiespeicherung ist aufgrund der vielen Volllaststunden und geringen Speicherverluste zudem wirtschaftlich attraktiv (Haas et al., 2015, S87ff).

1.2 Große Windkraftanlagen für die Energiebereitstellung im Versorgungsnetz

Im Folgenden Kapitel werden die Hauptbestandteile einer großen Windkraftanlage sowie die wichtigsten Faktoren, die dabei für einen reibungslosen und effizienten Betrieb zu beachten sind, erklärt.

1.2.1 Technischer Aufbau einer großen Windkraftanlage

Eine klassische Onshore-Windkraftanlage im Megawattbereich arbeitet nach dem oben beschriebenen Auftriebsläuferprinzip und besitzt in der Regel drei sich entlang der horizontalen Achse drehende Rotorblätter. Weiters verfügt die Anlage über einen Turm im Zentrum, der als Verbindungsstück zwischen Fundament und Maschinenraum, auch Gondel genannt, fungiert - siehe Abbildung 3. Das an der Gondel befestigte Anemometer ist ein Messinstrument zur Erfassung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. In der Gondel befinden sich die mechanischen oder elektrischen Bremsen und ein Getriebe (McKenna et al., 2016, S1213), dass bei schwankenden Windgeschwindigkeiten die Drehzahl der Rotorblätter an das Drehzahlniveau des Generators anpasst (Heier, 2018).

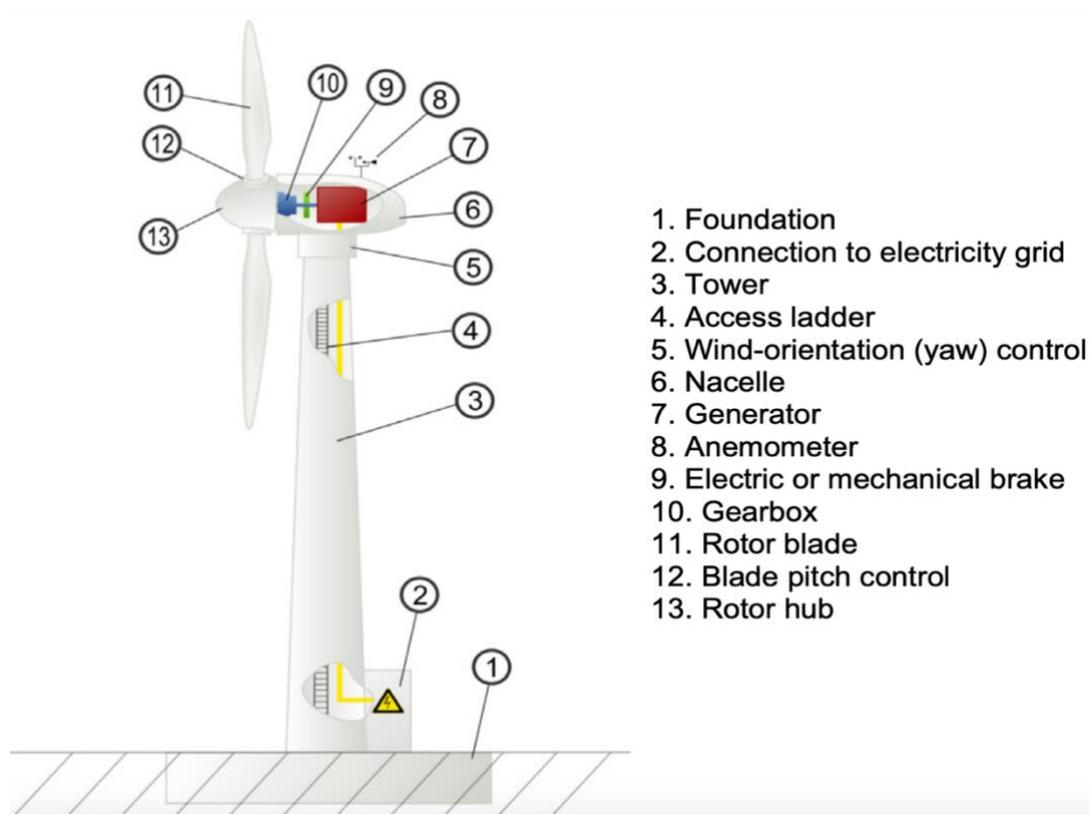


Abbildung 3: Aufbau und Elemente einer klassischen Windkraftanlage (McKenna et al., 2016, S1213)

Ein Generator arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion und wandelt die durch den Wind erzeugte Drehbewegung an der Rotornabe in elektrischen Strom um. Die Wahl des richtigen Generatortyps für die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Windkraftanlage ist ausschlaggebend für den wirtschaftlich optimalen Betrieb. Geophysikalische Standortvoraussetzungen, zu erwartender Drehzahlbereich sowie eine eventuelle Netzanbindung bestimmen den Konstruktionstyp. Für Windkraftwerke kommen nur die robusten synchron oder asynchronlaufenden Drehstromsysteme in Frage (Heier, 2018). Das Pitch-Regelungssystem einer Windkraftanlage ermöglicht es die Winkeleinstellung der Rotorblätter je nach Windgeschwindigkeit zu ändern. Dies ermöglicht eine Maximierung der Leistungsaufnahme. Im Falle von stürmischen Bedingungen, kann die Leistungszufuhr auch reduziert werden, indem die Angriffsfläche der Flügel verringert wird. Dies verhindert eine Überlastung der Windturbinen und spielt bei großen Anlagen eine entscheidende Rolle (Serrano-González & Lacal-Aránategui, 2016, S2182f). Ein simplerer Schutzmechanismus ist die Stall-Regelung, die bei starren Rotorblättern und hochtourigem Betrieb eine passive Strömungsablösung verursacht. Dabei werden die Flügel, ohne Blattwinkelverstellung, einfach aus dem Wind gedreht. Ab einer Windgeschwindigkeiten von 20 bis 25 m/s wird das Risiko einer Beschädigung als zu hoch eingestuft, um die Windkraftanlage weiter laufen zu lassen (Zahoransky, 2019).

1.2.1.1 Leistungsanstieg von Windkraftanlagen

Die Entwicklung von Windkraftanlagen zur Netzeinspeisung mit Primärstrom ist gezeichnet durch die kontinuierliche Größen- und Leistungszunahme, siehe Abbildung 4.

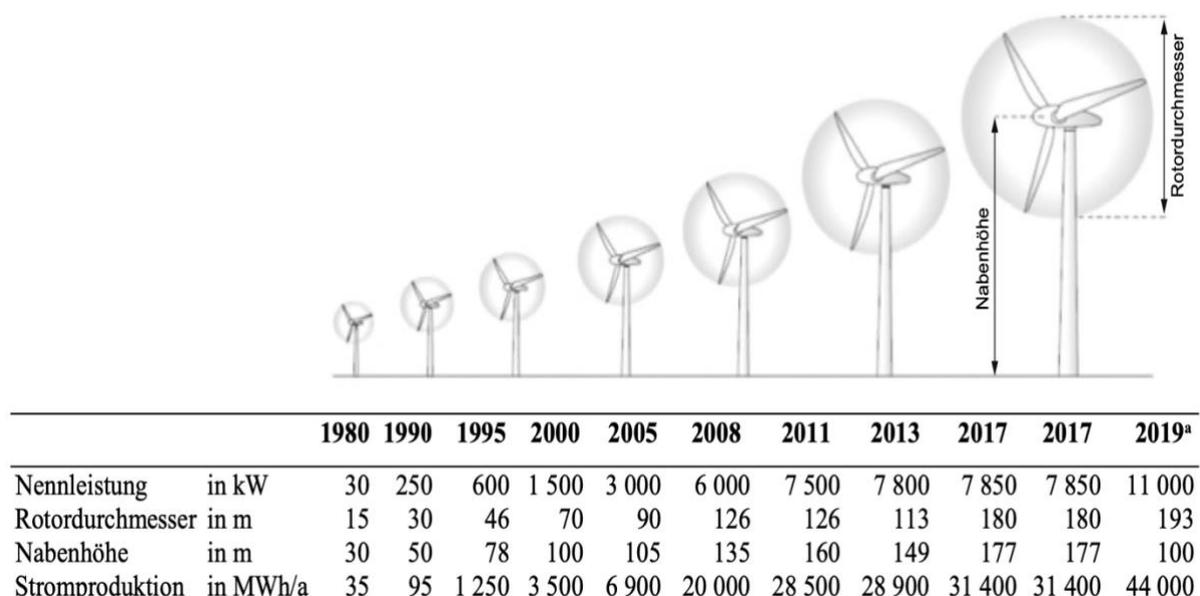


Abbildung 4: Größen- und Leistungszunahme von Windkraftanlagen zwischen 1980 und 2019 (^a ausschließlich für Offshore Anwendung) (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S542)

Geringerer Instandhaltungs- und Betriebsaufwand, Kosteneinsparungen basierend auf dem Skaleneffekt, sowie Subventionsprogramme für den Ausbau von größeren Windkraftanlagen sind weitere Gründe für diesen Trend der Superlative (Kaldellis & Zafirakis, 2011, S18). Die meisten Onshore-Anlagen, welche im Moment im Einsatz sind, haben eine Nennleistung von ungefähr 3 Megawatt (McKenna et al., 2016, S1213) Beim Errichten von neuen Onshore-Windkraftanlagen, beziehungsweise beim Austausch von älteren Modellen, werden leistungsstärkere Modelle bevorzugt. Das Austauschverfahren veralteter Anlagen wird als Repowering bezeichnet. Dabei werden teilweise mehrere schwächere Windkraftanlagen von einer geringeren Anzahl an stärkeren ersetzt (Int. Wirtschaftsforum Regenerative Energien, 2021). Windkraftanlagen dieser Leistungskategorie besitzen entsprechende Rotordurchmesser und Nabenhöhen. Abgesehen von den schnelleren und gleichmäßigeren Windgeschwindigkeiten bei steigender Höhe, können größere Windkraftanlagen zum Beispiel in bewaldetem Gebiet über den Bäumen arbeiten und somit den Ausbau der Windenergie vorantreiben. Besonders in Ländern mit einem hohen Waldanteil sind ökologisch minderwertige Forstflächen für die Energieproduktion eine interessante Option (Europäische Kommission, 2020, S16; Lütkehus et al., 2013, S26).

1.2.2 Strategische Planung von Windkraftprojekten

Die Inhalte dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf Onshore-Windkraftanlagen. Damit ein ordnungsgemäßer und effizienter Betrieb von Windkraftanlagen gewährleistet werden kann, müssen gewisse Rahmenbedingungen geprüft und eingehalten werden. Dabei ist die strategische Planung ein wichtiges Werkzeug für den erfolgreichen Ausbau der Windkraft. Sie ist von der Europäischen Union als standardisiertes Verfahren implementiert. Um die Ziele der Europäischen Union für den Ausbau von regenerativen Energien erfüllen zu können, müssen die Mitgliedsstaaten laut Verordnung über das Governance-System für die Energieunion und den Klimaschutz nationale Energie- und Klimapläne ausarbeiten und durchsetzen. Ergänzend dazu wurde 2009, die Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energien aus erneuerbaren Energiequellen, welche 2015 sowie 2018 im Rahmen einer Novelle angepasst wurde, erstellt. Als Konsequenz dieses Erlasses, muss eine Beurteilung des Energiepotenzials und eine damit verbundene Raumanalyse für die Genehmigung neuer Projekte, unter anderem auch für Repowering-Vorhaben, durchgeführt werden (Europäische Kommission, 2018, S82; Europäische Kommission, 2020, S112f). „Dabei muss zuerst bestimmt werden, ob und in welchem Umfang Windkraftprojekte tatsächlich der umweltfreundlichste und geografisch, sozial und wirtschaftlich geeignetste Mechanismus sind, um die Ziele in Bezug auf die Verringerung der CO₂-Emissionen und den Ausbau der erneuerbaren Energien zu erfüllen“ (Europäische Kommission, 2020, S112). Es muss daher,

eine für die Raumplanung spezifische, genaue Untersuchung verschiedener Elemente der Flächennutzung durch Windkraft ausgearbeitet werden. Dabei werden folgende Kriterien im Bereich von Technik und Sozioökonomie abgehandelt:

- Windbedingungen
- Netzanbindung und deren Kapazität
- Topografie und Bodenbeschaffenheit
- Abstand zum nächsten Wohngebiet
- Nutzung und Verfügbarkeit von Flächen
- Unmittelbar in der Nähe befindlicher Flugverkehr
- Lärmschutzregelungen
- Distanz zu Radaranlagen und Flughäfen

In Bezug auf den Schutz von Flora und Fauna müssen weitere Faktoren überprüft werden:

- Natura-2000-Schutzgebiete und die damit in Zusammenhang stehenden Flächen sowie dazwischenliegende Gebiete, die für den Artenschutz Flug- oder Wanderrouten von Bedeutung sind
- Zusätzliche nationale und regionale Schutzgebiete oder Lebensräume für Arten, die unter Naturschutz stehen
- Der Schutz von Lebensräumen und Arten, die von der Europäischen Union als bedroht eingestuft wurden (dabei wird auf das besonders hohe Gefährdungspotential, durch Windkraftanlagen für Fledermäuse und Vögel geachtet)
- Evaluierung von Populationsbeständen einzelner Tierarten und deren Lebensräume

Die Aufgabe der Raumplanung ist nicht die Prüfung von spezifischen Windkraftprojekten, sondern eine allgemeine Beurteilung für Standorte abzugeben, die eventuell für eine Windkraftnutzung in Betracht gezogen werden. Diese Kategorisierung erfolgt durch eine strategische Umwelt- und Verträglichkeitsprüfung. Die Evaluierung des Raumplanes ersetzt nicht die individuelle Prüfung eines sich in Planung befindlichen Windkraftanlagenprojektes (Europäische Kommission, 2020, S112ff).

1.2.2.1 Auswirkungen großer Windturbinen auf ihre unmittelbare Umgebung

In Europa sind die meisten Länder relativ dicht besiedelt und daher ist es erforderlich einen Ausgleich zwischen den Interessen von Windkraftwerkbetreibern und Anrainern mit ihren Befürchtungen und Einwänden, zu finden. In erster Linie geht es dabei um den Schattenwurf, die Schallausbreitung, sowie die Auswirkungen der großen Windturbinen auf das Ortsbild und den Naturschutz (Heier, 2018).

Die Richtlinien der Europäischen Union geben vor, dass eine umfassende Umweltverträglichkeitsprüfung, ab 20 oder mehr Windkraftanlagen mit einer Gesamthöhe von über 50 m, durchgeführt werden muss. Im Falle einer niedrigeren Windkraftanlagenanzahl und -höhe, reicht eine Vorprüfung, die damit eine gesamte Umweltverträglichkeitsprüfung ersetzt. Je nach Staat und/oder Bundesland kann die gesetzliche Regelung für die Ausführung der Umweltverträglichkeitsprüfung variieren (Frenz, 2016, S252). Um in der Bundesrepublik Deutschland an einer Ausschreibung und des damit verbundenen Genehmigungsverfahrens für die Errichtung einer großen Windkraftanlage teilnehmen zu können, ist gegebenenfalls eine Verträglichkeitsprüfung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz zu absolvieren (Deutsche Windguard, 2020, S11).

Moderne Windkraftanlagen mit einer Leistung von beispielsweise 2 Megawatt und einer Bauhöhe von 140 m erzeugen durch die Drehbewegung ihrer Rotorblätter, Lärm sowie einen weitläufigen Schatten, wie in Abbildung 5 deutlich zu erkennen ist. Schall und Schatten sind in einer Windkraftanlage nicht gänzlich vermeidbar und müssen deshalb in der Planungsphase durch Analyseverfahren genau berechnet werden (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020).

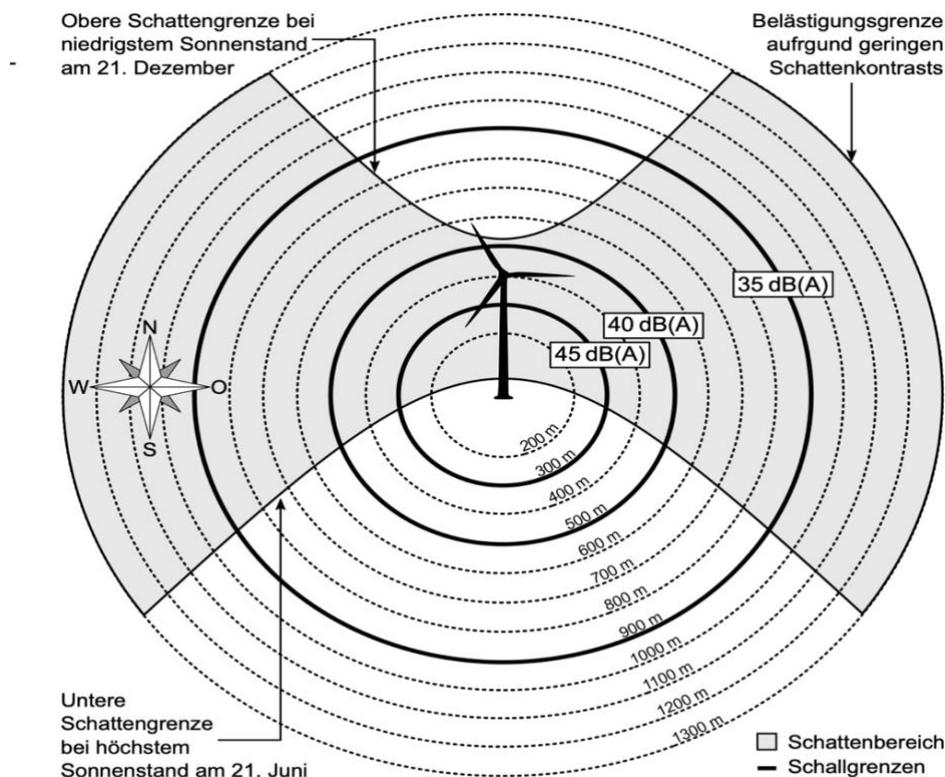


Abbildung 5: Schattenbereich und Schallgrenzen einer 2 Megawatt starken Windkraftanlage (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S555)

Da Windkraftanlagen oft an exponierten Orten aufgestellt werden, können sie einen weitreichenden Schatten verursachen. Schattenwürfe sind abhängig von den Wetterverhältnissen, der Windrichtung und vor allem von der Anlagenhöhe. Bewohnte Häuser dürfen nur für eine bestimmte Zeit beschattet werden, um mögliche Stressreaktionen für betroffene Personen zu verhindern. Üblicherweise liegt der Grenzwert bei 30 Stunden Schatten pro Jahr und 30 Minuten pro Tag. Es sind die Effekte auf das Wohlbefinden von Menschen, sowie das möglicherweise reduzierte Wachstum von Pflanzen und der dadurch verminderte landwirtschaftliche Ertrag, ausgelöst durch mehr Schatten, die hier von Bedeutung sind (Frenz, 2016, S253). Ein Überschreiten der Grenzwerte kann bis zu einer angeordneten Betriebsunterbrechung der Anlage führen. Um den Schatten in der betriebsfreien Zeit minimieren zu können, wird die Gesamthöhe der Windkraftanlage verringert. Dabei werden die Rotorblätter mit Hilfe eines Steuerungssystems nach unten bewegt (Heier, 2018).

Windkraftanlagen emittieren je nach Windbedingungen durch das Getriebe und den Generator Schallwellen, die als Lärm wahrgenommen werden. Aufgrund dieser Lärmbelastung wurde die in den Medien oft diskutierte 1000 m Regelung für bewohnte Gebiete in Deutschland beschlossen. Diese Distanzbeschränkung ist auf die Verwaltungsvorschrift der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm zurückzuführen, die vorgibt, dass in reinen Wohngebieten der obere Grenzwert von 35 dB in der Nacht eingehalten werden muss. In allgemeinen Siedlungs-, Dorf- oder Gewerbegebieten liegt der erlaubte Schallpegel zwischen 40 und 50 dB (Heier, 2018; Frenz, 2016, S253). Für die Bauerlaubnis eines Windparks oder einer Einzelanlage, darf der im Rahmen eines Schallgutachtens ermittelte Maximalschallpegel nicht überschritten werden, denn bei Onshore-Windkraftanlagen ab einer Leistungsklasse von 3 Megawatt ist eine Schalleistung bis zu über 100 dB möglich. Hörschall in diesem Dezibelbereich ist für Personen nachgewiesen gesundheitsschädigend. Infraschallmessungen (nicht hörbarer Schall mit geringerer Frequenz) sind bis dato nicht vorgesehen. Da aufgrund der Lärmverwaltungsvorschrift eine bereits definierte Abstandsregelung für Windkraftanlagen vorhanden ist, gibt es aus wissenschaftlicher Sicht keinen Grund zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen in Bezug auf Infraschallemissionen, für Mensch und Tier einzuführen (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020). In den letzten Jahren schließen Ärzte sowie das Umweltbundesamt den kausalen Zusammenhang von negativen gesundheitlichen Folgen durch den von leistungsstarken Windkraftanlagen produzierten Infraschall nicht mehr gänzlich aus. Es wird argumentiert, dass eine lang- oder kurzzeitige Aussendung dieses Niederfrequenzschalls im Innenohr eine Vielzahl von Beschwerden hervorrufen kann. Immer öfter klagen Personen, seitdem sie in der Nähe von Windkraftanlagen wohnen, über

Symptome wie Herzrhythmusstörungen, Übelkeit, Nystagmus, Schlaflosigkeit, Schwindelanfälle, psychische Probleme wie Depressionen und Kopfschmerzen. Diverse Studien beschäftigen sich derzeit mit den eventuell auftretenden Langzeitfolgen für Herz und Gehirn (Lenzen-Schulte & Schenk, 2019).

Bei der Planung von Windkraftprojekten muss die Veränderung des Landschaftsbildes durch das Aufstellen großer und daher eindeutig sichtbarer Windkraftanlagen mitberücksichtigt werden. Um sich das damit neu entstehende Ortsbild durch die geplante Windkraftanlage besser vorstellen zu können, erstellen Simulations- und Bildbearbeitungsprogramme sehr realitätsgetreue Visualisierungen, die eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Akzeptanz von Projekten durch die lokal ansässige Bevölkerung spielen. Eingriffe in die Landschaftsästhetik können bei Bedarf mit Ausgleichsmaßnahmen in Form von aufgeforsteten umliegenden Landschaftsflächen, sogenannten Kompensationsflächen, abgemildert werden (Heier, 2018).

Das genaue Ausmaß dieser Kompensationen ist abhängig von einem Gutachten aus der Umgebung mit einer inhaltlichen Einstufung der Standortwertigkeit. Allgemein ist zur optischen Wahrnehmung der Windkraftanlagen noch zu erwähnen, dass besonders in Europa, aufgrund der niedrigen Windgeschwindigkeiten und immer größer werdenden Rotorblätter, die Windraddrehzahlen relativ niedrig sind. Dieser Umstand führt zu einer harmonischeren Eingliederung der Windkraftanlage in die Landschaft und einer allgemeinen Beruhigung. Im Vergleich dazu drehen sich kleine leistungsstarke Windkraftanlagen um ein Vielfaches schneller und werden, wenn es um die Landschaftsprägung geht, in der Gesellschaft weniger leicht akzeptiert (Heier, 2018).

Das Aufstellen von Windkraftanlagen, stellt für Tiere und Pflanzen, an einigen für sie kritischen Standorten, eine lebensbedrohliche Gefahr dar. Besonders relevant sind dabei Naturschutzgebiete oder damit in Verbindung stehende Flächen. Die Richtlinie der Europäischen Union zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume von wildlebenden Tieren und Pflanzen (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie) sieht vor, dass nach dem Vorsorgeprinzip der nationale Artenschutz durch windenergie technische Projekte nicht beeinträchtigt werden darf. Behinderungen des Artenschutzes sind dringlichst zu vermeiden, da diese sonst zu einem Zulassungsverbot der Windkraftanlage führen können. Um Vogel- und Fledermauspopulationen zu schützen und das Kollisionsrisiko mit Windkraftanlagen auf ein absolutes Minimum zu beschränken, werden Flug- und Zugverhalten sowie Lebensraumanalysen von lokalen Arten bereits bei vor der Evaluierung potentieller Bebauungsflächen erforscht und berücksichtigt (Europäische Kommission, 2020, S145ff; Frenz, 2016, S252).

1.2.2.2 Vorgehensweise bei der Projektdurchführung großer Windkraftanlagen

Das gesamte Prozedere beginnt mit der Standortwahl, bei der die lokalen Windbedingungen, die Flächenbebaubarkeit, die Netzanbindung und die Infrastruktur beurteilt werden. Bevor im nächsten Schritt genauer auf ökonomische Aspekte der Windkraftanlage eingegangen wird, werden Förderungen und Kosten des Projektes abgeklärt (Heier, 2018). Förderprogramme bei Windkraftanlagen, welche abgesehen von der Laufzeit, für andere regenerativen Energiequellen ähnlich konzipiert sind, unterstützen die Betreiber von Windkraftanlagen in Form von Marktprämien oder Einspeisevergütungen (Lieblang, 2018, S316).

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse gibt es zwei Hauptverfahren, die angewandt werden. Erstens die Annuitätenmethode, welche den jährlichen Mehrertrag der Investition liefert und zweitens die Kapitalwert-Bestimmung, die aussagt welchen Wert zukünftige Zahlungen in der Gegenwart besitzen (Hau, 2016). Nach Prüfung der Wirtschaftlichkeit und Finanzierung müssen die entsprechenden Genehmigungen für den Bauantrag, die Netzanbindung und die im vorherigen Kapitel erläuterten Bestimmungen zum Natur- und Landschaftsschutz untersucht und eingeholt werden. Im letzten Schritt wird, nach Abklärung der rechtlichen Besitzverhältnisse (Kauf oder Pacht), sofern die Genehmigungen erteilt wurden, die Windkraftanlage errichtet. Für das Aufstellen einer großen Onshore-Windturbine müssen entsprechende Zufahrts- und Transportwege für die großen Einzelkomponenten miteingeplant werden. Neben der Installierung der Windkraftanlage ist der Fundamenteinbau und die Netzverkabelung auch Teil des Errichtungsprozesses (Heier, 2018).

1.2.3 Standortwahl

Um mit Windkraftanlagen effizient Strom produzieren zu können, müssen gewisse Mindestanforderungen an Stärke und Gleichmäßigkeit, des am geplanten Standort auftretenden Windes, gestellt werden. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Höhe (Windscherung) bei gleichzeitiger Abnahme von Turbulenzen. Das ist der Hauptgrund für den Bau von immer größer werdenden Windkraftanlagen. Daher gibt es vermehrt Einzelanlagen, die auf exponierten Anhöhen oder Bergkuppen installiert werden. Beim derzeitigen Stand der Technik, ist es nur möglich die niedrigsten Luftschichten der Troposphäre energietechnisch zu nutzen (Osterhage, 2019). „In den unteren Luftschichten von Metern bis zu Kilometern über der Erdoberfläche überlagern (unter dem Einfluss von Bodenreibung und Bodenrauigkeit) immer kleinere turbulente Windfelder die großräumigen Strömungen, wobei im Mittel der Betrag der Windgeschwindigkeit von oben nach unten abnimmt und direkt am Boden den Wert Null erreicht“ (Jarass et al., 2009, S27).

Ausschlaggebend für die durchschnittliche Windgeschwindigkeit sind Temperaturunterschiede von aufeinandertreffenden Luftmassen und vor allem die topografischen Rahmenbedingungen sowie Oberflächenbeschaffenheit der Umgebung. Günstig ist eine kahle Landschaft mit niedriger Bodenrauigkeit, auf der die Luftströmung stetig und ungestört fließen kann. Allerdings sind auch Gebirgspässe, in denen die Luft aufgrund von horizontaler Verengung eine natürliche Beschleunigung erfährt, bevorzugte Regionen um Windkraft im großen Stil (Windparks) wirtschaftlich nutzen zu können. Stärkere und zusätzlich fluktuierende Turbulenzen beeinflussen nicht nur die Nennleistung der Windkraftanlagen negativ, sondern führen auch zu einem erhöhten Instandhaltungsaufwand, wegen schnellerer Abnutzung der feinmechanischen Bauelemente. Urbane Gebiete sind daher, abgesehen von Sicherheitsproblemen und schwierigen Genehmigungsverfahren, ungeeignet, da hohe Gebäude und Infrastrukturkonstruktionen keine konstant laminaren Luftströmungen ermöglichen (Jarass et al., 2009; Lütkehus et al., 2013, S29).

1.3 Kleinwindkraftanlagen

Der Energiebeitrag und die damit verbundene installierte Leistung von Kleinwindkraftanlagen (KWKA) ist im Vergleich zu den riesigen Megawattanlagen für die Primärstromerzeugung sehr gering. Dennoch wächst der Markt für KWKA weltweit, da Windkraftanlagen dieser Dimensionierung einen sinnvollen Weg in der nachhaltigen Eigenenergiegewinnung darstellen. Politische Unsicherheit bei der Ressourcen- und Energieversorgung und eine große Abhängigkeit von stark volatilen Marktpreisen für elektrischen Strom aus dem Verbundnetz, steigern tendenziell das Interesse an Windkraftanlagen. Der Klimawandel und die damit verbundene Notwendigkeit auf fossile Energieträger zu verzichten, ist ein zusätzlicher Investitionsanreiz für eigene Windkraftanlagen (Leonhartsberger et al., 2018, S4f).

Die Anzahl an weltweit sich im Einsatz befindlichen KWKA, sowie deren gesamte installierte Leistung, steigt kontinuierlich. Die COVID19-Pandemie und die damit verbundenen Einschränkungen haben die Produktherstellungsprozesse und die Projektausführungen zeitweise vollständig zum Stillstand gebracht. Dies hat zu einem temporären Rekordtief bei Neuinstallationen geführt. Die Hersteller gehen jedoch von einer schnellen Erholung nach Pandemieende aus. Aktuelle Analysen und Statistiken haben für die kommenden Jahre eine jährliche Wachstumsrate von bis zu 8,8 Prozent, sowie eine globale Marktkapazität von 17,1 Milliarden Dollar für das Jahr 2030 prognostiziert (Arbaz et al., 2022).

In Europa befinden sich die meisten KWKA in Italien, Deutschland, Spanien, Schweden, Polen und England. Aufgrund des Low Carbon Building Programmes der britischen Regierung, welches von 2006 bis 2010 in Kraft war, boomte die Kleinwindkraftindustrie in der Vergangenheit, da Unternehmen für die Kosten einer KWKA Zuschüsse bekamen. Durch diese Art von Subventionsbestimmungen stiegen die Windkraftanlagen im Gewerbebetrieb und Privatsektor zeitweise stark an. Global gesehen ist die Verteilung der Kleinwindkraft-Technologie in China und den Vereinigten Staaten viel weiter fortgeschritten (Leonhartsberger et al., 2019, S17; Gardiner et al., 2011, S142ff). Der expandierende asiatische Markt für KWKA, wird laut Vorhersagen bis 2030 weiterhin stark wachsen. Abgesehen von China fördern auch Staaten wie Indien, Thailand und Malaysia den Bau von KWKA. Diese sollen in Zukunft verstärkt im Gewerbe und in der Infrastrukturversorgung zum Einsatz kommen. Weiters wird durch die Vergabe von Zertifikaten ein zusätzlicher Anreiz geschaffen (Arbaz et al., 2022).

1.3.1 Technische Kategorisierung kleiner Windkraftanlagen

Eine einheitliche Definition von KWKA gibt es nicht, daher unterscheiden sich die Richtwerte zur Bezeichnung in unterschiedlichen Staaten und Organisationen. Die Internationale Kommission für Elektrotechnik charakterisiert Windkraftanlagen als KWKA, wenn die von den Rotorblättern des Windrades überstrichene Fläche kleiner als 200 m² ist und die Spannung des Aggregates bei Wechselstrom nicht 1000 V und bei Gleichstrom nicht 1500 V übersteigt. Darunter fallen somit vorwiegend Windkraftanlagen mit einer Leistung unter 50kW. Für Genehmigungsverfahren werden Anlagen je nach Generatorleistung weiter unterteilt. International gesehen wird dennoch die Kleinwindkraft allgemein mit dem Grenzwert von 100 kW definiert (Leonhartsberger et al., 2018, S6).

1.3.1.1 Bauweise

Die Funktionsweise kleiner Windkraftanlagen ist im Prinzip die gleiche wie in großen Anlagen. Bei der am häufigsten eingesetzten Konstruktionsart wird eine mit drei Rotorblättern ausgestattete Horizontalachsenwindturbine verwendet. Typische Komponenten wie der Generator für die Energieumwandlung, Sicherheitsfeatures, die beispielsweise bei einem Stromabriss wirken, ein Netzanschluss inklusive notwendiger elektrotechnischer Komponenten für die Spannungs- und Frequenzanpassung sind Grundelemente jeder Windturbine. Bei KWKA spielt der Turm eine untergeordnete Rolle, da die Windturbine auf einem einfachen Masten fixiert werden kann. Zudem können kleine Windkraftanlagen auf Gebäuden positioniert werden, wodurch der Zweck des Turmes lediglich auf die Befestigung beschränkt ist (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014).

1.3.1.2 Vertikalachsenwindturbinen

Eine etwas seltenere Konstruktionsweise, die im Rahmen der kleinen Windkraftanlagen zu erwähnen ist, ist jene der Vertikalachsenbauvariante. Diese Windturbinen drehen sich um ihre vertikale Achse und haben deshalb einen weit niedrigeren Wirkungsgrad als die typischen Horizontalachsenwindturbinen. Modelle wie der Darrieus-Rotor, siehe Abbildung 6, arbeiten nach dem Auftriebsprinzip, vergleiche Kapitel 1.1.2. Im Gegensatz dazu gibt es bei den Vertikalachsenwindkraftanlagen auch eine verbreitete Bauform, die nach dem Widerstandsverfahren funktioniert, siehe Savonius-Rotor in Abbildung 7 (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014; Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020).



Abbildung 6: Drei Darrieus-Windkraftanlagen auf dem Greenpeace-Hauptgebäude in Hamburg (Deutsche Bauzeitschrift, 2015, o.S.)

Der sogenannte Widerstandsläufer basiert auf der Ausnutzung des Luftwiderstandes der Rotorflächen. Dadurch ist der für die Nennleistung ausschlaggebende Rotorleistungsbeiwert sowie die Schellaufzahl, im Vergleich zu anderen Modellen deutlich geringer (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020).



Abbildung 7: Savonius-Widerstandsläufer (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014, S5)

Vertikalachsenwindturbinen benötigen keinen Windnachführungsmechanismus und erzeugen mit ihrem dreidimensionalen Erscheinungsbild mehr Zustimmung in der Bevölkerung. Ein weiterer Vorteil für die gesellschaftliche Akzeptanz ist die geringe Lärmentwicklung, welche auf die durchschnittlich niedrigeren Umfangsgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Diese wirken sich in Folge jedoch auf die zuvor beim Savonius-Rotor angesprochene niedrigere Leistungsausbeute der Vertikalachsenwindturbinen aus, siehe Abbildung 1. In Kombination mit den Wetterverhältnissen im urbanen und suburbanen Raum ist dies ein zentraler Nachteil für die Implementierung dieser Kleinwindkraft-Technologie. Langsame und schwankende Windgeschwindigkeiten sowie starke Strömungsturbulenzen sind typische Windbedingungen in bebauten Gebieten. Zusätzlich ist die hohe Trägheit der Vertikalachsenwindturbine der Hauptfaktor für den energietechnisch und wirtschaftlich ineffizienten Betrieb und erklärt damit den vermehrten Einsatz von Horizontalachsenwindturbinen (Battisti et al., 2018, S102ff).

1.3.2 Voraussetzungen für das Aufstellen von Kleinwindkraftanlagen

Um die Realisierbarkeit eines Kleinwindkraftprojektes abschätzen zu können muss eine gründliche Standortbewertung – Untersuchungen (Messung) der lokalen Windbedingungen – durchgeführt werden. In erster Linie wird die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit evaluiert, wobei Werte ab 4m/s eine sinnvolle Installierung leistungsschwacher Windturbinen prognostizieren. Zusätzlich werden Daten, wie die Häufigkeit von Windturbulenzen, das Auftreten von Windrichtungsänderungen und lokale Maximalwindstärken der letzten Jahre, mitberücksichtigt. Ein Dachaufbau ist, bedingt durch die größere Höhe, im Allgemeinen effizienter als ein am Boden montierter Windmast. Konstante Windbedingungen sind jedoch von einer Vielzahl an Strömungseffekten, der Stabilität der Atmosphäre sowie der Bodenbeschaffenheit abhängig. Messergebnisse haben gezeigt, dass bereits eine Änderung bei der Dachpositionierung von KWKA innerhalb des Daches eine nennenswerte Differenz der Windverhältnisse verursacht. Wegen dem starken Einfluss, den die umgebende Landschaft und Bebauung auf den Anlagenertrag haben, sollte eine Begutachtung der Raumplanung durchgeführt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Struktur der umliegenden Gebäude und die Flächenwidmung keine ungünstigen Voraussetzungen für die Stromproduktion darstellen (Leonhartsberger et al., 2019, S128ff).

1.3.2.1 Genehmigungen

Für das Aufstellen einer KWKA sind eine Bauerlaubnis sowie zusätzlich weitere Genehmigungen erforderlich, um sicherzustellen, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Rahmenbedingungen erfüllt werden. Baurechtlich gesehen ist das Ansuchen für eine Baugenehmigung einer Windturbine als Nebenanlage notwendig. Definitionsgemäß muss damit die Windkraftanlage als Nebenanlage einem Hauptgebäude (Wohnhaus oder Gewerbebetrieb) unterstellt sein. Die Windkraftanlage sollte architektonisch das Hauptgebäude in der Erscheinung, was beispielsweise die Höhe betrifft, nicht dominieren. Weiters darf maximal die Hälfte des erzeugten Stromes nach extern in ein öffentliches Netz abgegeben werden. Dadurch bleibt der Grundgedanke, die netzunabhängige Energieversorgung zu fördern, erhalten. Bei Windkraftanlagen, deren Größe weniger als 10m beträgt, werden in Deutschland je nach Bundesland Ausnahmen in Bezug auf die Notwendigkeit einer Baugenehmigung gemacht. Aufgrund der durch die niedrige Höhe der Windkraftanlage bedingten geringeren Windgeschwindigkeit und damit verschlechterten Energieeffizienz, ist ein wirtschaftlicher Betrieb in städtischen Wohnhausanlagen bei genauer ökonomischer Evaluierung, als nicht wirklich sinnvoll zu betrachten (Jüttemann, 2020).

Um den Anschluss an das Versorgungsnetz zu ermöglichen, bedarf es einer entsprechenden Leitungsinfrastruktur, deren Überprüfung Inhalt eines weiteren Genehmigungsverfahrens ist. Bei der Planung einer Windkraftanlage, vergleiche Kapitel 1.2.2.1, ist besonders auf die Schatten- und Hörschallbelastung der Umgebung zu achten. Für kleine Windkraftanlagen sind diese Immissionen ein oft limitierender Faktor im Genehmigungsverfahren, da KWKA, um eine effiziente Energieversorgung gewährleisten zu können, örtlich relativ nahe der Hauptanlage platziert werden müssen (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014, 1ff).

Der zulässige Hörschall ist in Deutschland, wie bei großen Windkraftanlagen in der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm reguliert. Obwohl kleine Windkraftanlagen bekanntlich zu einer deutlich geringeren Lärmbelastung führen, dürfen die lokal zu erwartenden und dann gemessenen Immissionen, die Grenzwerte nicht überschreiten (Jüttemann, 2020). Studien haben zudem gezeigt, dass Windturbulenzen einen Anstieg des Geräuschpegels verursachen und somit mitberücksichtigt werden müssen. Problematisch für die Zulassung ist hier, der oft noch zusätzlich bestehende geringe Abstand zu benachbarten Häusern, insbesondere in Wohngebieten aufgrund der urbanen Topografie, in Verbindung mit strengeren Immissionsgrenzwerten für bewohnte Gebiete. In Abbildung 8 ist eine Schallemissionskarte einer Vertikalachsenwindkraftanlage, für den Fall eines Darrieus-Rotors, mit einer Nennleistung von 5 kW zu sehen. Dieser Vertikalläufer hat den besten Wirkungsgrad bei einer Windgeschwindigkeit von ungefähr 8 m/s und den höchsten Ertrag bei 9 m/s (Leonhartsberger et al., 2019, S61).

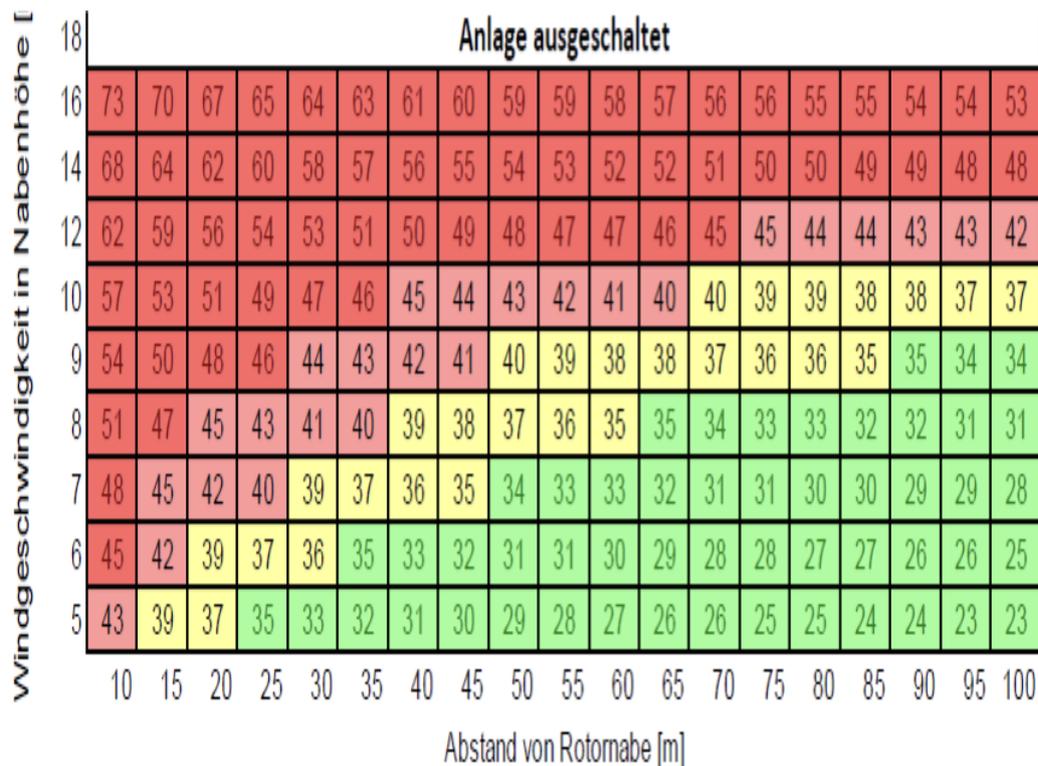


Abbildung 8: Schallemissionskarte einer kleinen Vertikalachsenwindkraftanlage (Leonhartsberger et al., 2019, S135)

Die Schallemissionskarte zeigt, dass der Grenzwert von 35 bis 50 dB im optimalen Betrieb je nach Tageszeit – rechtliche Vorgabe für Wohngebiet - einen Abstand von etwa 60 m von der Windkraftanlage zum nächstgelegenen Gebäude erfordert, um effizient Energie generieren zu können. Dabei wird hier eine zusätzliche Lärmentwicklung durch schwankende Turbulenzen, die bis zu zusätzlichen 2,2 dB je nach Intensität der Turbulenzen erreichen kann, außer Acht gelassen. Das Erfüllen dieser Rahmenbedingungen ist ein entscheidender Faktor für die Verwirklichung von Kleinwindkraftprojekten. Um die Lärmbelastung bei kleinen Windkraftanlagen zu vermindern, muss noch an der technischen Entwicklung, im speziellen an der konstruktiven Gestaltung der Rotorblätter gearbeitet werden, weil es hier noch viel Optimierungspotenzial gibt. Eine genaue Analyse der örtlichen Windverhältnisse mit Festlegung (gegebenenfalls Verringerung) des erforderlichen Nennleistungsbereiches ist notwendig, um die negativen Auswirkungen einer im Betrieb befindlichen Windkraftanlage, auf die in der Umgebung lebenden Menschen zu minimieren (Leonhartsberger et al., 2019, S135; Tummala et al., 2016, S1370ff).

Die Entstehung von Vibrationen und damit eventuell auftretende Resonanzschwingungen sind neben unerwünschten Schallemissionen und negativen Auswirkungen auf die Statik von Gebäuden und Befestigungselementen, auch bei kleinen Windkraftanlagen zu berücksichtigen. Die Analyse des Schwingungsverhaltens kann bei der Montage auf Dächern besonders aufwendig werden, da es viele Faktoren zu berücksichtigen gibt. Die optimale

Auslegung einer Windkraftanlage auf einem Gebäude ist nur möglich, wenn der Hersteller eine dafür notwendige Expertise für die Auswahl der verschiedenen Befestigungselemente und deren Einsatz hat. Bei der Planung muss eine statische Analyse, das Windrad, die Tragvorrichtung und den Untergrund als Gesamtsystem bewerten, um einen reibungslosen Betrieb im gewünschten Leistungsbereich zu gewährleisten (Leonhartsberger et al., 2019, S135ff).

Die geringe Größe der KWKA wirkt sich positiv auf das Problem Schattenschlag aus. Trotzdem sollte darauf geachtet werden, dass bei niedrigen Sonnenständen, Gebäude insbesondere deren Fenster oder Terrassen nicht zu lange von Schatten oder Lichtreflexen betroffen werden. Besonders unkompliziert ist die Installierung von Vertikalachsenwindkraftanlagen in Bezug auf den Schattenwurf, weil die senkrechte Bauform so gut wie keine zu berücksichtigenden Schatten oder Reflexionen erzeugt. Die kleine Dimensionierung von Windkraftanlagen vermindert auch das Gefahrenpotenzial, welches von den sich schnell bewegenden Rotorblättern auf Vögel und Fledermäuse ausgeht, sowie das Risiko von Eisabwurf (Jüttetmann, 2020). Letzteres ist ausschließlich von den Verhältnissen des Standortes abhängig und verursacht vor allem bei großen Windkraftanlagen im Winter Unfälle. Wenn sich Eis auf den Rotorblättern einer Windkraftanlage mit entsprechender Gesamthöhe bildet, kann dieses, durch die Rotationsbewegung der Flügel radial nach außen geschleudert werden. Der Aufprall eines Eisfragments kann nicht nur einen Sachschaden verursachen, sondern in der worst case Variante, zu schweren Verletzungen bei Menschen und Tieren führen. Das Beheizen von Rotorblättern und Aufstellen von Schildern, welche vor Eisabwurf mit Signallichtern aufmerksam machen, sind typische Maßnahmen, um dieser Gefahr entgegenzuwirken. Nichtsdestotrotz darf die Möglichkeit von Eisabwurf bei der Planung von Megawattanlagen nicht außer Acht gelassen werden (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020). Bei der Vereisung kleiner Windkraftanlagen entsteht ein weitaus geringes Sicherheitsrisiko, dennoch darf dieses Thema besonders bei Anlagen in städtischen Gebieten, nicht vernachlässigt werden. Eis, das sich auf den Rotorblätter festsetzt, führt zu einer Verschlechterung der aerodynamischen Parameter. Dies vermindert die Leistung der Windkraftanlage und impliziert in weiterer Folge oftmals das Abschalten der Anlage (Leonhartsberger et al., 2019, S137).

1.3.3 Kleinwindkraftanlagenprojekt

Die Vorgehensweise eines Kleinwindkraftprojektes ist zeitlich sowie inhaltlich strukturiert. Im ersten Schritt müssen die lokalen Bedingungen eines möglichen Standortes in Bezug auf die Höhe, lokale Hindernisse und die Hauptwindrichtung untersucht werden. Zusätzlich werden in dieser Phase die Windbedingungen, wie die Windgeschwindigkeit, das Vorkommen von turbulenten Zonen und die Abundanz von Windrichtungsänderungen, mittels Windmessungen bewertet. Anhand dieser Einschätzung wird bestimmt, ob ein Standort für die Stromproduktion mittels Kleinwindkraft geeignet ist. Im Rahmen dessen wird auch entschieden, ob die Windkraftanlage auf dem Dach oder abseits des Hauptgebäudes montiert werden soll. Sind die lokalen Rahmenbedingungen ausreichend, wird im nächsten Schritt die passende Anlage gesucht. Dabei wird eine Turbine in Abhängigkeit von lokal vorkommenden Windverhältnissen, anzustrebender Nennleistung, Leistungskurve, Hörschallentwicklung, Stromertrag und Betriebsform – Netzanschluss oder Inselbetrieb – ausgewählt. Danach wird das Projekt aus rein ökonomischer Sicht beurteilt, wobei die Amortisations- und Ertragsanalyse wichtig sind (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014).

Die Kosten für die Produktion einer kWh (die Stromgestehungskosten), sind ein entscheidender Richtwert bei der Wirtschaftlichkeitsbestimmung. Die Energieerzeugungskosten der KWKA sollten im Idealfall geringer sein als der Strompreis im Netz. Im Falle einer Überdeckung des Eigenbedarfs wäre es optimal, wenn der Einspeisetarif höher als die Stromgestehungskosten der Windkraftanlage ist. Aus diesem Grund muss die Nennleistung der KWKA immer an den Eigenverbrauch angepasst werden, damit landwirtschaftliche Unternehmen oder Fabriken Energiekosten einsparen. Kleine Anlagenprojekte für private Haushalte sind bedingt durch unzureichende Windverhältnisse und geringem Strombedarf im Gegensatz zu Gewerbebetrieben bis dato nicht wirtschaftlich genug. Trotz ungünstiger Eigenverbrauchsquoten werden Kleinwindkraftprojekte oft aus Nachhaltigkeitsgründen, Umweltschutzmotiven und der Faszination für Technik, von privaten Einzelpersonen umgesetzt (Jüttemann, 2020).

Bevor im letzten Schritt die KWKA sowie die notwendige Infrastruktur gekauft und montiert wird, müssen die juristischen Anforderungen für den Betrieb geprüft werden. Genehmigungen für den Bau, den Netzanschluss sowie Auswirkungen auf die lokale Umgebung, müssen ordnungsgemäß eingeholt werden. Abschließend wird die Windkraftanlage inklusive Mast, Fundament und Verkabelung zusammengebaut und in Betrieb genommen (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014, S127).

2 Material & Vorgehensweise

Die Abhandlung des Themas mittelgroßer Windkraftanlagen wird mit der Beantwortung der Forschungsfrage: „Welche Anwendungspotenziale und dafür notwendigen Rahmenbedingungen gibt es für Windkraftanlagen im mittelgroßen Leistungsbereich innerhalb Europas?“ durchgeführt. Im Rahmen der Ergebnisse, wird die Marktsituation dieser spezifischen Nischentechnologie, mittels Erfahrungsberichten der interviewten Experten, erläutert und entscheidende Faktoren für den erfolgreichen Betrieb und die Nachfrage an mittelgroßen Windkraftanlagen analysiert. Die dafür notwendigen Grundkenntnisse wurden anhand kleiner und großer Windkraftanlagen sowie deren unterschiedlichen Betriebsformen im Einleitungskapitel zusammengefasst.

2.1 Allgemeine Einführung zum Thema Windkraftanlagen

Im ersten Abschnitt der Arbeit, der Einleitung, wurde neben den allgemein wichtigen Fakten, die Vorgangsweise bei Planung und Umsetzung von Windkraftprojekten beleuchtet. Dabei wird zwischen den technischen, rechtlichen sowie wirtschaftlichen Besonderheiten großer Megawattanlagen und Kleinwindkraftanlagen unterschieden, um ein besseres Verständnis für die Marktnische der mittelgroßen Anlagen zu bekommen. Darauf basierend werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Charakteristika von mittelgroßen Windkraftanlagen herausgearbeitet.

Im Einleitungskapitel wurden grundlegende Informationen ausschließlich durch Analyse der vorhandenen Primärliteratur zusammengestellt. Dabei wird versucht mit einzelnen und zusammenhängenden Schlagwörtern nach passenden Publikationen zu suchen, und via Schneeballsystem seriöse aktuelle Studien und Artikel zu finden. Als zentrale Ausgangswerke für den allgemeinen Einstieg in das Thema Windkraft, wurden die Arbeiten „Windkraftanlagen“ von Siegfried Heier (Heier, 2016) und „Erneuerbare Energien“ von Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher und Andreas Wiese (Kaltschmitt, Streicher et al., 2020) angeführt.

2.2 Experteninterviews mit Windkraftanlagenherstellern

Der zweite Abschnitt enthält die Ergebnisse, die durch Kombination von Daten aus Experteninterviews und zusätzlichen Literaturrecherchen erzielt wurden. Da der Anteil an mittelgroßen Windkraftanlagen im Bereich Windstromproduktion bis dato noch relativ klein ist, orientiert sich der Inhalt in erster Linie an den Informationen von Interviewpartnern. Aus der begrenzten Anzahl an Herstellern im Segment der mittelgroßen Anlagen in Europa, siehe

Tabelle 1, waren nur 3 von 8 Firmen bereit, ein Interview zu geben. Alle drei Unternehmen die zugesagt haben, projektieren und bauen Windkraftanlagen innerhalb Europas. Sie haben jahrzehntelange Branchenerfahrung und sind primär spezialisiert auf die Produktion und den Verkauf ihrer eigenen mittelgroßen Windkraftmodelle. Die Interviewanfragen wurden via E-Mail – kurze Beschreibung meiner Person und Masterarbeit sowie allgemeine Erklärung zum Inhalt und Ziel der Leitfragen – den Firmen zugeschickt.

Tabelle 1: Liste der Unternehmen die für Experteninterviews angefragt wurden

Windkraftanlagenhersteller:	Herkunft:	Antwort auf Interviewanfrage:
Wind Technik Nord GmbH	Deutschland	Zusage – Interviewpartner: Finanzvorstand (CFO)
Norvento Enerxía	Spanien	Kein Interesse
Electra Wind S.L.	Spanien	Unternehmen sei nicht mehr aktiv
Northern Power Systems	Italien	Keine Antwort auf Anfrage (E-Mail & Telefon)
Wind Energy Solutions BV	Niederlande	Zusage - Interviewpartner: Projektentwickler
Emergya Wind Technologies BV	Niederlande	Kein Interesse
Norwin A/S	Dänemark	Keine Antwort auf Anfrage (E-Mail & Telefon)
Vergnet	Frankreich	Zusage - Interviewpartner: Produktmanager
RRB Energy Limited	Indien	Kein Interesse

Die im Einleitungsteil vorgestellten Problematiken im Zusammenhang mit dem Vertrieb und Betrieb von Windkraftanlagen dienten inhaltlich als Vorlage für die Interviewfragen, sodass zentrale Themenbereiche rund um die Forschungsfrage abgedeckt werden konnten. Der Interviewleitfaden wurde eher breit angelegt, siehe Kapitel Anhang A, um die technischen Entwicklungen und wirtschaftlichen Anforderungen für den Erfolg in dieser spezifischen und in Europa kleinen Marktnische der mittelgroßen Windkraftanlagen erfassen zu können. Dabei schilderten die Experten nicht nur Probleme und Herausforderungen der Vergangenheit, sondern prognostizierten auch neue Einsatzgebiete für die Zukunft.

Die einstündigen Gespräche mit den Experten wurden per Videotelefonat durchgeführt, aufgenommen und anschließend transkribiert, siehe Anhang B. Die Interviewinhalte aus dem Anhang B sind die grundlegenden Informationsquellen und wurden somit zitiert. Um die Konstruktion mittelgroßer Windkraftanlagen vergleichen und mögliche Merkmale hervorheben zu können, wurden die öffentlich zugänglichen technischen Datenblätter und Prospekte der von den drei interviewten Herstellern angebotenen Produkte herangezogen.

Ziel der Arbeit ist es, die Forschungsfrage mit Hilfe von gesammelten Erfahrungsberichten der verschiedenen Experten und ergänzender Fachliteratur zu beantworten. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zusammengestellt und abschließend diskutiert.

3 Ergebnisse

Windkraftanlagen werden anhand ihrer Nennleistung in vier Gruppen eingestuft. Die Einteilung beginnt mit der kleinsten Bauweise von Windkraftanlagen, den Mirko-Turbinen mit einer Leistung bis zu maximal 10 kW, setzt sich fort mit den sogenannten KWKA im Bereich von 10 bis 100 kW, und endet schließlich bei den großen Anlagen im Megawattbereich. In dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich eine zusätzliche Gruppe von Windkraftanlagen zur elektrischen Stromgewinnung, die sogenannte mittelgroße Windkraftanlage untersucht. Diese haben eine Energieproduktionsleistung von etwa 100 bis 1000 kW, sind in der Regel vollautomatisiert und haben die Möglichkeit ihre erzeugte elektrische Energie bei Bedarf ins allgemeine Netz einspeisen zu können (Choe et al., 2019, S959).

Um ein möglichst realistisches Ergebnis der Anwendungspotentiale mittelgroßer Windkraftanlagen zu bekommen, ist eine umfassende Analyse der Informationen aus den Experteninterviews notwendig. Zu Beginn werden die technischen Charakteristika und Besonderheiten von mittelgroßen Windkraftanlagen erklärt, um in weiterer Folge besser auf Betriebskonzepte eingehen zu können. Dann werden allgemeine Rahmenbedingungen und die für spezifische Betriebskonzepte erforderlichen Voraussetzungen erläutert. Darauf aufbauend werden die Erwartungen und Wünsche des Kunden, basierend auf den Angaben der Hersteller, angeführt. Abschließend wird das Anlagenkonzept und die Anwendung von Windkraftanlagen im mittelgroßen Leistungsbereich als Teil der Energiewende in Europa mit den unterschiedlichsten Problemstellungen beschrieben.

Die wichtigsten Zusammenhänge und Aussagen werden im Rahmen der Diskussion nochmals aufgearbeitet und die Forschungsfrage (siehe Material & Vorgehensweise) mit einem persönlichen Ausblick in der Schlussfolgerung beantwortet.

3.1 Online-Marktanalyse und Experteninterviews

Um sich einen Überblick über technische Spezifikationen und das Angebot an mittelgroßen Windkraftanlagen zu verschaffen, wurde eine Marktanalyse im Internet durchgeführt. Mit Schlagwörtern wie „Mid-size wind turbines“, „mittelgroße Windkraftanlagen“, „250 kW Windkraftanlage“ und „500 kW Windkraftanlage“ wurde primär nach europäischen Herstellern gesucht und diese danach für Interviewanfragen kontaktiert.

Bei der Online-Recherche fiel auf, dass vorwiegend mittelgroße Windkraftanlagen mit einer Leistung von 100 bis 300 kW angeboten werden. Daten und Informationen von Windkraftprojekten, die älter als 20 Jahre sind werden im Studienprotokoll nicht berücksichtigt.

Aus den Online-Produktdatenblättern ist zu erkennen, dass es bis auf die Dimensionierung keinen wesentlichen Unterschied in der Konstruktionsweise zwischen mittelgroßen und großen Windkraftanlagen gibt. Eine deutlich kleinere Gesamthöhe, welche gleichzeitig auf eine geringere Nennleistung schließen lässt, ist das primäre Erkennungsmerkmal. Abgesehen von vereinzelt Case-Studies und Zeitungsberichten finden sich keine Informationen über mittelgroße Windkraftprojekte in der Literatur. Die Experteninterviews geben erstmals Aufschluss über aktuelle technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Problemstellungen für Hersteller von mittelgroßen Windkraftanlagen. Die Transkriptionen der Interviews sind im Anhang B dokumentiert und werden als aktuelle Quellen zitiert.

Die Experteninterviews wurden geführt mit:

- Dieter **Guschewski**, Finanzvorstand der deutschen Firma Wind Technik Nord GmbH
- Éric **Vales**, Projektmanager und Maschinenbauer der französischen Firma Vergnet
- Sjoerd **Overpelt**, Projektentwickler des niederländischen Unternehmens Wind Energy Solution BV

3.2 Charakterisierung mittelgroßer Windkraftanlagen

Mittelgroße Windkraftanlagen leiten sich historisch, aus technischer Sicht von den leistungsschwächeren Windkraftkraftanlagen der Vergangenheit ab, vergleiche Abbildung 4 (Interview Vales). Die Konstruktion ähnelt daher im Wesentlichen einer, wie in Kapitel 1.2.1 beschriebenen, großen Megawattanlage.

3.2.1 Vergleich verschiedener mittelgroßer Windkraftanlagenmodelle

Der Windkraftanlagenhersteller Windtechniknord GmbH, ist ein Unternehmen im Norden Deutschlands, welches mittelgroße Windturbinen baut. Es produziert Anlagen mit einer Nennleistung von 250 bis 600 kW, die alle mit einem Getriebe ausgestattet sind. Diese Bauweise hat laut Hersteller im Vergleich zu einer direkt angetriebenen Anlage den Vorteil, weniger störanfällig zu sein, benötigt jedoch mit der Getriebekomponente ein zusätzliches Bauteil. Das Unternehmen liefert ihre Windkraftanlagen nicht nur an Käufer ins Ausland, sondern betreibt ihre Windkraftanlagen auch selbst an Standorten mit sehr rauen Wetterverhältnissen an der Nordseeküste Deutschlands. Das leistungsmäßig schwächste Modell, die 250 kW Windkraftanlage (WTN250), siehe Abbildung 9, ist für Kunden konzipiert, bei denen die Eigenversorgung mit elektrischer Energie im Mittelpunkt steht (Interview Guschewski).



Abbildung 9: WTN250 Windkraftanlage des Herstellers Wind Technik Nord GmbH (wind-turbine.com, o.J.-b, o.S.)

Die dabei verwendete Stall-Regelung dieses Modells sei, laut Guschewski, typisch für mittelgroße Windkraftanlagen im unteren Leistungsbereich und ist oft der einzige technische Unterschied in der Bauweise, zu größeren Anlagen (Interview Guschewski). Die Aussage, dass bei Windkraftanlagen mit Nennleistungen von unter 100 kW und Netzanschluss die Betriebsleistung über einen passiven Strömungsabriss gesteuert wird, findet sich auch im Lehrbuch „Windkraftanlagen“ von Heier (Heier, 2018).

Windkraftanlagenproduzenten, wie die französische Firma Vergnet und das niederländische Unternehmen Wind Energy Solutions BV, bieten auch mittelgroße Windkraftanlagen im Leistungsbereich von etwa 250 kW an. Alle Anlagen, inklusive des deutschen WTN250i Modells, sind mit einem Asynchrongenerator und Getriebe ausgestattet, um eine gleichmäßige Strombereitstellung, auch bei kurzfristig schwankenden Windverhältnissen zu gewährleisten. Diese Anlagen haben Rotorblätter mit einer Länge von 15 m, die auf unterschiedlich hohen Türmen, je nach Standort und Kundenwunsch, platziert werden (Vergnet Wind Turbines, o.J.; Wind Energy Solution BV, o.J.; Wind Technik Nord, o.J.-a).

Wie in Abbildung 10 und 11 gut zu erkennen ist, haben die Windkraftanlagen des Typs WES250 und GEV MP im Vergleich zu dem etwas robusteren Modell der Firma Wind Technik Nord GmbH, nur zwei statt drei Rotorblätter und sind Pitch reguliert (Vergnet Wind Turbines, o.J.; Wind Energy Solution BV, o.J.; Wind Technik Nord, o.J.-a).



Abbildung 10: GEV MP R Windkraftanlagenmodell des Herstellers Vergnet (Vergnet, o.J., o.S.)



Abbildung 11: WES250 Windkraftanlage des Herstellers Wind Energy Solution BV (wind-turbine.com, o.J.-a, o.S.)

Die Entscheidung ein Rotorblatt weniger zu verwenden, hat einen rein ökonomischen Grund und basiert nicht auf technisch-physikalischen oder konstruktiven Überlegungen, die in

Verbindung mit Schnelllaufzahlen und/oder Leistungskurven stehen. Der reduzierte Produktions- und Instandhaltungsaufwand senkt die Kosten. Nach Angaben des Herstellers Overpelt, führt ein drittes Rotorblatt zu einer erhöhten mechanischen Belastung durch die größere Masse. Das Verwenden von zwei Rotorblättern ist aber kein sicheres Erkennungszeichen einer mittelgroßen Windkraftanlage (Interview Overpelt).

Es ist noch zu erwähnen, dass die GEV MP Modelle eine andere Rotorausrichtung haben. Die Anlagen der Firma Vergnet sind Leeläufer, das bedeutet, sie sind gegen die Windrichtung ausgerichtet (Interview Vales). Somit trifft die Luftströmung auf die Rückseite der Rotorblätter, die aus der Windrichtung betrachtet, hinter dem Turm montiert sind, siehe Abbildung 12. Diese häufige Bauweise bei KWKA nutzt den Effekt, dass sich Leeläufer automatisch mit Hilfe der Kraft des Windes in Richtung des Hauptwindes drehen. Dies wird auch als passive Windausrichtung bezeichnet. Sie spart durch den Wegfall eines zusätzlichen Bauteils für die elektronisch gesteuerte Windausrichtung, neben Gewicht auch Kosten (Bundesverband WindEnergie, 2022).

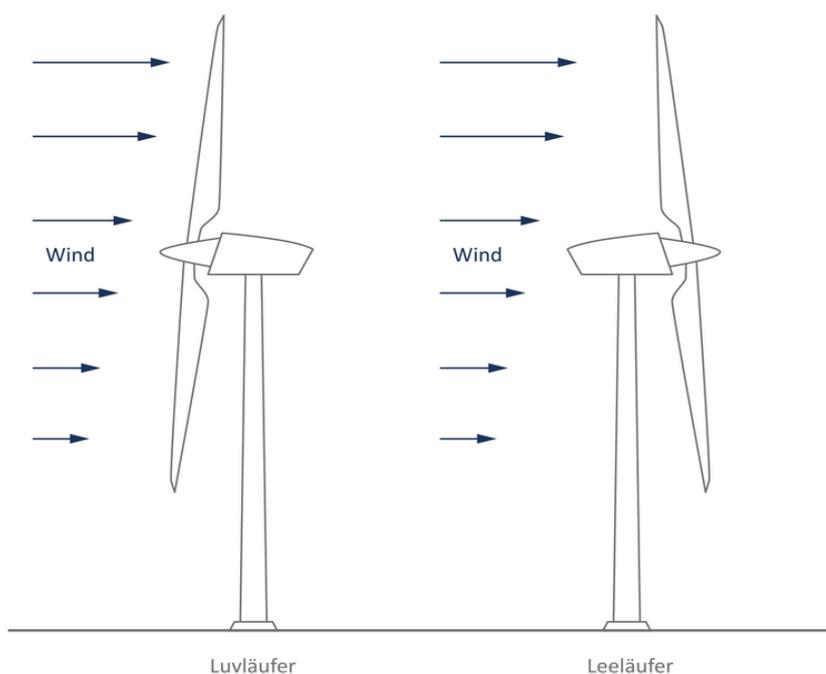


Abbildung 12: Luv- und Leestellung des Rotors zum Turm (Bundesverband WindEnergie, 2022, o.S.)

Ein großer Nachteil des Leeläufers ist allerdings die durch das Auftreffen des Windes auf den Mast entstehende Störung der idealerweise laminaren Strömung, sodass es infolge der Verwirbelung zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades kommt. Deshalb sind Luvläufer leiser und weniger anfällig für Leistungsschwankungen. Die Rotorblätter bei großen Windkraftanlagen sind immer direkt gegen die Windrichtung angeordnet, weil der damit ansonsten auftretende, wie oben angeführte Turmschatten, bei stärkeren Windströmungen unvorteilhafte Effekte erzeugen würde (Bundesverband WindEnergie, 2022).

3.2.2 Betriebskonzepte für mittelgroße Windkraftanlagen

Die aktuell von den Herstellern als mittelgroß bezeichneten Windkraftanlagen entsprechen den vor 30 Jahren leistungsstärksten Modellen. Die Herausforderung für den Vertrieb ist heute, dass sich Windkraftprojekte dieser Größe mit ihrer Leistung genau in die vorhandene Netzstruktur einfügen lassen müssen. Megawattanlagen deren Betrieb ausschließlich für die Netzeinspeisung gedacht sind, haben eine viel größere wirtschaftliche Effizienz als kleinere Anlagen und können folglich elektrischen Strom zu einem geringeren Preis generieren. Diese Windkraftanlagen erfordern durch ihre enorme Größe, wenn es um den Standort und den Transport zu diesem für die Aufstellung geht, spezifische nicht immer vorhandene Bedingungen. Zusätzlich benötigen sie ein modernes Versorgungsnetz, welches die hohen Leistungen aufnehmen kann, worauf in einem späteren Kapitel noch genauer eingegangen wird (Interview Overpelt). Deshalb werden mittelgroße Windkraftanlagen, bis dato eher für die Elektrifizierung von unzugänglichen und dünn besiedelten Orten auf Inseln, aber auch für die Versorgung von entlegeneren landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt. Im Vergleich zur Photovoltaik werden sie basierend auf der höheren Stromleistung, wenn die durchschnittlich benötigte Windgeschwindigkeit vorhanden ist, bevorzugt (Interview Guschewski & Vales).

3.2.2.1 Inselbetrieb

Beim Inselbetrieb versorgt die Windkraftanlage den Verbraucher direkt mit der erzeugten Leistung, beziehungsweise elektrischen Energie. Die Stromerzeugungsquelle - eine mittelgroße Windkraftanlage im Alleinbetrieb oder Teil eines Windparks - ist über ein eigenes lokales Stromnetz mit dem Verbraucher verbunden. Das Verbrauchernetz im Inselbetrieb ist isoliert und an kein weiteres Verteilnetz angeschlossen. Die Priorisierung der Energieverteilung und das Zuschalten von Ausgleichsaggregaten, wie Akkumulatoren oder Dieselgeneratoren, wird über die Betriebsführung gesteuert (Heier, 2018, S390ff). „Die Wechselwirkung zwischen Einspeisesystemen und Verbrauchern bestimmt das Verhalten der gesamten Konfiguration bei schwachen Netzen und vor allem im Inselbetrieb sehr stark“ (Heier, 2018, S391).

Gute Windbedingungen auf Inseln und entlegenen Standorten in Afrika oder Russland, führten dazu das mittelgroße Windkraftanlagen sich im Inselbetrieb gut durchsetzen konnten. Die energietechnische Nutzung des Windes als Hauptstromquelle ersetzte die zuvor meist ausschließlich verwendeten Dieselgeneratoren. Das Investment in eine mittelgroße Windkraftanlage, beziehungsweise Windparks unter diesen Gegebenheiten war und ist weiterhin ökonomisch sinnvoll. Die Kostenersparnis für den Diesel und der logistische Aufwand für den Transport, um jederzeit genügend Treibstoff für die Stromproduktion

bereitstellen zu können, hat eine entsprechend ausreichende Nachfrage erzeugt. Für Tage, mit für einen Betrieb insuffizienten Windgeschwindigkeiten, muss eine Art von Backup zur Abdeckung der spezifisch erforderlichen Grundlast, bereitgehalten werden. Vereinzelt gibt es Fälle, wo mittelgroße Anlagen mit Dieselgeneratoren ohne jegliche Netzanschlussmöglichkeit direkt mit dem Verbraucher verbunden sind (Interview Guschewski & Vales).

Um das Aufstellen mittelgroßer Windkraftanlagen an entlegenen Standorten, wie zum Beispiel auf kleinen Inseln, zu vereinfachen bietet der Hersteller Vergnet ein kippbare Modell an, siehe Abbildung 13 (Interview Vales).



Abbildung 13: Kippbare mittelgroße Windkraftanlage des Typs GEV MP der Firma Vergnet (MEIR Green SRL, o.J., o.S.)

Neben einer durch diese Konstruktionsweise erzielten Kostenreduktion für die Installation, besteht bei dieser Variante die Möglichkeit die ganze Windturbine bei kritischen Windverhältnissen, wie sie zeitweise auf Karibikinseln durch einen Hurrikan bestehen, auf den Boden umzulegen (Interview Overpelt & Vales).

3.2.2.2 Netzparallelbetrieb

Beim klassischen Netz- oder Verbundbetrieb speisen hauptsächlich große und leistungsstarke Windkraftanlagen oder Windparks ihre Energie in das öffentliche Verteilernetz ein. Das frequenzstarre stabile Verbundnetz ist unempfindlich gegenüber zeitweise erhöhten Stromentnahmen einzelner Verbraucher und ermöglicht folglich daher eine suffiziente

Versorgung ganzer Landstriche. In den 1980er und 90er Jahren haben landwirtschaftliche Betriebe und Haushalte, sowie kleine Gewerbebetriebe und Gemeinden in Europa, begonnen ihre eignen dezentralen Windkraftanlagen aufzustellen und an das Netz anzuschließen. Die Drehzahl der Windkraftanlage wurde, um das Netz im sogenannten Netzparallelbetrieb zu unterstützen, an die Verbundnetzfrequenz ohne aufwendige Regelungstechnik, angepasst. Staatliche Förderungen und vor allem Einspeisevergütungen führten in dieser Marktnische, in Ländern wie Dänemark, (Hau, 2016; Heier, 2018), Italien und dem Vereinigten Königreich, über Jahre zu beträchtlichen Zuwachsraten. Durch eine weitgehend vollständige Möglichkeit der Netzeinspeisung in Europa, von wenigen seltenen Ausnahmen abgesehen, steht der Implementierung mittelgroßer Windkraftanlagen in die nachhaltige Stromgewinnung, unter der Voraussetzung - es gibt lukrative Einspeisetarife, eine unproblematische Standortwahl und für den Betrieb geeignete Windbedingungen, nichts im Weg. Das in Abbildung 14 dargestellte Konzept zeigt die vereinfachte Funktionsweise eines Netzparallelbetriebs. Dabei ist das Stromnetz und der lokale Verbraucher in einer Parallelschaltung mit der Windturbine verbunden. In Europa werden mittelgroße Windkraftanlagen häufig im Rahmen dieser Betriebsform installiert. Die günstigen Energiepreise fossiler Energieproduktion der letzten 20 Jahre, haben die Nachfrage von Investoren und Unternehmen verringert (Interview Guschewski).

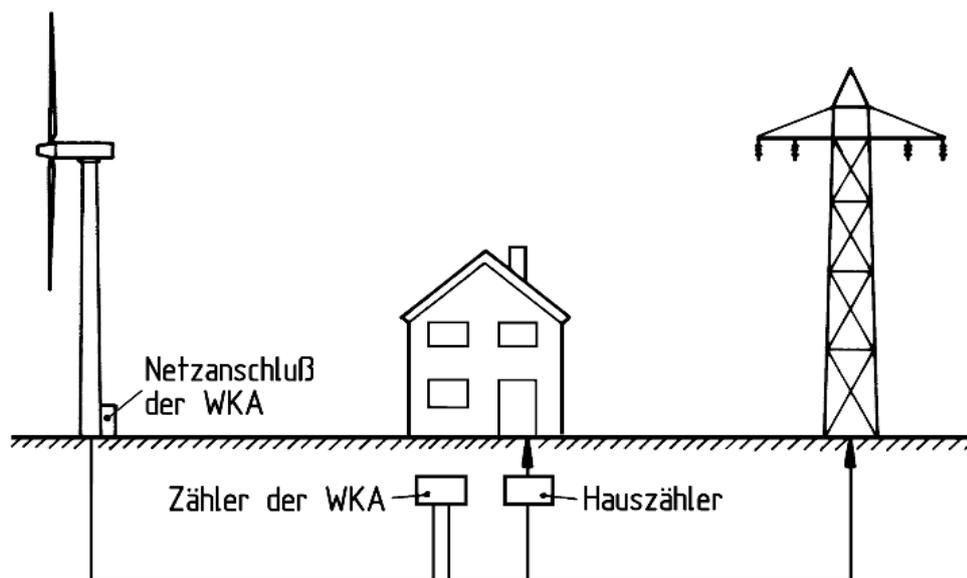


Abbildung 14: Windkraftanlage (WKA) im Netzparallelbetrieb (Hau, 2016, S722)

3.2.3 Herstellungsprozess

Unternehmen, die auf mittelgroße Windkraftanlagen spezialisiert sind, lassen Hauptkomponenten wie den Turm, zum Teil die Rotorblätter oder auch die Gondel von externen Zulieferunternehmen anfertigen. Im Anschluss werden die Einzelkomponenten in eigenen Fabriken zusammengesetzt, danach zum Standort des Kunden transportiert und

abschließend installiert. Die meisten Hersteller werben mit einer Lebensdauer von über 20 Jahren und bieten Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten über die geplante Nutzungsdauer an. Für die benötigten Genehmigungen und Planungen von Projekten werden Know-How und Unterstützung sowohl im Inland als auch über lokale Partnerunternehmen im Ausland, aufgrund der oft gänzlich anderen Rechtslage, angeboten (Interview Guschewski, Overpelt & Vales).

Besonders wichtig beim Vertrieb von Windkraftanlagen ist im Allgemeinen eine korrekte Zertifizierung, die überprüft, ob die geplanten und vorgegebenen Richtwerte des Anlagenkonzeptes auch der Realität entsprechen. Der Zertifizierungsprozess findet bereits während der Designphase statt, wobei Kalkulationen technischer Daten mit Hilfe von Prototypen und Sensoren gemacht werden. Ohne eine sichere Zertifizierung, die erste Priorität für potentielle Käufer hat, werden Banken und Investoren eine Finanzierung nicht unterstützen (Interview Vales). Prüfungs- und Klassifizierungsverfahren für Windkraftanlagen aller Art, richten sich international nach den Vorgaben der International Electrotechnical Commission (IEC), welche im Rahmen ihrer IEC14600-Richtlinien Standards für sämtliche Bereiche wie Sicherheit, Performance, Lärm, Belastungen, Qualität usw. vorgeben. Zertifizierungsgesellschaften wie beispielsweise Det Norske Veritas (DNV) ergänzen zusätzlich noch nationale Anforderungen bei ihren Prüfungszeugnissen, da wie bei allen rechtlichen Vorgaben je nach Land auch hier gewisse Abweichungen zu beachten sind (Hau, 2016).

Die Entwicklung und Zertifizierung neuer Windkraftanlagen ist sehr kostenintensiv und braucht Zeit bis die Verlässlichkeit und Sicherheit eines technisch so komplexen Produktes versichert/bestätigt werden kann. Daher ist der Einstieg in den bereits bestehenden kleinen Markt, der mittelgroßen Windkraftanlagen, riskant und schwierig, sofern noch keine Erfahrung mit dem Bau von Windkraftanlagen vorliegt. Das Unternehmen Wind Energy Solution BV hat beispielsweise begonnen eigene Windkraftanlagen zu produzieren, erst als sie die Möglichkeit bekamen, das Patent einer erprobten und bereits im Einsatz befindlichen Windtechnologie im Jahre 2001/2002, zu erwerben. Dadurch konnten sie, schon für die erste verkaufte Anlage, eine Nutzungsdauer von 20 Jahren und empirisch gesicherte technische Leistungsdaten, im Rahmen der Produktgewährleistung, angeben. Dennoch ist die technische Konstruktionsweise nach heutigen Standards nicht mehr "State of the art", wie beispielsweise an den zwei Rotorblättern, siehe Abbildung 11, und dem Getriebe zu erkennen ist. Um konkurrenzfähig zu bleiben, müssen die Windkraftanlagen ständig mit aktuellen elektronischen Bauelementen, wie moderne Umrichter, Kontrollsysteme und weiteren technischen Komponenten zur Optimierung, aus jüngsten Entwicklungen nachgerüstet werden (Interview Overpelt).

3.3 Positionierung von mittelgroßen Windkraftanlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Rahmenbedingungen für das Installieren einer mittelgroßen Windkraftanlage beschrieben.

3.3.1 Standortwahl

Die Windverhältnisse bei mittelgroßen Windkraftanlagen sind, wie bei allen Windanlagen, der entscheidende Faktor für die Produktivität, die Wirtschaftlichkeit und die mechanische Belastung von Konstruktion und Material. Mit dem Ziel, den für die zu erwartenden lokalen Windverhältnisse am besten geeigneten Windkraftanlagentyp etwas einfacher bestimmen zu können, entwickelte man, im Rahmen der IEC 61400-1 Klassifizierung, eine Unterteilung in drei „Wind Turbine Generator System Classes“, kurz WTGS Classes. Für kleine und Offshore Windenergieanlagen ist eine separate Klassifizierung anzuwenden (IEC 61400-2; IEC 61400-3-1). Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, definieren sich die Windklassen aus drei Faktoren, der mittleren Windgeschwindigkeit gemessen über zehn Minuten, der Turbulenzintensität und der Referenzwindgeschwindigkeit. „Diese ist die maximale Windgeschwindigkeit, die statistisch gesehen in 50 Jahren nur einmal überschritten wird und als zehnmütiger Mittelwert gemessen wird. Davon abgeleitet werden die kurzzeitigen Extremwindgeschwindigkeiten in einem 3 Sekunden Zeitraum, also die maximal zu erwartenden Böen“ (Hau, 2016, S209). Die Turbulenzintensität, die in Prozenten angegeben wird, ist das Maß für die Windgeschwindigkeitsänderungen an einem Standort im Intervall von 10 Minuten. Windanlagen der Klasse S sind für besonders hohe Belastungen konzipiert, wie beispielsweise Offshore-Windkraftanlagen, deren Kennwerte individuell mit der Zertifizierungsgesellschaft abgeklärt werden müssen (Hau, 2016).

Windkraftanlagen-Klasse		I	II	III	S
Referenzwindgeschwindigkeit	v_{ref} (m/s)	50,0	42,5	37,5	vom Hersteller
Turbulenzintensität I_{ref}	A hoch	0,16	0,16	0,16	zu definieren
	B mittel	0,14	0,14	0,14	z. B. Offshore
	C niedrig	0,12	0,12	0,12	
Mittl. Windgeschwindigkeit	v_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5	

Abbildung 15: Klassifizierung von Windkraftanlagen je nach Windbedingung (Hau, 2016, S210)

Bei den WTGS-Classes werden mittelgroße Windkraftanlagen als Kategorie II eingestuft. Dabei befinden sie sich in der Beschreibung zwischen Stark- und Schwachwindkraftanlagen.

Mittelgroße Windkraftanlagen unterscheiden sich, im Vergleich zu großen Onshore-Anlagen, weder in der Klassifizierungsmethode noch bei den Windgeschwindigkeitsgrenzwerten wesentlich. Die den Einsatz limitierenden Windgeschwindigkeiten sollten sich, zwischen 3-4 m/s um Strom erzeugen zu können und maximal 25 m/s aus Sicherheitsgründen, bewegen. Ab einer konstanten Windgeschwindigkeit von 6 m/s beginnt der optimale Bereich für eine wirtschaftliche Nutzung mittelgroßer Windkraft (Interview Guschewski & Vales). Beim Vergleichen der Leistungskennlinien der für diese Arbeit verwendeten Referenzanlagen, wird die Nennleistung bei einer Windgeschwindigkeit von 16 m/s erreicht.

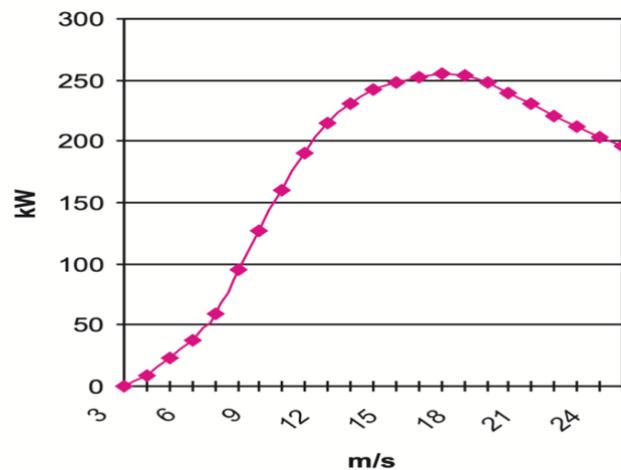


Abbildung 16: Verhalten von Leistung zu Windstärke der Anlage WTN250 (Wind Technik Nord, o.J.-a, S3)

Dabei ist in Abbildung 16 und 17 der unterschiedliche Kurvenverlauf der WTN250 Windturbinen mit Stall-Regelung im Vergleich zu der WES250 Windkraftanlage mit Pitch-Regelung (gleicher Kurvenverlauf ergibt sich sowohl für die ebenfalls Pitch geregelten GEV MP 200-275 Modelle der Firma Vergnet) gut erkennbar (Vergnet Wind Turbines, o.J.; Wind Energy Solution BV, o.J.; Wind Technik Nord, o.J.-a).

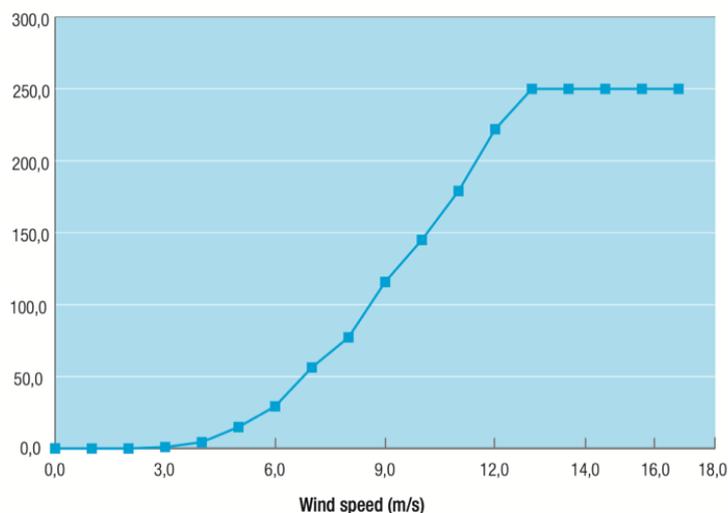


Abbildung 17: Verhalten von Leistung zu Windstärke der Anlage WES250 (Wind Energy Solution BV, o.J., S2)

Eine aktive Stall-Regelung wird bei einem Rotordurchmesser von über 60 m nicht mehr verwendet, da das ständige Stabilisieren der Nennleistung, für die Netzsynchrosation Schwierigkeiten bereitet. Um diesem Problem entgegenzuwirken, hat die Firma Wind Technik Nord GmbH ihre Anlage optimiert. Ihr neues WTN250i Modell wurde mit einem Vollumrichter ausgestattet, der mechanische Teile der Anlage bei Bedarf, vollständig vom Netz trennen kann. Dieser bewirkt eine Drehzahlvariabilität und einen flexibleren Betrieb durch eine verbesserte Netzverträglichkeit (Wind Technik Nord, o.J.-b; Winkelmeier, 2017, S3).

3.3.1.1 Abweichungen der Leistungskennlinie

Die Leistung, welche eine zertifizierte Windkraftanlage laut Hersteller liefern kann, beruht auf Messungen nach IEC 61400 Standards. Da der Rotor bei diesem Testverfahren mit idealen Windverhältnissen, die jedoch nach Standort der Windkraftanlage im Realbetrieb deutlich variieren können, angeströmt wird, bilden die dabei gewonnen Messergebnisse nur eingeschränkt die im späteren Praxisbetrieb erzielten Werte ab. Für die Planung eines Windkraftprojektes muss ein besonderes Augenmerk auf die lokalen Standortgegebenheiten gelegt werden, um nicht später von insuffizienten Energieoutputs überrascht zu werden. Der Aufstellort der Windkraftanlage hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Belastung und damit konsequenterweise, auch auf die Lebensdauer der Rotorblätter.

Die Seehöhe, auf welcher die Windkraftanlage positioniert ist, hat einen gravierenden Einfluss auf die Leistungskennlinie. Aus der im Kapitel 1.1.2 angeführten Formel (7) ist die Abhängigkeit der Windkraftleistung von der Luftdichte dargestellt. Sie erklärt den deutlichen Abfall der Leistung in großen Höhen (direkte Proportionalität). Gleichzeitig führen jedoch die deutlich erhöhten Windgeschwindigkeiten und konstanteren Windverhältnisse zu einer Steigerung der Energieausbeute. Zusätzlich wirken sich die reduzierten Belastungen durch Staub und Insekten positiv auf den Materialverschleiß der Rotorblätter aus (Hau, 2016).

3.3.1.2 Turbulenzen als großes Problem mittelgroßer Windkraftanlagen

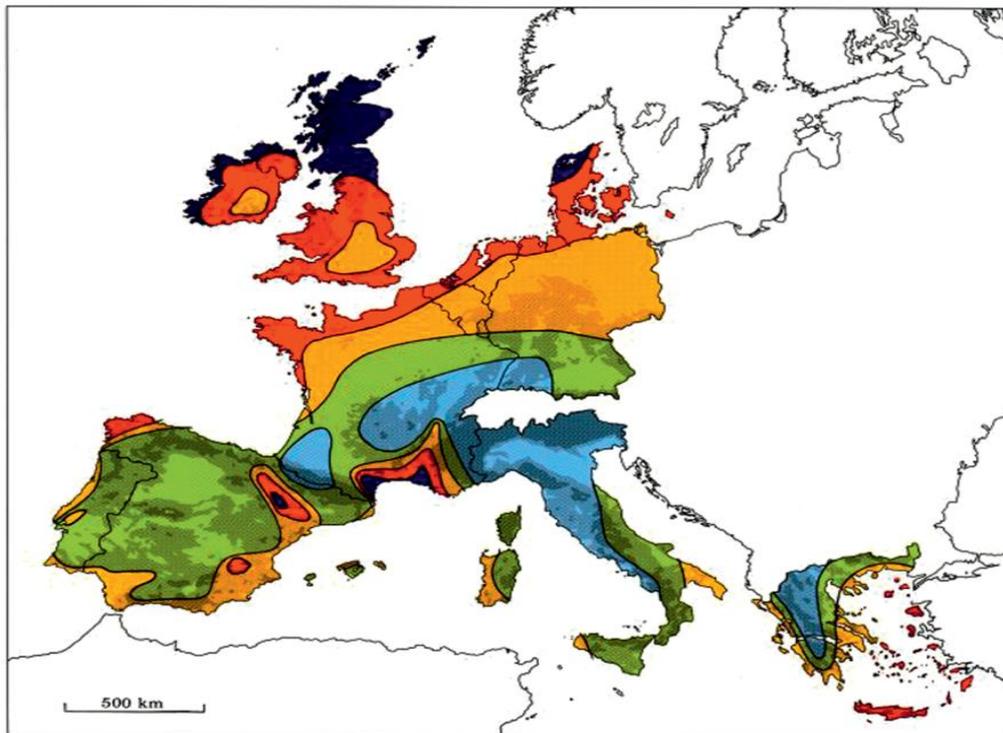
Im Einführungsteil wurden komplexe Geländestrukturen beschrieben, die gute Voraussetzungen für die Erzeugung von Strom durch Windenergie haben. Dabei wurden exponierte Anhöhen, Küstenregionen, oder Geländeformationen, die beispielsweise einen Tunneleffekt erzeugen, wodurch ein kontinuierlicher in die gleiche Richtung strömender Wind entsteht, erwähnt. Mittelgroße Windkraftanlagen nutzen solche Gegebenheiten vor allem auf Inseln, denn am europäischen Festland bereiten Turbulenzen aufgrund der geringeren Turmhöhen von bis zu 50 m Probleme. Häuser aber auch Bäume verursachen ungünstige Windturbulenzen, die sich als Gewinneinbuße aufgrund von gesteigerten

Instandhaltungskosten in der wirtschaftlichen Kalkulation negativ bemerkbar machen. Kleine und mittelgroße Windkraftanlagen sind in der Regel viel stärkeren und häufigeren Turbulenzen ausgesetzt und die damit verbundene Materialabnutzung ist im Vergleich zum Betriebskonzept der ausschließlich für die Netzversorgung konzipierten Windkraftanlagen ein großer wirtschaftlicher Nachteil. Architektonisch flacher gestaltete Gebäude sowie das Fehlen von sonstigen Hindernissen führen zu Vermeidung von Verwirbelungen der Luft aufgrund von Strömungsabrissen (Interview Guschewski & Vales). Eine optimale Projektplanung von mittelgroßen Windkraftanlagen auf beispielsweise landwirtschaftlichen Grundstücken berücksichtigt die Größe der Windkraftanlage und deren Ausrichtung, umliegende Häuser, Lagerhallen, Bauernhöfe oder Ställe, um bestmögliche Windverhältnisse zu gewährleisten. (Interview Overpelt).

3.3.1.3 Windatlas als Indikator für geografische Marktverteilung mittelgroßer Windkraftanlagen in Europa

Die Windgeschwindigkeit ist der entscheidende Faktor für die Wirtschaftlichkeit einer Windkraftanlage. Die Nutzleistung steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit, siehe Kapitel 1.1.2. Klima und Topografie sind ausschlaggebend für die durchschnittliche Windgeschwindigkeit an einem Standort. In Abbildung 18 zeigen ein Windatlas aus dem Jahr 1989 die regional unterschiedlichen Jahresdurchschnittswindgeschwindigkeiten in 50 m Höhe in Abhängigkeit von den topografischen Verhältnissen und die damit zu erzielenden Windkraftanlagenleistungen. Obwohl mittelgroße Windkraftanlagen in der Regel sich in einer Höhe von um die 50 m bewegen, gibt der Windatlas nur einen groben geographischen Überblick und hat daher keinen Einfluss auf konkrete Standortbestimmungen bei der Projektplanung (Hau, 2016).

Die Hersteller mittelgroßer Windkraftanlagen aus den Interviews gaben an, Windkraftprojekte in nördlichen Teilen Deutschlands, Süditalien, den Niederlanden, Belgien, Dänemark, Griechenland und dem Vereinigten Königreich zu haben. Nach den Daten aus dem Windatlas ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in den zuvor genannten Regionen zwischen 5,5 und 7,5 m/s im offenen Gelände. Ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb einer mittelgroßen Windkraftanlage benötigt, gemäß den interviewten Herstellern, Windgeschwindigkeiten ab ungefähr 6 m/s (Interview Guschewski, Overpelt & Vales). Aus den für einen wirtschaftlich effizienten Betrieb erforderlichen Windgeschwindigkeiten, verbunden mit regional ungünstigen lokalen Förderungen und Genehmigungsbestimmungen, leitet sich der eingeschränkte Markt für mittelgroße Windkraft ab.



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Abbildung 18: Windverhältnisse in Europa 50 m über dem Boden (Hau, 2016, S569)

Trotz großem Potenzial im Hinblick auf die Windgeschwindigkeiten wird der Ausbau von Windkraft in Frankreich, wie kaum in einem anderen Land der Europäischen Union, durch Bürgerbewegungen boykottiert und gerichtlich entschieden. Windkrafthersteller wie die Firma Vergnet klagen über rechtliche Rahmenbedingungen, die unverhältnismäßig aufwendig sind. Der Genehmigungsprozess für mittelgroße Anlagen ist kompliziert und überaus langwierig (Interview Vales; Meister, 2021).

In Bezug auf Österreich ist das Windpotenzial für Windkraftanlagen, laut einer Windpotenzialstudie aus dem Jahr 2011, unter 50 m auf den Nordosten des Landes beschränkt. In den Regionen rund um Wien und dem Burgenland gibt es Jahresdurchschnittswindgeschwindigkeiten von über 6 m/s (Research Studio iSPACE, 2011).

3.3.2 Vereinfachungen im Genehmigungsprozess

Windkraftanlagen mit einer Gesamthöhe unter 50 m müssen sich in Deutschland keinem Genehmigungsverfahren für die Einhaltung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) unterziehen. Da keine umfangreiche Umweltverträglichkeitsprüfung, im Rahmen des BImSch-Gesetzes durchgeführt werden muss, sind eine Vielzahl von unterschiedlichsten

amtlichen Evaluierungsverfahren und Erhebungen, wie beispielsweise die Erstellung eines landschaftspflegerischen Begleitplanes oder die Bereitstellung von naturräumlichen und archäologischen Gutachten, nicht mehr notwendig (Hau, 2016).

Dies vereinfacht und beschleunigt die Projektentwicklung, da nur eine Baugenehmigung einzuholen ist. Der Bauantrag muss folgende Dokumente beinhalten:

- Lageplan mit Kennzeichnung des Anlagenstandortes
- Alle rechtsgültigen technischen Konstruktionspläne mit genauer Beschreibung der geplanten Durchführung des Bauvorhabens
- Statische Berechnungen, welche die Standsicherheit des Turmes und des Fundamentes bestätigen
- Technisches Gutachten für mechanische Komponenten der Windkraftanlage
- Stellungnahme zur Geräuschentwicklung und Bestätigung sicherheitstechnischer Teile
- Umweltverträglichkeitsgutachten

Die erforderlichen einzureichenden Dokumente, sowie deren Umfang, unterscheiden sich im Detail je nach Bundesland (Hau, 2016). Wegen dieser Uneinheitlichkeit im Genehmigungsprozess verweisen Windkraftanlagenhersteller auf lokale Partnerfirmen, welche die Projektplanung übernehmen. Belgien zum Beispiel hat strenge Vorschriften und verlangt gründliche Untersuchungen in Bezug auf Schallemissionen, Schattenwurf und Flora-Fauna-Analysen der Umgebung. In den benachbarten Niederlanden sind die Auflagen für mittelgroße Windkraftanlagen, laut Overpelt, je nach Region unterschiedlich. In manchen Teilen des Landes ist der Umfang und die Genauigkeit der Gutachten kleiner und erleichtert damit die Projektentwicklung für den Kunden. Die notwendigen Dokumente für eine Genehmigung müssen aber überall ordnungsgemäß eingereicht werden. Mittelgroße Windkraftproduzenten vertreiben ihre Anlagen zudem europa- beziehungsweise weltweit, da die Nachfrage und das Interesse von den regional aktuellen Einspeisetarifen und Energiekosten abhängt (Interview Overpelt).

Große Windkraftanlagen die höher als 100 m sind, unterliegen aufgrund von regionalen Raumordnungsplänen, schärferen Abstandsregelungen zu Gebäuden und Straßen als mittelgroße Bauvorhaben. Windkraftanlagen die kleiner als 100 m sind, siehe Tabelle 2, können auf Flächen installiert werden, die ansonsten möglicherweise energietechnisch ungenutzt bleiben müssten. Im Allgemeinen ähneln die rechtlichen Bestimmungen einem Flickenteppich aus Gesetzen und Verordnungen der sich nicht nur in verschiedenen Ländern, sondern noch zusätzlich in deren föderalen Aufteilungen, wie zum Beispiel in den einzelnen Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland unterscheidet (Hau, 2016).

Bis auf wenige weitere Länder, wie Italien und Norwegen, differenziert der Großteil an EU-Mitgliedsstaaten nicht bei den Abstandsregelungen zwischen großen oder mittelgroßen Windkraftanlagen (Dalla Longa et al., 2018, S47ff). In den österreichischen Bundesländern ist das Genehmigungsverfahren für Anlagen im mittelgroßen Leistungsbereich, genau wie für stärkere Anlagen, umständlich und kostspielig (Lackner, 2016, S10f).

Tabelle 2: Beispiel der Abstandvorgaben im deutschen Bundesland Schleswig-Holstein (Hau, 2016, S797)

Nutzungsart	Abstände für WKA mit Gesamthöhe $h < 100$ m (Runderlass 4.7.1995)	Abstände für WKA mit Gesamthöhe $h \geq 100$ m (25.11.2003)
Einzelhäuser und Siedlungssplitter	300 m	$3,5 \times h$
Ländliche Siedlungen	1000 m	$5 \times h$
Städtische Siedlungen, Ferienhausgebiete und Campingplätze	1000 m	$10 \times h$
Bundesautobahnen, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen sowie Schienenstrecken	ca. 50 m bis 100 m	i. d. R. $1 \times h$
Nationalparks, Naturschutzgebiete und sonstige Schutzgebiete	mind. 200 m, im Einzelfall bis 500 m	$(4 \times h) - 200$ m
Waldgebiete	200 m	i. d. R. 200 m
Gewässer 1. Ordnung und Gewässer mit Erholungsstreifen	mind. 50 m	$(1 \times h) - 50$ m

Ein in Deutschland wesentlicher Vorteil für die Zulassung einer mittelgroßen Windkraftanlage unter 50 m Gesamthöhe ist es, den Aufstellungsort freier wählen zu können. Mit der amtlichen Bauerlaubnis hat jeder Gewerbebetrieb oder Landwirt die Möglichkeit eine Windkraftanlage zur nachhaltigen Stromgewinnung auf seinem Grundstück aufzustellen und zu betreiben. Diese Bewilligungsverfahren dauern normalerweise nicht länger als 5 Monate. Die letzten Jahre zeigen, dass aufgrund der niedrigen Strompreise, trotz vereinfachter Genehmigungsaufgaben, der große Ansturm auf mittelgroße Windkraftanlagen in Deutschland ausgeblieben ist. Das Fehlen von politischen Initiativen zur Unterstützung dieser Vorhaben in Verbindung mit dem Umstand auf dem Energiemarkt wirtschaftlich nicht mithalten zu können, waren die Hauptgründe für diese Entwicklung (Interview Guschewski; Heidebrecht, 2019).

3.3.3 Beeinträchtigungen der unmittelbaren Umgebung durch mittelgroße Windkraftanlagen

Das Errichten einer Windkraftanlage oder eines Windparks stößt seit Beginn des kommerziellen Ausbaues der Windkraft immer häufiger auf gesellschaftliche Ablehnung. Bei der Projektentwicklung entstehen oft Konflikte mit den in der Umgebung wohnhaften Bürgern, deren Hauptsorge die Erhaltung des natürlichen Landschaftsbildes ist. Von allen Einflüssen,

die eine Windkraftanlage auf ihre Umwelt haben kann, ist die optische Erscheinung und Integration in die ebene Kulturlandschaft am stärksten zu bewerten (Hau, 2016).

Das schwedische „National Board of Energy“ hat versucht konkrete Aussagen über die menschliche Wahrnehmung von Windkraftanlagen zu machen. Windkraftanlagen deren Höhe 50 m nicht überschreiten haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Landschaftsbild und sind somit in vom Menschen besiedelten Gebieten aus der Entfernung betrachtet, visuell unauffällig (Hau, 2016). Gemäß dem Projektentwickler Overpelt, der für das niederländische Unternehmen WES, international Windkraftanlagen aufstellt, kommt es bei mittelgroßen Windkraftanlagen zu deutlich weniger Problemen in Bezug auf die Landschaftsprägung. Die Häufigkeit einer Beschwerde ist ungefähr zehnmal geringer als bei großen Windkraftanlagen, zudem gewöhnen sich Personen im Umfeld, aus Erfahrung des Experten schneller an die niedrigeren und leistungsschwächeren Windkraftanlagen (Interview Overpelt).

Weitere nennenswerte Unterschiede in Bezug auf Umwelteinflüsse sind nicht bekannt. Mittelgroße Windkraftanlagen müssen die gleichen sicherheitstechnischen Standards wie große Anlagen erfüllen und sich ebenso architektonisch in ihre Umgebung einfügen. Windkraftanlagen, die in einem Gewerbegebiet aufgestellt werden, haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf Schallemissionen und Schattenwurf, sofern die Anlage nicht zu nahe an private Haushalte gebaut und Grenzwerte überschritten werden (Interview Guschewski). Sollte es während des Betriebes, bedingt durch ungünstige Wetterverhältnisse, zeitweise zu sehr störenden Geräuscentwicklungen für Anrainer kommen, gibt es die Option durch technische Maßnahmen, wie zum Beispiel eine Änderung der Windkraftanlagenausrichtung, diese zu beheben. Wenn dieses Vorgehen nicht genügt, kann der Hersteller eine automatische Regelung vorsehen, die einen temporären Betriebsstop für diesen Fall auslöst (Interview Vales).

Bei Außentemperaturen von weniger als minus 20 Grad Celsius, wie sie in kalten Regionen Russlands auftreten können, kommt es zu gravierenden Materialschäden an der Windturbine. Trotz klimatisch günstigerer Verhältnisse in Mitteleuropa, darf das Thema Frost während der Winterperiode nicht unterschätzt werden, da es auch hier in der Folge zu Betriebsunterbrechungen kommen kann. Speziell in der Anlaufphase beim Starten, besteht ein erhöhtes Risiko für Mensch, Tier und Gebäude, von zuvor an den Rotorblättern haftenden und jetzt wegfliegenden Eisbrocken, getroffen zu werden. In der Praxis, wurden jedoch von landwirtschaftlichen Betrieben, die den größten Teil mittelgroßer Windkraftanlagenbetreiber darstellen, keine Vorfälle in dieser Hinsicht gemeldet (Interview Vales).

3.3.4 Förderungen

Die Einführung und marktwirtschaftliche Positionierung einer nachhaltig wirkenden Energietechnologie hängt maßgeblich von staatlichen Subventionen ab. Nur sie induzieren ein für die Energieproduktionstransformation notwendiges, größeres Interesse von Investoren. Mittelgroße und kleine Windkraftanlagen laufen in Europa in der Regel im Netzparallelbetrieb. Nachdem der Energiebedarf des Betreibers gedeckt ist, wird der überschüssig produzierte Strom in das angeschlossene Verteilernetz zum lokalen Vergütungstarif eingespeist. Dies trägt zu einer besseren Wirtschaftlichkeit der Windkraftanlage bei und erhöht gleichzeitig den Anteil an nachhaltig produzierter Energie im Netz. Die Nachfrage an kleinen und mittelgroßen Windkraftanlagen korreliert mit den von Land zu Land stark differierenden Einspeisetarifen und Förderungen (Interview Guschewski; RenewableUK, 2014, S7)

Ein gutes Beispiel dafür ist die Marktentwicklung von 2010 bis 2019 in Großbritannien. Das 2010 in Kraft getretene Feed-In Tarif Schema (FiT) ermöglichte es, Betreibern mittelgroßer Windkraftanlagen nach Deckung Ihres Eigenstrombedarfes, die verbleibende Menge an Energie zu sehr attraktiven Preisen ins Netz einzuspeisen. Zahlreiche Landwirte und größere Gewerbeunternehmen profitierten von den zusätzlichen Einnahmen, aus ihren Windkraftanlagen (RenewableUK, 2014, S7ff).

Tabelle 3: Vergleich der Einspeisevergütung für mittelgroße Windkraftanlagen im Vereinigten Königreich für ausgewählte Jahre (Tabelle wurde mit Hilfe der Informationen folgender Quellen in Microsoft Exel erstellt: Office of Gas and Electricity Markets, 2014, S2; Office of Gas and Electricity Markets, 2018, S2)

Einspeisevergütung im Vereinigten Königreich	
Windanlagen mit einer Leistung größer als 100kW und kleiner/gleich 500kW	
1 April 2010 - 30 November 2012	21,81 p/kWh
1 Dezember 2012 - 31 März 2014	18,53 p/kWh
1 April 2014 - 31 März 2015	14,82 p/kWh
Windanlagen mit einer Leistung größer als 100kW und kleiner/gleich 1,5MW	
1 Juli - 30 September 2018	1,92 p/kWh
1 Oktober - 31 Dezember 2018	1,91 p/kWh
1 Jänner - 31 März 2019	1,91 p/kWh

Die Folge dieser Fördermaßnahmen, war ein für Hersteller von Windkraftanlagen zunehmend größer werdender Absatzmarkt in Großbritannien. Das große Interesse an mittleren und kleineren Windanlagen fand 2014 mit der Anpassung des FiT Phase 2B sein Ende, nachdem die neuen Einspeisevergütungen um 25% gesenkt worden sind. Diese Reduktion hat sich, wie in Tabelle 3 zu sehen ist, über die weiteren Jahre fortgesetzt. Ähnlich war die Feed-In Entwicklung in Italien, was dazu geführt hat, dass die Zahl an neu errichteten Windkraftanlagen der mittleren Leistungsklasse, in den zuvor vielversprechenden Absatzmärkten drastisch abgenommen hat (Interview Guschewski; RenewableUK, 2014, S13).

In Deutschland regelt das Erneuerbare-Energie-Gesetz die Einspeisevergütung. Die Endvergütung im Onshore-Bereich ist von 6 Cent pro kWh im Jahr 2000 auf 4 Cent pro kWh gefallen. Seit der EEG-Novelle 2017 wird der Einspeisetarif in einem Ausschreibungsverfahren ermittelt (Heier, 2018), bei dem jedoch neu installierte Anlagen, mit einer Leistung kleiner als 751 kW, nicht teilnehmen können. Die Mehrzahl an mittelgroßen Windkraftanlagen sind seit Mai 2017 von dem EEG-Einspeisetarif ausgenommen und erhalten daher keine Unterstützung mehr beim Verkauf ihrer elektrischen Energie (Bundesnetzagentur, 2022). Trotz auslaufenden EEG-Förderprogrammen ist die geringe Nachfrage an eigenen mittelgroßen Windanlagen, primär den niedrigen Strompreisen der Vergangenheit geschuldet (Interview Guschewski).

Belgien unterstützt die Produktion von erneuerbarer Energie, durch die Vergabe von Grünstromzertifikaten. Versorgungsunternehmen sind verpflichtet einen gewissen Anteil an Grünstrom in ihrem Energiemix zu haben. Der Wert der Grünstromzertifikate wird am Energiemarkt ausgehandelt und fördert Windkraftanlagen dahingehend, dass bei Verhandlungen um den Einspeisetarif, Stromanbieter eine Art Druckmittel durch die rechtliche Vorgabe des Grünstromanteils haben. In Flandern, einer großen Region Belgiens, werden seit 2013 neu installierte Windkraftanlagen mit einer Leistung zwischen 10 und 300 kW durch eine Investitionsförderung von bis zu 70% unterstützt. Belgien hat zwar strenge Genehmigungsverfahren im Vergleich zu anderen Ländern in Europa (Nagel et al., 2020, S19ff), fördert jedoch in Teilen des Landes mittelgroße Windkraft direkt. Auch Dänemark und die Niederlande sehen den Ausbau mittelgroßer Windkraftanlagen positiv (Interview Overpelt) In Europa gibt es keine einheitlichen Förderprogramme für die Marktnische mittelgroßer Windkraftanlagen.

3.4 Hauptanreize für den Bau einer mittelgroßen Windkraftanlage

Nachdem ein optimaler Standort mit ausreichend Wind gefunden und die erforderliche Baugenehmigung erteilt wurde, sämtliche eventuell auftretende Probleme in Bezug auf Umwelteinflüsse gelöst sind und eine Förderung vorhanden ist, steht einer Projektdurchführung nichts mehr im Weg. Im folgenden Kapitel werden die Anreize angeführt, die ein Investment und Betrieb einer mittelgroßen Windkraftanlage begünstigen.

3.4.1 Entwicklung der Energiekosten in Europa

Für Hersteller dieser spezifischen Windanlagengröße, stellen in erster Linie landwirtschaftliche Betriebe und kleine Gewerbeunternehmen, die das Ziel haben ihren Strombedarf selbständig und günstig zu produzieren, das größte Kundenpotential dar. Dabei ist die zu erwartende Energiekosteneinsparung das wichtigste Argument für den Kauf einer mittelgroßen Windkraftanlage. Das bis dato gravierendste Hauptproblem der Hersteller für den Verkauf von mittelgroßen Windkraftanlagen war der im Vergleich zu den eigenen Herstellungskosten konkurrenzlos niedrige Strompreis in den Verbundnetzen Europas (Interview Guschewski & Overpelt). Der Preis für Elektrizität ist in jedem der 27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union unterschiedlich und hängt von mehreren Aspekten ab. „Dazu gehören die geopolitische Lage, der nationale Energiemix, die Diversifizierung der Einfuhren, Netzkosten, Umweltschutzkosten, extreme Witterungsbedingungen und die Höhe der Verbrauchsteuern und Abgaben“ (Eurostat, 2018, o.S.).

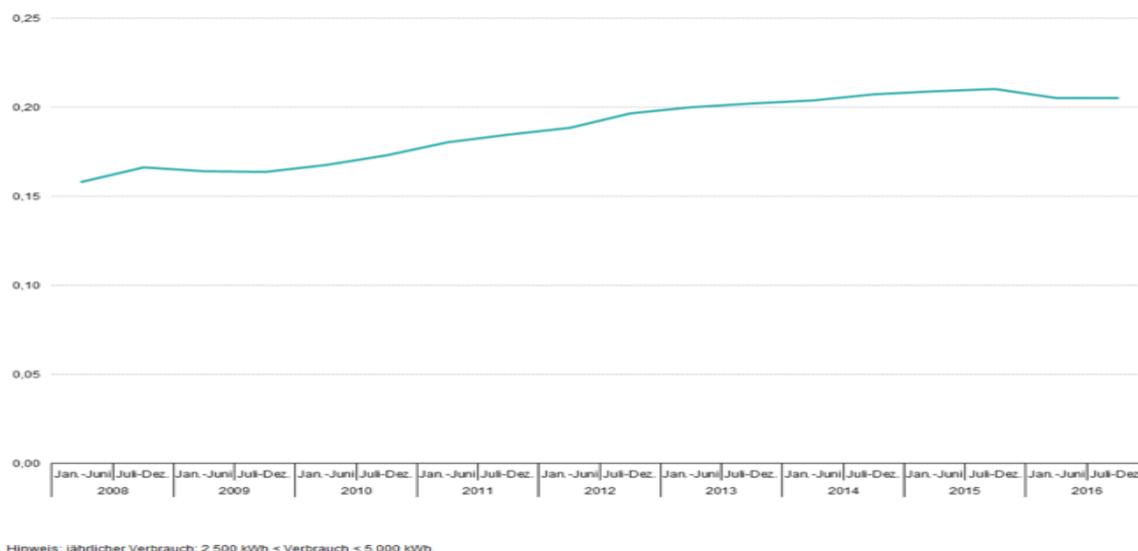


Abbildung 19: Entwicklung des Strompreises (Euro pro kWh) für Haushalte mit einem jährlichen Verbrauch zwischen 2500 und 5000 kWh (Eurostat, 2018, o.S.)

Der Strompreis ist für Industriekunden niedriger als für private Haushalte, da diese einen Energiebedarf im mehrstelligen Megawatt Bereich haben. Zusätzlich war im Zeitraum von 2008-2016 der jährliche Anstieg pro kWh Strom für den Privatverbraucher, siehe Abbildung 19 und 20, ungefähr doppelt so hoch, wobei die gesamte Preisentwicklung aus heutiger Sicht sehr moderat erscheint (Eurostat, 2018).

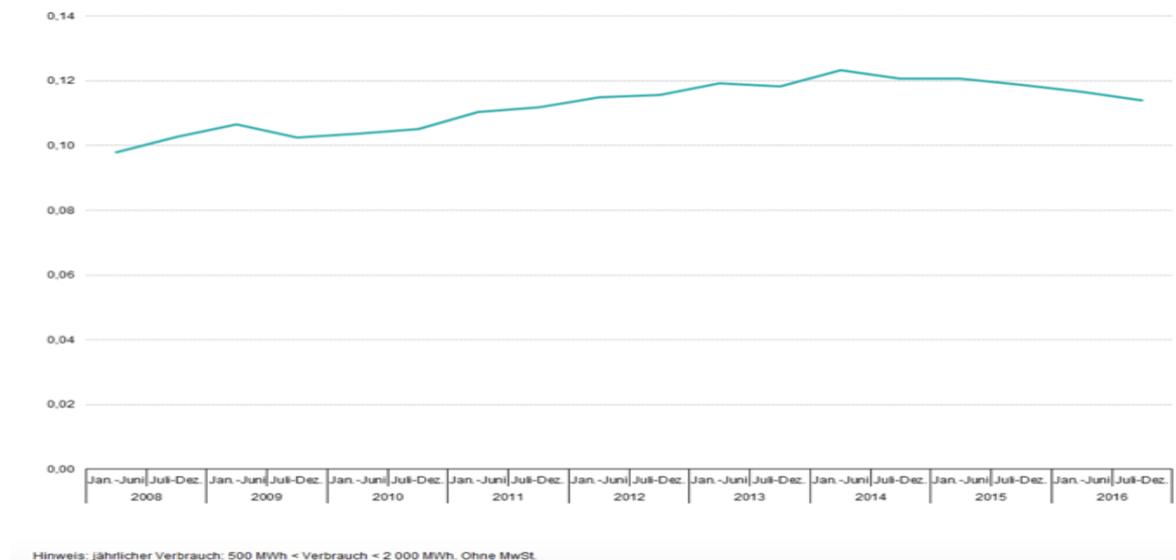


Abbildung 20: Entwicklung des Strompreises (Euro pro kWh) für Industrie mit einem jährlichen Verbrauch zwischen 500 und 2000 MWh (Eurostat, 2018, o.S)

Im Zusammenhang mit mittelgroßen Windkraftanlagen werden sich weitere Beobachtungen auf die Preisstruktur von Industrie- und Gewerbekunden fokussieren.

In den Energiestatistiken von Eurostat, einer Verwaltungseinheit der Europäische Union, waren 2016 die Spitzenreiter bei den elektrischen Energiekosten – in Cent pro kWh – Staaten wie Deutschland (14,9), Italien (15,6), Vereinigtes Königreich (12,8), Belgien (11,6) gefolgt von Dänemark und den Niederlanden. Der relativ hohe Preis für Industriestrom in diesen Ländern, setzt sich aus den Energieversorgungs- und Netzkosten sowie den nicht abzugsfähigen Steuern und Abgaben, die 25 bis 50 Prozent des Preises ausmachen, zusammen (Eurostat, 2018). In den darauffolgenden 5 Jahren hat sich der Strompreis im Ländervergleich nicht nennenswert verändert. Die dramatischen Entwicklungen im Hinblick auf den Klimawandel und die Ressourcenknappheit fossiler Energieträger, sowie die bedrohliche geopolitische Lage infolge des Ukrainekrieges, verteuert aktuell die elektrische Energie in Europa massiv. Die Bundesrepublik Deutschland ist von den hohen Stromkosten besonders betroffen, sodass hier versucht wird, durch Absenken der EEG-Umlage den Preis zu reduzieren (Zinke, 2022). Für Windkrafthersteller wie das deutsche Unternehmen Wind Technik Nord GmbH ist diese Preisexplosion eine positive Entwicklung, da die Nachfrage nach finanzieller Sicherheit durch mittelgroße Windkraftanlagen in ihrer Heimat seit langem nicht mehr so hoch war (Interview Guschewski).

3.4.2 Wirtschaftlichkeit

In Abbildung 21 sind für jedes einzelne EU-Land drei verschiedene Preisbereiche je Verbrauchergruppen des ersten Halbjahres 2020 dargestellt, wobei es sich hier um die Strompreiskategorisierung für Industrie und Gewerbe handelt (Schmitz et al., 2020, S14).

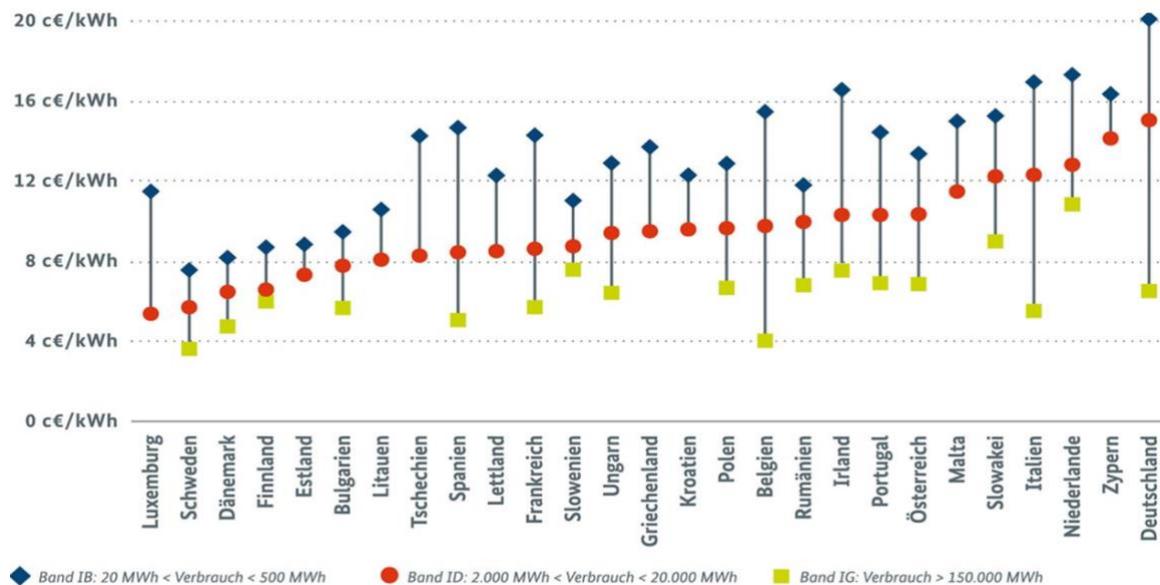


Abbildung 21: Strompreisunterschiede für Gewerbe und Industrie in EU-Ländern (Schmitz et al., 2020, S14)

Ein Stromabnehmer der im Jahr einen Verbrauch von 20 bis 2000 Megawattstunden aufweist, bezieht seinen Preis aus den in der Abbildung Blau verlaufenden Linien – Abnahmeband-IB und IC. In diesen unteren Stufen der Verbraucherklasse – kleinere Industrieunternehmen und Gewerbekunden, darunter fallen auch Landwirte – ist die kWh am teuersten. Dies kann eine Bedrohung der Wettbewerbsfähigkeit für Industriezweige, basierend auf steigenden Energiekosten sein (Schmitz et al., 2020, S14). Im Gespräch mit Herstellern mittelgroßer Windkraftanlagen, zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Nachfrage an mittelgroßen Windkraftanlagen und hohen Strompreisen im Netz. Länder wie Deutschland, Niederlande, Italien und Belgien sind gute Beispiele dafür (Interview Guschewski, Overpelt & Vales).

Die mittelgroßen Windkraftanlagen, welche in dieser Arbeit angeführt und verglichen wurden, haben eine Nennleistung von ca. 250 kW. Als Beispiel wird die Windkraftanlage WES250 der niederländischen Firma Wind Energy Solutions BV ausgewählt, die bei einer Jahreswindgeschwindigkeit von 5,5 m/s einen Ertrag von 372 Megawattstunden liefert. Stärkere Windverhältnisse steigern die Leistung der unter 50 m großen Windkraftmodelle deutlich - es kommt zu einem linearen Anstieg der Leistung in Abhängigkeit von der Jahreswindgeschwindigkeit, siehe Abbildung 22 (Wind Energy Solution BV, o.J.).

Mit höheren Onshore-Durchschnittswindgeschwindigkeiten von über 7,5 m/s ist in Europa, außerhalb von Küstenregionen und Hügelketten nicht zu rechnen, vergleiche Kapitel 3.3.1.3 (Hau, 2016).

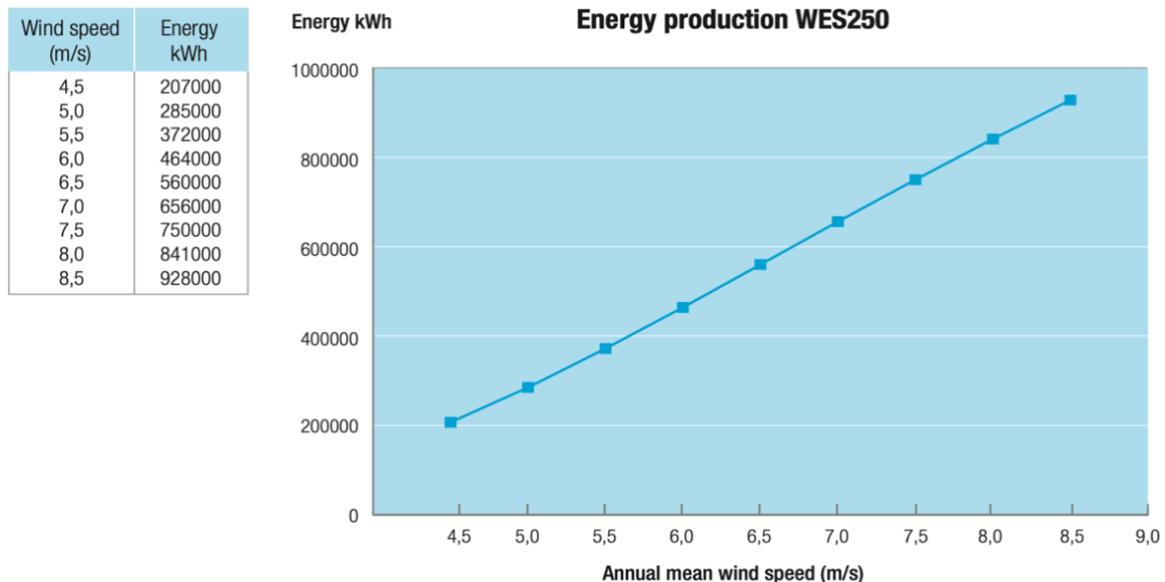


Abbildung 22: Jährlicher Stromertrag einer WES250 Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Durchschnittswindgeschwindigkeiten (Wind Energy Solution BV, o.J., S2)

Ein Betreiber der WES250 Windkraftanlage könnte daher einen Strombedarf von ungefähr 500 Megawattstunden haben und damit einen Großteil seines Verbrauches durch die Windturbine decken. Ein vergleichbares Szenario trifft auf ein Projekt in Belgien zu. Dabei soll eine mittelgroße Windkraftanlage die Versorgung einer Zementfabrik unterstützen und zwischen 60 bis 80 Prozent des für den Betrieb benötigten Stroms liefern (Interview Overpelt).

Mit ähnlichen Zahlen hat das deutsche Energieversorgungsunternehmen E.ON 2019 die mittelgroße Windkraftanlage E.ON Windrad 250 auf den Markt gebracht. Diese 250 kW starke Windturbine ist für kommunale Unternehmen wie Abwasserreinigungsanlagen oder große landwirtschaftliche Betriebe mit einem jährlichen Verbrauch von um die 500 Megawattstunden gedacht. Sie spart Energiekosten ein und ermöglicht gleichzeitig vorhandene Betriebsflächen wirtschaftlich zu nutzen (Heidebrecht, 2019). Nach Abbildung 21 müsste das zuvor erwähnte Zementwerk in Belgien für seinen Verbrauch 2020 im Abnahme Band IB im Netz einen Preis zwischen 16 und 12 Cent pro kWh bezahlt haben. Abgesehen von dem Einspeisetarif für überproduzierte Energie und sonstigen Förderungen ist aus ökonomischer Perspektive die Energiekostendifferenz zwischen dem Verbundnetzpreis und dem Preis, zu dem die eigene Windkraftanlage Strom produziert, ein entscheidender Faktor für die Projektumsetzung. Diese Kalkulation muss für jedes Projekt individuell aufgestellt werden (Interview Overpelt & Vales).

Um die Kosten der Energieproduktion einer Windkraftanlage berechnen zu können, müssen verschiedene Parameter in Bezug auf den Standort – hauptsächlich Windbedingungen - und die Betriebsdauer festgelegt werden. Genaue Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind kundenspezifisch, daher können hier keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden. Mittelgroße Windkraftprojekte werden in der Regel bei einem Return on Investment von 10 bis 12 Jahren durchgeführt (Interview Guschewski). Der Gesamtkostenaufwand einer mittelgroßen Windkraftanlagen liegt ab 0,5 Million Euro aufwärts (Hau, 2016).

3.4.3 Gesellschaftliche Aspekte

Das Hauptmotiv für den Kauf einer mittelgroßen Windanlage basiert auf rein ökonomischen Überlegungen. Hohe betriebliche Stromkosten und/oder ein lukrativer Einspeisetarif haben im tatsächlichen Investitionsentscheidungsprozess ein deutlich stärkeres Gewicht als jegliche Anreize in Bezug auf Energieautarkie und Klimaschutz. Eine Gemeinde oder Unternehmen, sei es ein Landwirt oder ein kleiner Industriebetrieb, wird sich vorerst mit der Frage beschäftigen, welche natürlichen Ressourcen am effizientesten genutzt werden können. Unabhängig von lokalen Standortbedingungen für die nachhaltige Energiegewinnung, bestimmen in der Praxis die wirtschaftlichen Aspekte, die Entscheidung woher der Strom kommt (Interview Vales).

Eine eigene Windkraftanlage, die bereits bei kleineren Typen aus relativ großer Distanz sichtbar wird, ist ein Symbol für nachhaltiges und umweltbewusstes Wirtschaften. Das Image ein Teil des nachhaltigen Energietransformationsprozesses zu sein, ist ein sehr erstrebenswertes Marketingziel von Unternehmen. Daher werden Windkrafthersteller auch gelegentlich mit Projektaufträgen konfrontiert, deren Hauptziel nicht die effiziente Produktion von Windenergie ist. Beispielsweise sollte die Firma Wind Technik Nord eine Windkraftanlage auf das Dach eines Supermarktes oder nahe an einer vielbefahrenen Straße installieren. Die Windkraftanlage auf der die Werbung angebracht ist, erhöht damit die Aufmerksamkeit potenzieller Kunden. Diese Projekte sind eine Ausnahme, werden selten durchgeführt und daher auch nicht als selbständiges Anwendungspotenzial kategorisiert. Offensichtlich kann das visuelle Erscheinungsbild einer mittelgroßen Windkraftanlage auch positiv interpretiert und genutzt werden (Interview Guschewski).

3.5 Mittelgroße Windkraftanlagen im Rahmen der Energiewende

Mittelgroße Windkraftanlagen produzieren wie Megawattanlagen umweltfreundlichen Strom und leisten einen wichtigen Beitrag für die Gestaltung eines nachhaltigen Energieversorgungssystems (Interview Guschewski). Obwohl der Anteil an elektrischer Energiebereitstellung von mittelgroßen Windkraftanlagen im Kilowattbereich klein ist, entlasten und stabilisieren auch sie das allgemeine Versorgungsnetz.

3.5.1 Windkraft als dezentrale Energiequelle zur Stärkung der Nachfrageelastizität

Ein optimales Lastmanagement ist erforderlich, um den kontinuierlich wachsenden Elektrizitätsbedarf in der Europäischen Union decken zu können. Im Zusammenhang mit der Netzstabilisierung fokussiert sich das Lastmanagement unter anderem auf das Verhindern von Spitzenlasten, in denen die Nachfrage am größten ist, siehe Einleitungskapitel zur Problematik der Residuallast. Um zu vermeiden, dass die Residuallast zu Spitzenzeiten mit Regelkraftwerken ausgeglichen werden muss, ist es notwendig nicht nur das Angebot an verfügbarem Strom temporär zu steigern, sondern die zu erwartende Nachfrage vorzeitig gezielt zu steuern (Haas et al., 2015, S79).

Ein Gewerbe, Landwirt oder kleines Industrieunternehmen, welches in eine eigene mittelgroße Windkraftanlage investiert hat, entlastet das Versorgungsnetz, indem es seinen Strombedarf zum Großteil selbst generiert. Ein Anschluss an das allgemeine Stromnetz gibt dem Betreiber Versorgungssicherheit und bietet zusätzlich die Möglichkeit eine zeitweise auftretende Stromüberproduktion mit Gewinn an das Netz zu verkaufen. Mit dem Netzparallelbetrieb können mittelgroße Windkraftanlagen unter spezifisch günstigen Voraussetzungen vereinzelt das Stromnetz in Europa entlasten und stabilisieren. Trotzdem gibt es zurzeit noch Unternehmen, die an windschwachen Tagen zur Deckung des eigenen Bedarfs auf Dieselgeneratoren zurückgreifen (Interview Overpelt).

Um eine ausfallfreie Stromversorgung in Zukunft gewährleisten zu können, muss mehr Flexibilität in der Netzstruktur geschaffen werden. Das wird durch Einbeziehung von Industrie aber auch von kleineren Verbrauchern wie Unternehmen im Gewerbesektor (inkludiert Landwirte) in das Lastmanagementpotenzial erreicht. Zudem muss die Verbindung zwischen benachbarten Verteilnetzen intensiviert werden, um den Zubau erneuerbarer Energiequellen effizienter nutzen zu können. Eine verstärkte Zusammenarbeit auf EU-Ebene kann das Stromnetz auf der Angebots - und Bedarfsseite durch optimale Koordination stabilisieren (Haas et al., 2015, S69ff).

3.5.2 Anschluss von Windkraftanlagen an das Versorgungsnetz

Bei den nationalen Stromverbundnetzen muss zwischen dem Übertragungsnetz und Verteilnetz unterschieden werden. An das Übertragungsnetz, das die Leistungsanforderungen des Energietransportes auf Hochspannungsebene erfüllt, sind hauptsächlich konventionelle Kraftwerke und teilweise auch große Windparks angeschlossen (Heier, 2018). „Der Übertragungsnetzbetreiber hat im Rahmen der Betriebsführung dafür zu sorgen, dass unter Einsatz der augenblicklich verfügbaren betrieblichen Möglichkeiten und Betriebsmitteln zu jeder Zeit alle Verbraucher mit qualitativ ausreichender elektrischer Energie (Spannung, Frequenz) versorgt werden und Störungen beherrscht und begrenzt werden“ (Heier, 2018, S338). Große Mengen an Strom werden, um Leitungsverluste zu minimieren, vorerst durch dimensionsstarke Hochspannungsleitungen des Übertragungsnetzes mit einer Spannung von bis zu 380 kV bis zum Verteilnetz transportiert. Das Verteilnetz verringert die Spannung von der überregionalen Hochspannungsebene, über die regionale Mittelspannungsebene bis zur lokalen Niederspannungsebene auf 400 V, siehe Abbildung 23 (Bruns et al., 2012, S89ff).

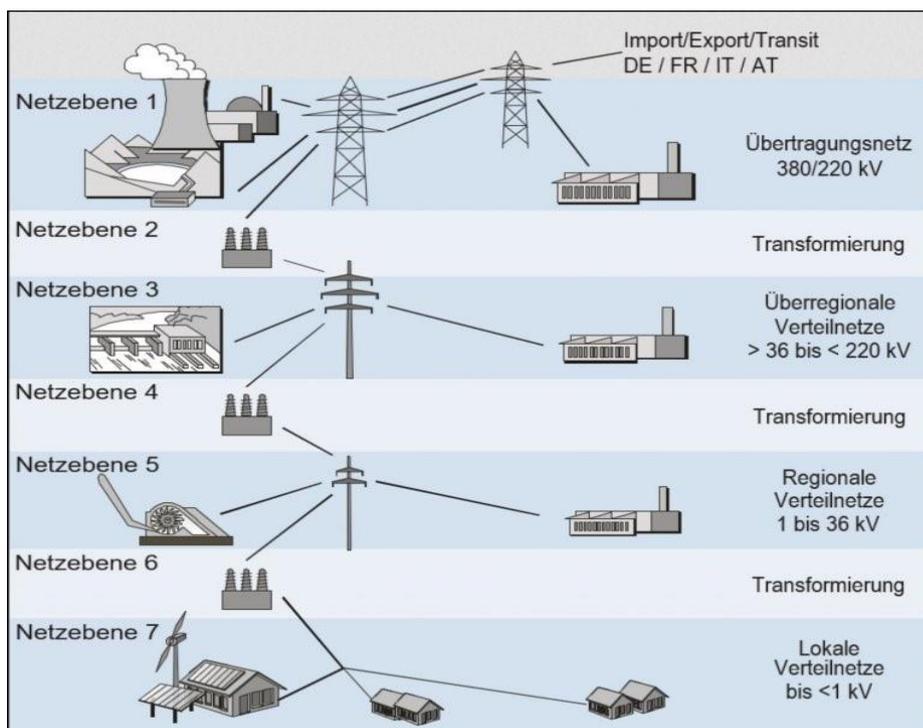


Abbildung 23: Netzebenen eines Verbundnetzes in der Schweiz (Benahmed, 2020, o.S.)

Für die Stromeinspeisung aus Windkraft in großen Mengen ist das Mittelspannungsnetz am wichtigsten. Dieses ermöglicht großen Windkraftanlagen einen effizienten Netzanschluss in ländlichen Gebieten mit passenden Kapazitäts- und Spannungswerten. Im Gegensatz dazu werden leistungsschwächere dezentrale Energiequellen wie Photovoltaikanlagen oder kleinere Windkraftanlagen, an weitläufigere Niederspannungsnetze angeschlossen, siehe Abbildung 24 (Hau, 2018).

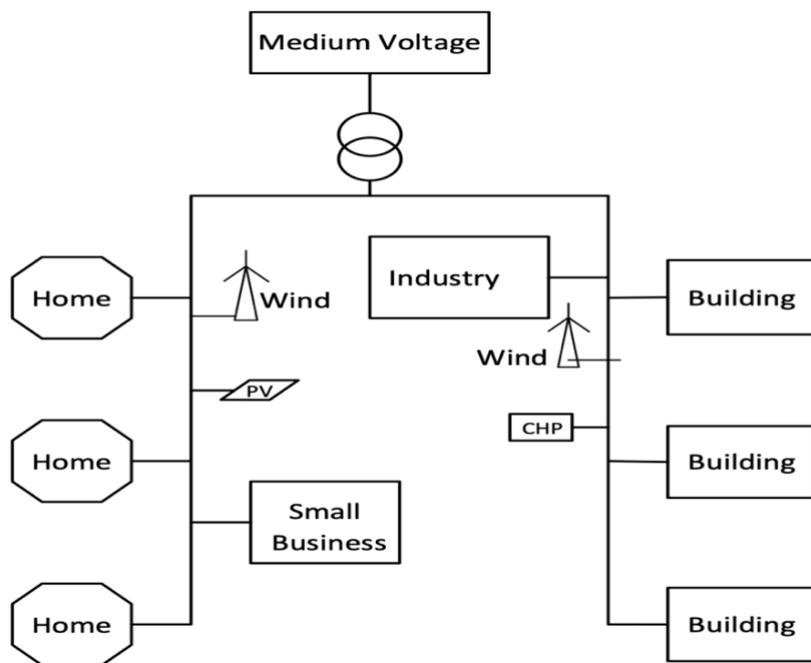


Abbildung 24: Lokales Verteilnetz mit dezentralen Energiequellen (Brauner, 2016, S123)

Ein Transformator erzeugt im lokalen Verteilnetz eine Spannung, die einen Anschluss von kleinen und mittelgroßen Windkraftanlagen möglich macht. Um Überlastungen im Niederspannungssystem, die sich in Form von Spannungsschwankungen bemerkbar machen zu minimieren, können gleichmäßig verteilte erneuerbare Stromerzeugungsanlagen in das Netz integriert werden (Brauner, 2016).

3.5.2.1 Schwache Netzanbindungspunkte

Der ökonomische und technische Aufwand eines Windkraftanlagenprojektes hängt auch von der Netzanbindung ab. Dabei spielen Faktoren wie die Distanz zwischen Windkraftanlage und Netz, das Einhalten der Anschlussvorgaben des Netzbetreibers und vor allem der Zustand des Netzes eine entscheidende Rolle. Je nachdem wie alt und in welchem Zustand sich ein Netzabschnitt befindet, wird entschieden, ob die Netzurückwirkung der geplanten Windanlage mit der Netzverträglichkeit kompatibel ist (Hau, 2018). Bei der Netzurückwirkung muss besonders auf die Spannungshaltung geachtet werden, da diese sehr sensibel auf Laständerungen reagiert (Heier, 2018).

An veralteten und entlegenen Verteilnetzabschnitten ist die Netzstruktur schwach und nicht mehr für den Anschluss von großen Windkraftanlagen geeignet. Der schwankende Leistungsinpult von Windanlagen ist im hohen Leistungsbereich für die Stabilität schwacher Netzteile problematisch. In China gibt es beispielsweise Standorte, die trotz optimaler

Windverhältnisse, aufgrund eines mangelhaften Netzzustandes im peripheren Verteilnetz, nicht genutzt werden können. Notwendige Netzerneuerungsprojekte durch Verbesserungen im Bereich der Netzinfrastruktur und Einbau neuer Transformatoren sind technisch machbar, bedeuten aber einen enormen Kostenaufwand (Jie et al., 2020, 486ff).

Mit dem Problem der sensiblen, beziehungsweise schwachen Netzanbindungspunkte haben auch Regionen in Europa zu kämpfen. Laut Overpelt betrifft dies konkret Gebiete Südtaliens sowie griechische Inseln. Für netzstrukturschwache Regionen, wie sie in Gebieten Südtaliens und auf griechischen Inseln vorkommen, sind mittelgroße Windkraftanlagen mit ihren installierten Leistungen besser geeignet als große Megawattanlagen. An windstarken Standorten in denen die Netzabschnitte schwach und veraltet sind, entscheiden sich Kunden aus wirtschaftlichen Gründen eher für mittelgroße Windkraftanlagen, als eine größere Windturbine mit einem modernisierten Netz in die Landschaft zu integrieren (Interview Overpelt). Abschließend kann gesagt werden, dass mittelgroße Windkraftanlagen, abgesehen von der manchmal schwierigen Implementierbarkeit, einen Beitrag zur Sicherung instabiler Netzabschnitte bei ungleichmäßiger Verteilung von Verbrauchern und Einspeisequellen darstellen. Die Positionierung von Windkraftanlagen unter diesen Netzbedingungen bewirkt einen Spannungsausgleich, der durch die Erzeugung von Blindleistung für lokale Verteilnetze wichtig ist (Interview Vales). Die Blindleistung wird von Netzelementen aber auch Abnehmern verbraucht und trägt maßgeblich zu Spannungsschwankungen bei, ist jedoch für die Funktionsfähigkeit eines Wechselstromnetzes unabdingbar (Heier, 2018).

3.5.3 Kombination von Speichertechnologien mit mittelgroßen Windkraftanlagen

Um das Ziel der nachhaltigen Selbstversorgung mittels einer Windkraftanlage so weit wie möglich realisieren zu können, bietet sich die Anwendung eines Speichersystems an. Dieses soll als Kurzzeitspeicher dafür sorgen, dass zu Zeiten starken Windes die überschüssige Energie gespeichert wird. Wenn sich die Wetterverhältnisse ändern und die Windkraftanlage keinen Strom mehr produzieren kann, ist es dem Verbraucher/Betreiber damit möglich seinen Strombedarf aus den aufgeladenen Speichersystemen im Optimalfall komplett zu decken. Dies erhöht die Flexibilität der Energieerzeugungsanlage und wirkt sich positiv auf die Netzstabilität aus. In Abbildung 25 sind die vier Hauptkomponenten des elektrischen Energiekreislaufs vereinfacht dargestellt (Papadopoulos et al., 2019, S599ff).

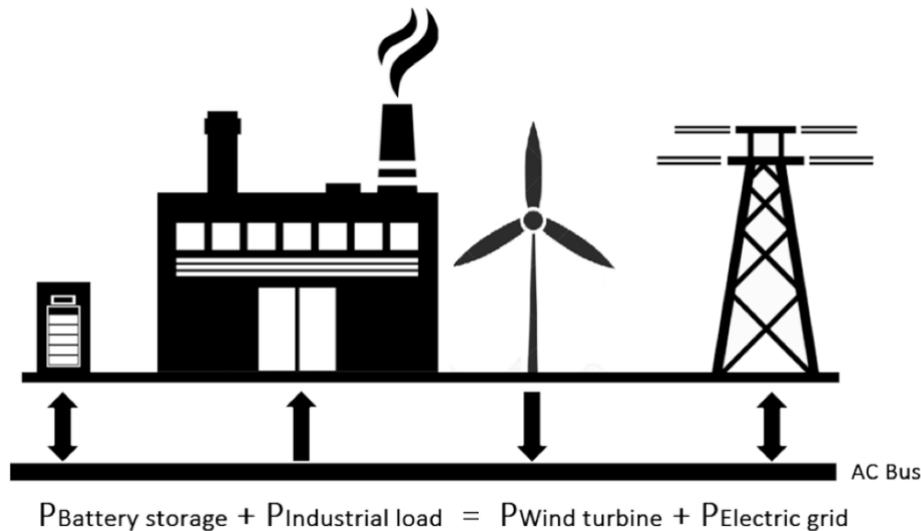


Abbildung 25: Energiesystem mit Windturbine und Speicheraggregat für einen Industriebetrieb (Papadopoulos et al., 2019, S561)

Das Speicheraggregat fungiert für Energiesysteme mit Windkraftanlagen als Ausgleichskomponente um Leistungsschwankungen bis zu einem gewissen Grad kompensieren zu können. Als sogenannte Puffer- oder Kurzzeitspeicher sind chemische Speichersysteme wie Akkumulatoren aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte gut geeignet (Papadopoulos et al., 2019, S560f).

Bei Projekten in denen Windkraftanlagen auf entlegenen Gebieten positioniert werden und somit im Inselbetrieb arbeiten, rentieren sich Speichersysteme die einen Dieselgenerator ersetzen. Aufgrund von hohen Dieselpreisen und deren Transportkosten ist der finanzielle Aufwand für einen Batteriespeicher geringer (Interview Overpelt).

Im von dem Versorgungsnetz praktisch vollständig erschlossenen Europa, ist das Investment in ein Speichersystem für Unternehmen und Landwirte mit einer eigenen Windkraftanlage in der Regel nicht attraktiv genug. Bei einer ökonomischen Evaluierung kommt es primär auf den Einspeisetarif und das Verbraucherverhalten des Unternehmens an. Die Anwendung eines Speichersystems ist bis dato laut Vales und Overpelt für ihre Kunden zu teuer. Falls jedoch Nachfrage besteht, verweisen die Hersteller der mittelgroßen Windanlagen auf Partnerfirmen die sich auf Akkumulatoren spezialisiert haben (Interview Guschewski & Vales).

Für die Entscheidung welches Energiespeichersystem einen reibungslosen und effizienten Betrieb gewährleistet, müssen bei der Planung Daten aus der Vergangenheit über lokale Windverhältnisse und Leistungsschwankungen der Windkraftanlage herangezogen werden. Kenntnisse über das Lastverhalten der Batteriesysteme sind entscheidend um die richtige Strategie in Bezug auf den Lade- und Entladezyklus erstellen zu können (Zhao et al., 2015, S551ff). Bei der Verwendung von Akkumulatoren muss eine Überbeanspruchung vermieden

werden, da sich die Lebensdauer sonst drastisch verkürzt. Eine Studie von Papadopoulos et al. hat gezeigt, dass die Genauigkeit bei der Datenerhebung von Windgeschwindigkeiten zu exakteren Vorhersagen der zu erwartenden Stromleistungen führt, siehe Abbildung 26. Die beiden Graphen in Abbildung 26 zeigen deutlich, wie weniger aussagekräftig das Ergebnis der Windmessungen in einem Intervall von 10 Minuten im Vergleich zu Messungen pro Sekunde ist (Papadopoulos et al., 2019, S560ff).

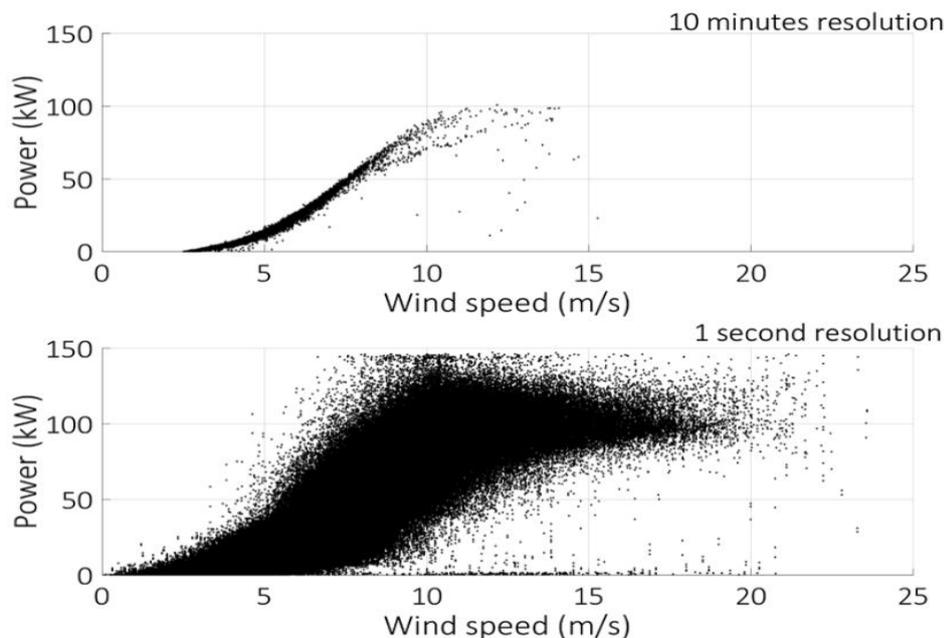


Abbildung 26: Streudiagramm von Windgeschwindigkeit und Leistung bei unterschiedlichen Messpunktintervall über 2 Monate aufgezeichnet (Papadopoulos et al., 2019, S561)

Je größer der Lade- und Entladestrom einer Batterie ist, umso wichtiger ist es genaue Daten über das Lastverhalten der Windturbine, welches durch die fluktuierende Windgeschwindigkeit verursacht wird, bei der Projektplanung des Speichersystems miteinzubeziehen. Der Ladestrom bestimmt die Schnelligkeit mit der sich ein Akkumulator aufladen kann und ist daher besonders bei dynamischen Energiekonzepten, wie das einer mittelgroßen Windturbine im Netzparallelbetrieb relevant (Papadopoulos et al., 2019, S569f).

Wenn größere Mengen Strom über Tage hinweg gespeichert werden sollen - also keine Anwendung als Pufferspeicher - sind Akkumulatoren aufgrund ihrer begrenzten Speicherkapazität und Selbstentladungseffekt ungeeignet. Leistungsstarke Batteriesysteme sind zudem sehr kostspielig und eignen sich somit nicht als Langzeitspeicher. Für diese Art von Speicherung sind Pumpspeicherkraftwerke aus wirtschaftlicher Sicht besser geeignet (Hau, 2016). Wenn mittelgroße Windkraftanlagen an ein Versorgungsnetz angebunden sind, besteht die einfache Möglichkeit überschüssige Energie über das Netz zu speichern. Daher ist der zusätzliche Aufwand eines Langzeitspeichers für den Betrieb einer Windkraftanlage im mittelgroßen Leistungsbereich nicht notwendig (Interview Vales).

4 Zusammenfassung und Diskussion

Aufgrund der begrenzten Anzahl an Herstellerinterviews, sind allgemeingültige Aussagen über Anwendungspotenziale mittelgroßer Anlagen nur eingeschränkt möglich. Da keine detaillierten länderübergreifenden Informationen über die Standorte der sich in Betrieb befindlichen mittelgroßen Windkraftanlagen zur Verfügung stehen, ist das Erstellen eines Flächenpotenzials nicht möglich.

Die nachhaltige elektrische Energiebereitstellung mit Windkraft ist zu einer zentralen Technologie bei der Energiewende in Europa geworden. (Hau, 2016). Das Nischenprodukt der mittelgroßen Windkraftanlage ersetzt primär die umweltschädlichen Dieselgeneratoren, die bis dato die Hauptenergiequelle der Stromgewinnung in geographisch entlegenen Regionen waren. Ein weiterer Einsatzbereich mittelgroßer Windkraftanlagen für Länder innerhalb Europas mit vielversprechendem Wachstumspotenzial sind nach Angaben der Hersteller, Selbstversorgungsprojekte von Unternehmen (Interview Guschewski, Overpelt & Vales). Abgesehen von der CO₂-neutralen Energieproduktion, fördert die Eigenstrombereitstellung von Gewerbe und Industrie die Flexibilität und Lastverteilung im Netz (Haas et al., 2015, S69).

Eine absolute Grundvoraussetzung für den Einsatz von mittelgroßen Windkraftanlagen sind lokal vorhandene Mindestwindgeschwindigkeiten in Höhen von 50m und weniger. Die von den befragten Herstellerfirmen angebotenen Windkraftanlagen mit 250 kW, produzieren ab 3m/s Wind Strom, dieser reicht jedoch für einen wirtschaftlichen Betrieb nicht aus. Erst ab einer doppelt so hohen Jahresdurchschnittswindgeschwindigkeit kommt es für den Betreiber zu einem schnelleren und für den Kunden attraktiven Return on Investment. Das ist der Grund warum sich der Markt für mittelgroße Windkraftanlagen auf windstarke Regionen im Norden (rund um die Nordsee) und Süden (Italien und Griechenland) Europas konzentriert, siehe Windatlas im Kapitel 3.3.1.3 (Interview Guschewski, Overpelt & Vales).

Die grundsätzliche Entscheidung für die Inbetriebnahme einer mittelgroßen Windkraftanlage, kann erst nach einer Kostenrechnung, in der sich die Strompreise des Netzanbieters und die Betriebs- sowie Investitionskosten gegenüberstehen, getroffen werden. Je höher die Energiekosten und je größer der Strombedarf ist, umso eher macht die Anwendung einer eigenen Windkraftanlage wirtschaftlich Sinn. Mittelgroße Windkraftanlagen finden sich aktuell in Europa am häufigsten in landwirtschaftlichen Unternehmen (Interview Guschewski & Overpelt), welche einen Strombedarf von maximal 100.000 kWh im Jahr haben und im Vergleich zu industriellen Großabnehmern einen höheren Strompreis zahlen (Zinke, 2019). Auch Gewerbe bis hin zu kleinen Industriebetrieben zeigen Interesse an einer eigenen

Windkraftanlage, die den Großteil des Strombedarfes decken soll. Moderne mittelgroße Windkraftanlagen im Leistungsbereich von 250 kW können bereits Unternehmen mit 400.000 bis 500.000 kWh elektrischer Energie im Jahr versorgen, wenn dies die Standortbedingungen ermöglichen (Heidebrecht, 2019, Interview Overpelt).

Ist der Strombedarf um vieles höher, werden große leistungsstärkere Windkraftanlagen bevorzugt, da der Wartungsaufwand und die damit verbundenen Personalkosten geringer als bei mehreren mittelgroßen Windkraftanlagen sind (Interview Vales). Die seit Beginn 2020 kontinuierlich ansteigenden Strompreise innerhalb Europas führen aktuell zu einer erhöhten Nachfrage an mittelgroßen Windkraftanlagen. Das ist in Deutschland, das die höchsten Stromkosten Europas hat, nach Angabe des Finanzvorstandes der Firma Wind Technik Nord GmbH aus Schleswig-Holstein bereits deutlich zu spüren (Interview Guschewski; Zinke, 2019).

Der wirtschaftlich sinnvolle Betrieb einer mittelgroßen Windkraftanlage im Netzparallelbetrieb erfordert die Möglichkeit den im Überschuss produzierten Strom jederzeit zu einem attraktiven Einspeisetarif (in der Regel ist ein Förderprogramm dafür notwendig) in das Verteilnetz einspeisen zu können. Die Hersteller von MKA klagen, dass bei Windkraftprojekten die zur Selbstversorgung dienen sollen, die staatlichen Hilfestellungen in Europa mangelhaft sind. Diese Aussage bezieht sich auf die Dauer von Genehmigungsverfahren und die Stützung von Einspeisevergütungen. Im Wesentlichen bestimmt der Strompreis aus dem Netz die Nachfrage und das Anwendungspotenzial mittelgroßer Windkraftanlagen. Je besser die installierte Leistung der eigenen Windkraftanlage an den Strombedarf angepasst ist, umso weniger ist der Betreiber in der Europäischen Union von der aktuellen politischen und wirtschaftlichen Lage abhängig (Interview Guschewski, Overpelt & Vales).

Aufgrund der steigenden Kosten für Energie, überlegen sich Hersteller, ihre mittelgroßen Anlagen in Zukunft mit einem Power-to-Gas Konzept zu kombinieren (Interview Guschewski, & Vales). Dabei wird die produzierte elektrische Energie in chemische Energie in Form von Wasserstoff oder Methan umgewandelt. Die in den Gasen gespeicherte Energie kann dann unterschiedlich genutzt werden. Mit diesem Verfahren verschlechtert sich aber der Wirkungsgrad deutlich, sodass für eine kommerzielle Nutzung noch technischer Optimierungsbedarf besteht (Brauner, 2016).

Die Nutzung von Wind als Primärenergiequelle mit mittelgroßen Windkraftanlagen für das Versorgungsnetz innerhalb der europäischen Mitgliedsstaaten ist von der Netzstruktur abhängig. Dafür eignen sich schwache Netzabschnitte, welche für die Last- und Spannungsfluktuationen einer Megawattanlage nicht stabil genug sind. Dies kommt in Teilen Süditaliens und auf griechischen Inseln vor, wo Investoren gepachtete Grundstücke von

Landwirten als Standorte für mittelgroße Windkraftanlagen verwenden. Nach Angabe des Experten Overpelt, entscheiden sich die Betreiber oft trotz geringerer Leistungsausbeute aufgrund der kleineren Bauweise für eine mittelgroße Anlage. Inwieweit der Eingriff in das Landschaftsbild als Argument verwendet wird, bestimmt die Meinung der lokalen Bevölkerung (Interview Overpelt).

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Experteninterviews europäischer Hersteller von mittelgroßen Windkraftanlagen zeigen, dass eine Prognose im Hinblick auf das Wachstumspotenzial von mittelgroßen Windkraftanlagen in Europa aufgrund von unsicheren politischen Rahmenbedingungen nicht möglich ist. Die bisherigen Anwendungsbereiche basieren auf rein wirtschaftlichen Überlegungen günstig elektrische Energie zu produzieren und fördern gleichzeitig die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energiequellen. Bei richtiger Indikationsstellung unter Berücksichtigung der Größenordnungen, was die installierten Leistungen betrifft, gibt es gute Wachstumschancen für diese Marktnische. Neben den potenziell positiven Effekten auf die Netzstabilität sollte die Möglichkeit sich lokal selbst mit Strom versorgen zu können nicht unterschätzt werden. Das Konzept der mittelgroßen Windkraftanlage führt zu mehr Unabhängigkeit vom Stromnetz. Die sich ständig ändernde politische Lage, Umweltkatastrophen und weltweit instabile Finanzmärkte werden womöglich die Politik veranlassen über wirtschaftliche Anreize das Anwendungspotential für mittelgroße Windkraftanlagen zu vergrößern.

Neben der Bedeutung für die Stromeigenversorgung, sollten weitere Studien den möglichen Anschluss von mittelgroßen Windkraftanlagen an das allgemeine Netz untersuchen. Eine relevante Frage ist, ob dezentrale Energiequellen (mittelgroße Windkraftanlagen) das Verteilnetz soweit stützen könnten, dass eine Entlastung auf höheren Netzebenen eintritt. Eine zunehmende Energieknappheit im europäischen Raum macht einen vermehrten Ausbau der internationalen Netzinfrastruktur notwendig. Eine zielführende Energiewende ist aber nur dann möglich, wenn eine verbesserte Synchronisation von Verbraucherverhalten und Energieproduktion erfolgt.

6 Literaturliste

- Arbaz, M., Tyagi, U., & Prasad, Y. E. (2022). *Small Wind Power Market Research, 2030*. Verfügbar in: <https://www.alliedmarketresearch.com/small-wind-power-market> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie. (2014). *Kleinwindkraft – Ein Leitfaden zur Planung und Umsetzung*. 2. Auflage. 1-16.
- Battisti, L., Benini, E., Brighenti, A., Dell'Anna, S., & Raciti Castelli, M. (2018). Small wind turbine effectiveness in the urban environment. *Renewable Energy*, 129, 102–103.
- Benahmed, M. (2020). Auf die richtige Spannung kommt's an. *Magazin Des Bundesamts Für Energie BFE*. Verfügbar in: <https://energieiplus.com/tag/netzebenen/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Boretti, A., & Castelletto, S. (2020). Cost of wind energy generation should include energy storage allowance. *Scientific Reports*, 10(1), 1–2.
- Brauner, G. (2016). *Energiesysteme: regenerativ und dezentral*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bruns, E., Futterlieb, M., Wenzel, B., & Ohlhorst, D. (2012). „Restriktionsanalyse Netze“ - Netze als Voraussetzung für die Realisierung hoher Anteile erneuerbarer Energien in der leitungsgebundenen Energieversorgung in Deutschland. 89-90,154.
- Bundesnetzagentur. (2022). *Ausschreibungen zur Ermittlung der finanziellen Förderung von Windenergieanlagen an Land*. Verfügbar in: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibung/en/Wind_Onshore/start.html;jsessionid=D57F53CB5199C464B5844B7F0F416411 [Abgerufen am 01/05/2022]
- Bundesverband WindEnergie. (2020). *Windenergie in Europa*. Verfügbar in: <https://www.windenergie.de/themen/zahlen-und-fakten/europa/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Bundesverband WindEnergie. (2022). *Windenergieanlagen mit horizontaler Achse - „Horizontalachser“*. Verfügbar in: <https://www.windenergie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/horizontalachser/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Choe, K. Y., Kim, H., Li, J. U., Hyon, C. il, & Kang, I. Y. (2019). New architecture and SCADA for stand-alone hybrid (medium-sized asynchronous wind turbine + UPS with battery + photovoltaic array) power system without diesel generator. *Wind Energy*, 959.
- Dalla Longa, F., Kober, T., Badger, J., Volker, P., Hoyer-Klick, C., Hidalgo Gonzalez, I., Medarac, H., Nijs, W., Politis, S., Tarvydas, D., & Zucker, A. (2018). *Wind potentials for EU and neighbouring countries*. 47-54.
- Deutsche Bauzeitschrift. (2015). Glaubwürdig umweltverträglich Elbarkaden, HafenCity Hamburg. *Bauverlag BV*. Verfügbar in: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Glaubwuerdig_umweltvertraeglich_Elbarkaden_HafenCity_Hamburg_2347473.html [Abgerufen am 01/05/2022]
- Deutsche Windguard. (2020). *Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland Jahr 2020*, S11.
- Europäische Kommission. (2018). *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen*. 82.

- Europäische Kommission. (2020). *Mitteilung der Kommission: Leitfaden zu Windkraftprojekten und den Naturschutzvorschriften der EU*. 16,112-114,145-148.
- Eurostat. (2018). *Strompreisstatistik - Statistics Explained*. Verfügbar in: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Strompreisstatistik&direction=next&oldid=363637#Weiterer_Informationen_von_Eurostat [Abgerufen am 01/05/2022]
- Frenz, W. (2016). Windkraft vs. Artenschutz und Eigentümerbelange. *Natur Und Recht*, 38(4), 252–253.
- Gardiner, M., White, H., Munzing, M., & Ray, W. (2011). *Low Carbon Building Programme*. 142-145.
- Gasch, R., Twele, J., Bade, P., Conrad, W., Heilmann, C., Kaiser, K., Kortenkamp, R., Kühn, M., Langreder, W., Liersch, J., Maurer, J., Reuter, A., Schubert, M., Sundermann, B., & Stoffel, A. (2005). *Windkraftanlagen* (R. Gasch & J. Twele, Eds.). Vieweg+Teubner Verlag.
- Haas, R., Ajanovic, A., Busch, S., Hartner, M., Ortner, A., Ragwitz, M., & Resch, G. (2015). *Strommarktdesign für die Integration weiter steigender Anteile erneuerbarer Energie in Österreich und Europa*. 7,18-24,69-70,79-81,87-90.
- Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen*. Springer Berlin Heidelberg.
- Heidebrecht, K. (2019). Mid-Size-Windkraftanlagen für kommunale Betriebe, Landwirte und Gewerbe – Windkraft für den Eigenverbrauch von Kommunen. *Magazin Für Kommunales Management*. Verfügbar in: <https://www.kommunaldirekt.de/mid-size-windkraftanlagen-fuer-kommunale-betriebe-landwirte-und-gewerbe/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Heier, S. (2018). *Windkraftanlagen*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Holler, C., & Gaukel, J. (2019). *Erneuerbare Energien: Ohne heiße Luft*. UIT Cambridge Ltd.
- Igwemezie, V., Mehmanparast, A., & Kolios, A. (2019). Current trend in offshore wind energy sector and material requirements for fatigue resistance improvement in large wind turbine support structures – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 181–183.
- Int. Wirtschaftsforum Regenerative Energien. (2021). *Siemens Gamesa errichtet leistungsstärkste Onshore-Windkraftanlage in Deutschland*. Verfügbar in: <https://www.iwr.de/news/siemens-gamesa-errichtet-leistungsstaerkste-onshore-windkraftanlage-in-deutschland-news37320> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Jaeger, L. (2021). *Wege aus der Klimakatastrophe*. Springer Berlin Heidelberg.
- Jarass, L., Obermair, G. M., & Voigt, W. (2009). *Windenergie*. Springer Berlin Heidelberg.
- Jie, L., Chao, L., Pengfei, Z., Yafeng, W., & Jun, R. (2020). Difference between grid connections of large-scale wind power and conventional synchronous generation. *Global Energy Interconnection*, 3(5), 486–491.
- Jüttemann, P. (2020). *Wegweiser Kleinwindkraft*
- Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 36(7), 18.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (2020). *Erneuerbare Energien* (M. Kaltschmitt, W. Streicher, & A. Wiese, Eds.). Springer Berlin Heidelberg.
- Lackner, L. (2016). Genehmigungspraxis Windkraft. In *Wien Energie* Verfügbar in: <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwJOr9CR8sv3AhWBUySKHfK2B3UQFnoECAKQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.technikum->

[wien.at/file/download&usg=AOvVaw3g1pPeX7UhSCuHGxAm8Ezz](https://www.wien.at/file/download&usg=AOvVaw3g1pPeX7UhSCuHGxAm8Ezz) [Abgerufen am 01/05/2022]

- Lenzen-Schulte, M., & Schenk, M. (2019, February). Windenergieanlagen und Infraschall: Der Schall, den man nicht hört. *Deutsches Ärzteblatt*. Verfügbar in: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/205246/Windenergieanlagen-und-Infraschall-Der-Schall-den-man-nicht-hoert> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Leonhartsberger, K., Peppoloni, M., & Hirschl, A. (2018). *Kleinwindkraftreport Österreich 2018*. 4-6.
- Leonhartsberger, K., Peppoloni, M., Hirschl, A., Baumann-Stanzer, K., Stenzel, S., Lotteraner, C., Leeb, K., Klappacher, J., Tiefgrabe, C., Drapalik, M., Reiterer, D., Teppner, R., & Auer, M. (2019). *Entwicklung von Beurteilungsmethoden für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen in urbaner Umgebung*. 17,61,127-137.
- Lieblang, L. A. (2018). Ein Jahr danach: Erste empirische Ergebnisse der Ausschreibungen für Windenergie an Land gemäß EEG 2017. *Zeitschrift Für Energiewirtschaft*, 42(4), 316–317.
- Lütkehus, I., Salecker, H., & Alsleben, C. (2013). *Potenzial der Windenergie an Land - Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land*. 25-29.
- McKenna, R., Ostman v.d. Leye, P., & Fichtner, W. (2016). Key challenges and prospects for large wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1213.
- MEIR Green SRL. (n.d.). *Vergnet medium size wind turbines*. Verfügbar in: <https://meir.ro/vergnet-medium-size-wind-turbines/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Meister, M. (2021). Ein Land im Widerstand gegen die Windkraft. *Welt*. Verfügbar in: <https://www.welt.de/politik/ausland/plus231911455/Frankreich-Ein-Land-kaempft-gegen-die-Windkraft.html> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Nagel, L. S., Caby, C., de Macq, A., & Kappe, J. T. (2020). *BELGIEN Windenergie: On- und Offshore Zielmarktanalyse 2020 mit Profilen der Marktakteure*. 19-20.
- Office of Gas and Electricity Markets. (2014). *Feed-in Tariff Scheme: Tariff Table 1 April 2014 - 31 March 2015 Non-PV Only*. Verfügbar in: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2014/01/rpi_adjusted_tariffs_non-pv_april_2014.pdf [Abgerufen am 01/05/2022]
- Office of Gas and Electricity Markets. (2018). *Feed-in Tariff (FIT): Generation and export Payment rate table 1 July 2018 - 31 March 2019*. Verfügbar in: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2018/07/fit_generation_and_export_payment_rate_table_01_july_-_31_march_2019.pdf [Abgerufen am 01/05/2022]
- Osterhage, W. (2019). *Chancen und Grenzen der Energieverwertung*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Papadopoulos, V., Knockaert, J., Develder, C., & Desmet, J. (2019). Investigating the need for real time measurements in industrial wind power systems combined with battery storage. *Applied Energy*. 247,559–562,569.
- Patel, M. R. (2005). *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press.
- RenewableUK. (2014). *Small and Medium Wind Strategy - The current and future potential of the sub-500kW wind industry in the UK*. 7-13.
- Research Studio iSPACE. (2011). *Windkarte von Österreich - mittlere Jahres-Windgeschwindigkeiten*. Verfügbar in: <https://ispacevm01.researchstudio.at/?l=Mittlere%20Windgeschwindigkeit%20in%20100m%20ü.Grund%5B25%5D%2CMittlere%20Windgeschwindigkeit%20in%2050m%20ü>.

[Grund%5B25%5D&bl=bmapgrau&t=windatlas&c=1450000%2C6065000&s=257461](#)
[Abgerufen am 01/05/2022]

- Schmitz, J., Rinne, S., & Pieper, S. (2020). *Strompreise: Neue Wege bei der Finanzierung*. 14.
- Serrano-González, J., & Lacal-Aránategui, R. (2016). Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis. *Wind Energy*, 19(12), 2182–2183.
- Siddique, M. B., & Thakur, J. (2020). Assessment of curtailed wind energy potential for off-grid applications through mobile battery storage. *Energy*, 201,1.
- Strauch, Y. (2020). Beyond the low-carbon niche: Global tipping points in the rise of wind, solar, and electric vehicles to regime scale systems. *Energy Research & Social Science*, 62, 1–2.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrajaya, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1370–1371.
- UmweltDialog. (2020). *Energiewende – E.ON setzt auf kleine Windräder*. Verfügbar in: <https://www.umweltdialog.de/de/umwelt/energiewende/2020/E.ON-setzt-auf-kleine-Windraeder.php> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Vergnet Wind Turbines. (o.J.). *GEV MP C 200-275 kW.*, Verfügbar in: http://www.vergnet.com/wp-content/uploads/2016/01/DC-11-00-01-EN_GEV_MP-C_275_kW.pdf [Abgerufen am 01/05/2022]
- Watson, S., Moro, A., Reis, V., Baniotopoulos, C., Barth, S., Bartoli, G., Bauer, F., Boelman, E., Bosse, D., Cherubini, A., Croce, A., Fagiano, L., Fontana, M., Gambier, A., Gkoumas, K., Golightly, C., Latour, M. I., Jamieson, P., Kaldellis, J., ... Wiser, R. (2019). Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 8–10.
- Wind Energy Solution BV. (o.J.). *WES250 - Technical Specifications*. Verfügbar in: http://sdl-energy.com/wp-content/uploads/2019/11/Brochure_WES_250.pdf [Abgerufen am 01/05/2022]
- Wind Technik Nord. (o.J.-a). *Prospekt WTN250*. Verfügbar in: <https://www.windtechniknord.de/DEUTSCH/DOWNLOADS/index.php/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Wind Technik Nord. (o.J.-b). *Prospekt WTN250i*. Verfügbar in: <https://www.windtechniknord.de/DEUTSCH/DOWNLOADS/index.php/> [Abgerufen am 01/05/2022]
- wind-turbine.com. (o.J.-a). *Wind Energy Solutions BV*. Verfügbar in: <https://wind-turbine.com/anbieter/11584/wind-energy-solutions-bv-kj-opmeer.html> [Abgerufen am 01/05/2022]
- wind-turbine.com. (o.J.-b). *WTN 250/50 - Fotos & Videos*. Verfügbar in: <https://wind-turbine.com/windkraftanlagen/133286/wtn-250-50.html> [Abgerufen am 01/05/2022]
- Winkelmeier, H. (2017). Technische Systeme. In *OET ESY3 / Wind*. Energiewerkstatt Verein. 3.
- Zahoransky, R. (2019). Windenergie. In *Energietechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., & Rasmussen, C. N. (2015). Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied Energy*, 137, 551–552.
- Zinke, O. (2019). Darum zahlen deutsche Landwirte die höchsten Strompreise Europas. *Agrarheute*. Verfügbar in: <https://www.agrarheute.com/management/betriebsfuehrung/zahlen-deutsche-landwirte-hoechsten-strompreise-europas-552797> [Abgerufen am 01/05/2022]

Zinke, O. (2022). Strompreise in Europa: Das zahlen Landwirte, Verbraucher und Industrie. *Agrarheute*. Verfügbar in: <https://www.agrarheute.com/management/finanzen/strompreise-europa-zahlen-landwirte-verbraucher-industrie-591121> [Abgerufen am 01/05/2022]

7 Abkürzungsverzeichnis

BImSchG ... Bundes-Immissionsschutzgesetzes

dB ... Dezibel

kW ... Kilowatt

kWh ... Kilowattstunde

MWh ... Megawattstunde

KWKA ... Kleinwindkraftanlage

m ... Meter

m/s ... Meter pro Sekunde

V ... Volt

8 Nomenklatur

A ... Fläche

C_p ... Wirkungsfaktor/ Betzfaktor

E_{kin} ... kinetische Energie

m ... Massenstrom

P ... Leistung

t ... Zeit

v ... Geschwindigkeit

ρ ... Dichte

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leistungsbeiwert-Kennlinien unterschiedlicher Windturbinen (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S537)	5
Abbildung 2: Steigende Installierte Leistung in Europa von 2000 bis 2019 (Bundesverband WindEnergie, 2020, o.S.).....	6
Abbildung 3: Aufbau und Elemente einer klassischen Windkraftanlage (McKenna et al., 2016, S1213).....	9
Abbildung 4: Größen- und Leistungszunahme von Windkraftanlagen zwischen 1980 und 2019 (ª ausschließlic für Offshore Anwendung) (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S542).....	10
Abbildung 5: Schattenbereich und Schallgrenzen einer 2 Megawatt starken Windkraftanlage (Kaltschmitt, Streicher, et al., 2020, S555).....	13
Abbildung 6: Drei Darrieus-Windkraftanlagen auf dem Greenpeace-Hauptgebäude in Hamburg (Deutsche Bauzeitschrift, 2015, o.S.).....	20
Abbildung 7: Savonius-Widerstandsläufer (Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, 2014, S5).....	20
Abbildung 8: Schallemissionskarte einer kleinen Vertikalachsenwindkraftanlage (Leonhartsberger et al., 2019, S135)	23
Abbildung 9: WTN250 Windkraftanlage des Herstellers Wind Technik Nord GmbH (windturbine.com, o.J.-b, o.S.)	31
Abbildung 10: GEV MP R Windkraftanlagenmodel des Herstellers Vergnet (Vergnet, o.J., o.S.)	32
Abbildung 11: WES250 Windkraftanlage des Herstellers Wind Energy Solution BV (windturbine.com, o.J.-a, o.S.)	32
Abbildung 12: Luv- und Leestellung des Rotors zum Turm (Bundesverband WindEnergie, 2022, o.S.).....	33
Abbildung 13: Kippbare mittelgroße Windkraftanlage des Typs GEV MP der Firma Vergnet (MEIR Green SRL, o.J., o.S.)	35
Abbildung 14: Windkraftanlage (WKA) im Netzparallelbetrieb (Hau, 2016, S722)	36
Abbildung 15: Klassifizierung von Windkraftanlagen je nach Windbedingung (Hau, 2016, S210).....	38
Abbildung 16: Verhalten von Leistung zu Windstärke der Anlage WTN250 (Wind Technik Nord, o.J.-a, S3).....	39
Abbildung 17: Verhalten von Leistung zu Windstärke der Anlage WES250 (Wind Energy Solution BV, o.J., S2).....	39
Abbildung 18: Windverhältnisse in Europa 50 m über dem Boden (Hau, 2016, S569)	42

Abbildung 19: Entwicklung des Strompreises (Cent pro kWh) für Haushalte mit einem jährlichen Verbrauch zwischen 2500 und 5000 kWh (Eurostat, 2018, o.S.)	48
Abbildung 20: Entwicklung des Strompreises (Cent pro kWh) für Industrie mit einem jährlichen Verbrauch zwischen 500 und 2000 MWh (Eurostat, 2018, o.S.).....	49
Abbildung 21: Strompreisunterschiede für Gewerbe und Industrie in EU-Ländern (Schmitz et al., 2020, S14).....	50
Abbildung 22: Jährlicher Stromertrag einer WES250 Windkraftanlage in Abhängigkeit von der Durchschnittswindgeschwindigkeiten (Wind Energy Solution BV, o.J., S2)	51
Abbildung 23: Netzebenen eines Verbundnetzes in der Schweiz (Benahmed, 2020, o.S.) ..	54
Abbildung 24: Lokales Verteilnetz mit dezentralen Energiequellen (Brauner, 2016, S123) ..	55
Abbildung 25: Energiesystem mit Windturbine und Speicheraggregat für einen Industriebetrieb (Papadopoulos et al., 2019, S561).....	57
Abbildung 26: Streudiagramm von Windgeschwindigkeit und Leistung bei unterschiedlichen Messpunktintervall über 2 Monate aufgezeichnet (Papadopoulos et al., 2019, S561)	58

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der Unternehmen die für Experteninterviews angefragt wurden	27
Tabelle 2: Beispiel der Abstandvorgaben im deutschen Bundesland Schleswig-Holstein (Hau, 2016, S797).....	44
Tabelle 3: Vergleich der Einspeisevergütung für mittelgroße Windkraftanlagen im Vereinigten Königreich für ausgewählte Jahre (Tabelle wurde mit Hilfe der Informationen folgender Quellen in Microsoft Exel erstellt: Office of Gas and Electricity Markets, 2014, S2; Office of Gas and Electricity Markets, 2018, S2)	46

11 Anhang A: Interview-Fragebogen

Deutsch

1. Unterscheidet sich die technische Konstruktion einer mittelgroßen Windkraftanlage, von der einer Windkraftanlage im Megawattbereich?
2. Was sind die Mindestanforderungen an Windgeschwindigkeit, Topografie und Raumbedarf für den wirtschaftlich sinnvollen Betrieb von ihrer mittelgroßen Windkraftanlage?
3. Wer sind die potenziellen Kunden für ihre mittelgroße Windkraftanlage? Welche Argumente/Umstände machen die Energiegewinnung aus mittelgroßer Windkraft für den Nutzer attraktiv?
4. Was sind die durchschnittlich zu erwartenden ökonomischen Kennzahlen einer mittelgroßen Windkraftanlage?
5. Wie hoch ist der Anteil an zugekauften Komponenten in der Produktion?
6. Inwieweit übernehmen sie die Evaluierung, Planung und anfallende Genehmigungsverfahren für den zukünftigen Betreiber ihrer Windkraftanlage?
7. Wie wirken sich die sicherheitstechnischen (Schattenwurf, Eisabwurf, Hörschall/Infraschall) und ökologischen Anforderungen (Naturschutz) auf die Genehmigungsverfahren von mittelgroßen Windkraftanlagen aus?
8. Könnten mittelgroße Windkraftanlagen einen Beitrag zur Netzstabilisierung leisten?
9. Gibt es Beispiele für Energiespeichersysteme in Kombination mit mittelgroßer Windkraft?
10. Was sind die derzeitigen Hindernisse (politisch, technisch, gesellschaftlich, ökonomisch) für den Einsatz von mittelgroßen Windkraftanlage?

Englisch

1. Is the technical construction of mid-size wind turbines different from that of a megawatt-scaled wind turbine?
2. What are the minimum requirements in terms of wind speed, topography and space for the economically viable operation of your mid-size wind turbine?
3. Who are potential customers for your mid-size wind turbine? Which arguments/circumstances make the generation of energy from mid-size wind power attractive for the user?
4. What economic indicators can be expected an average of a mid-size wind turbine?
5. How high is the proportion of external purchased components in production?
6. To what extent do you undertake the evaluation, planning and necessary approval procedures for the future operator of your wind turbine?
7. How do the safety-related (shadows, ice shedding, audible noise/infrasound) and ecological requirements (nature conservation) affect the approval procedures for mid-size wind turbines?
8. Could medium-size wind turbines contribute to grid stabilization?
9. Are there examples of energy storage systems combined with mid-size wind power?
10. What are current obstacles (political, technical, social, economic) for the deployment of mid-size wind turbines?

12 Anhang B: Interview-Transkript

12.1 Interview mit Guschewski, Februar 2022

Vorstellen des Interviewpartners & Unternehmens:

Dieter Guschewski, CFO des Windtechnikanlagenunternehmens Windtechniknord GmbH. Wir sitzen ganz im Norden der Bundesrepublik Deutschland, in der Nähe zu Dänemark und stellen Windkraftanlagen in der Größe 250 bis 600 kW her. Die Anlagen betreiben wir auch selbst und wir haben Anlagen die zum Teil über 30 Jahre im Betrieb sind, direkt hier an der Nordseeküste unter schweren Bedingungen - also Salzwasser und schwere Winde – laufen die immer noch.

1. Frage

Unsere 250 kW Anlage ist eine Stall-Regulierte Anlage. Megawatt Anlagen sind Pitch reguliert. Das ist der Unterschied, der Rest ist eigentlich gleiche. Unsere Anlagen sind Getriebeanlagen also nicht die getriebelosen wie sie Enercon zum Beispiel herstellt. Dies hat auch vor und Nachteile, mit Getriebe sind Anlagen störungsfreier. Natürlich hat man ein Bauteil mehr, welches kaputt gehen kann. Enercon mit Ihren getriebelosen Anlagen zum Beispiel bauen keine Offshore Anlagen, weil das geht mit den getriebelosen nicht. In der 250 kW Größe sind alle Stall-Reguliert. Es gab mal einen Hersteller, der hat aber mittlerweile schon wieder Konkurs angemeldet, der hat eine Testanlage aufgestellt aber nicht mehr. Das war eine für den deutschen Markt konzipierte - auch 250 kW - aber von der Auslegung her, war das mehr eine 600-700 kW Anlage. Die war viel zu teuer. Das war eine Pitch-Regulierte Testanlage.

2. Frage

Optimale Windverhältnisse wären ständig gleichbleibende Windgeschwindigkeit, wie man sie in den Passatwinden hat. Bei der Mindestwindgeschwindigkeit von 3-4 m/s fängt die Windkraftanlage an zu produzieren, das bringt aber noch nicht so den wirtschaftlichen Erfolg. Bei Gegebenheiten von 5-6 m/s könnte man sie wirtschaftlich betreiben. Wenn die durchschnittliche Windgeschwindigkeit mehr ist, ist es natürlich besser, aber da fängt es eben an. Es gibt Schwachwindanlagen die für Gegenden konzipiert sind, wo der Wind sehr schwach ist. Die schalten aber früher ab, wenn der Wind höher ist. Aus Sicherheitsgründen schalten diese Anlagen dann ab und das ist bei kleineren Anlagen (nicht Schwachwindanlagen) auch immer später. Unsere Anlagen sind Klasse zwei Anlagen. Klasse drei wären ganz stark und Klasse eins sind für Schwachwindgebiete. Unsere Anlage hält sich in der Mitte auf.

Am besten sind die topografischen Gegebenheiten, wenn drum herum nichts vorhanden ist, d.h. keine Gebäude oder kein Wald. Also wenn der Wind praktisch frei auf die Anlage drauf treffen kann. Der Wind wird also nicht abgelenkt, das wäre optimal. Das Aufstellen von Anlagen liegt sehr stark von der Hauptwindrichtung des Gebietes ab. Das durchführen von Windmessungen, mindestens ein Jahr lang, ist am besten für die Festlegung des Standortes beziehungsweise der Hauptwindrichtung. 2021 beispielsweise war ein schwaches Windjahr, es war überall wenig Wind. So wie bei den Niederschlägen, wo es in manchen Jahren mehr oder weniger regnet gibt es auch Jahre in den Mal mehr und mal weniger Wind weht. Wir führen auch Messungen für den Kunden durch. Je länger man misst, desto besser sind die Ergebnisse, denn der Wind während dem Jahr ist unterschiedlich. Im Herbst und Winter sind eben die Zeiten wo mehr Wind herrscht. Im Frühling, Sommer ist weniger Wind in Mitteleuropa.

Bei Gebäuden in der Nähe sind flache Gebäude günstiger, da der Wind nicht/weniger abgelenkt wird. Daher baut man jetzt sehr gerne Windkraftanlagen auf der See. Der Wind wird prinzipiell negativ beeinflusst beim Auftreffen auf Gebäude. Wenn jedoch die umliegenden Gebäude nicht zu hoch sind, ist es trotzdem sinnvoll mittelgroße Windkraftanlagen aufzustellen, denn die Windbedingungen werden nicht nachhaltig beeinträchtigt.

Mittelgroße Windkraftanlagen werden primär zur Eigennutzung aufgestellt. Der dort produzierte Strom wird selbst verbraucht. Der Betreiber einer Anlage, wenn der eben auf einer Anhöhe liegt, stellt die Windkraftanlage möglichst nahe zu sich. Wenn der Betrieb im Tal stattfindet, kann das problematisch sein. Es gibt Täler, in denen der Wind durchgeleitet wird, durch die Berge ist es günstig. Es gibt jedoch Täler, da geht der Wind einfach drüber hinweg. In diesem Tal weht dann nicht viel Wind und es sind ungünstige Bedingungen, das würde sich dann nicht lohnen. Das muss eben festgestellt werden. Manche Täler fungieren als Schleusen, da weht der Wind immer durch, dies ist natürlich sehr vorteilhaft.

Mittelgroße Windkraftanlagen brauchen nicht viel Platz, man kann die direkt neben das Gebäude stellen. Man braucht zum Aufstellen einen gewissen Platz, der Kran muss stehen, der Rotor muss zusammengebaut werden. Für das muss natürlich Platz da sein. Ein Standard-Fundament ist ungefähr 9 mal 9 Meter groß und der Rohrdurchmesser ist 2,5 Meter. Das ist der effektive Platz, der eigentlich nur gebraucht wird, der Rest geht in die Höhe, also 30 oder 40 m, je nachdem welche Turmvariante ausgewählt wurde. Das stört ja keinen mehr.

Weitere Vorgaben sind abhängig je nach einzeltem Gebiet. Es gibt immer Quertreiber, die die Windkraftanlagen verhindern wollen. Wir wollen alle die Energiewende, nur nicht bei uns. Es gibt Leute, die sagen, dass es irgendwelche Vogelarten gibt, die dadurch erschlagen werden, obwohl mehr Vögel durch PKW's getötet werden, denn durch Windkraftanlagen. Normalerweise fliegt ein Vogel nicht gegen eine Windkraftanlage. Es kann natürlich mal vorkommen, genauso wie beim PKW. Fledermäuse sind auch ein Thema.

3. Frage

Kunden von uns sind Selbstverbraucher. In Deutschland bekommt man Anlagen leichter genehmigt, wenn sie unter 50 Meter Gesamthöhe hat. Da können wir mit einem 30 Meter Turm drunter bleiben. Es müssen mindestens 50 % des erzeugten Stroms selbst verbraucht werden, so ist es in Deutschland. Das Errichten einer Anlage ist auch sehr abhängig von den Stromkosten. Deutschland hat sehr hohe Strompreise, dies ist von Land zu Land sehr unterschiedlich. Im Vergleich zur Fotovoltaik brauchen mittelgroße Windkraftanlagen weniger Platz. Fotovoltaik funktioniert nur tagsüber und das auch nicht immer. Der Wind weht auch nachts, am besten ist Fotovoltaik und Windkraftanlage zu kombinieren. Die Verfügbarkeit der Sonne ist ein Nachteil im Vergleich zu mittelgroßen Windkraftanlagen. Anreize für Kunden sind also die Ersparnisse bei Stromkosten und dann haben wir auch Kunden, die gar keine Stromanbindung haben. Die haben dann praktisch ihr eigenes Stromnetz, vorher hatten diese Kunden Dieselgeneratoren. Der Transport vom Diesel fällt damit aus und Diesel wird ja jetzt auch immer teurer. Es gibt auch Gegenden, die können nicht immer Diesel bekommen, da sie so abgelegen sind. Sehr vereiste Gegenden in Russland, da kommen die LKWs nicht immer hin. Die mussten Diesel zuvor lagern, denn es gibt Zeiten, da bekommen sie keinen Nachschub. Solche Leute sind daran interessiert, dass sie überhaupt Strom bekommen. Die meisten Anlagen sind jedoch am Stromnetz angeschlossen und verbrauchen ihren Strom selbst und der Rest wird dann eingespeist.

In Großbritannien beispielsweise haben sie den Strom nicht selbst verbraucht, sondern ins Netz eingespeist. Es gab viel mehr Geld, wenn man ihn ins Netz einspeist, hat als selbst verbraucht. In Italien war das ebenso. In Großbritannien ist es jetzt auch nicht mehr so. Die hatten früher eine hohe Einspeisevergütung, sodass nur eingespeist wurde. Das wechselt jedoch immer. In Deutschland beispielsweise gab es einmal eine hohe Einspeisevergütung für Fotovoltaik, jetzt jedoch nicht mehr. Fotovoltaik Anlagen sind viel günstiger geworden, daher werden diese jetzt nur mehr für den Eigenbedarf verwendet. Genauso ist es mit den Windkraftanlagen, wenn die Einspeisevergütung hoch ist, dann sparst du natürlich. Das ist jedoch zurzeit nicht so.

4. Frage

Die Kosten der Kilowattstunde, welche kann nur anhand der Windbedingungen und der Betriebsdauer der Windkraftanlage bestimmt werden. Die ist für 25 Jahre ausgelegt, es gibt jedoch Anlagen, die schon 30 Jahre im Betrieb sind. Je länger die Anlage läuft, desto billiger

wird die Kilowattstunde, da man ja die Anschaffung nur einmal hat. Wir führen auch Wirtschaftlichkeitsberechnungen durch ab wann sich die Anlage bezahlt macht. Die Wirtschaftlichkeit hängt stark davon ab wie viel von dem Strom benutzt wird und wie hoch ist die Windgeschwindigkeit. Bei zehn oder zwölf Jahren bis zum Return on Investment werden Projekte durchgeführt. Je schneller das geht desto besser natürlich.

Es gibt jedoch Leute die gar nicht darauf schauen. Deren Hauptmotivation ist es grünen Strom zu produzieren. Wir haben einen Kunden in Südtirol, der hat eine Windkraftanlage die in den Bergen steht. Dort ist so gut wie nie Wind, trotzdem wollte er eine Windkraftanlage. Das ist ein Wahrzeichen des Ortes geworden. Die Leute schauen aus dem Ort auf die Windkraftanlage um zu wissen, woher der Wind kommt und wie viel Wind weht. Ein weiteres Beispiel, eine Supermarktkette wollte eine Windkraftanlage aufs Dach eines ihrer Geschäfte platzieren. Das haben wir nicht gebaut. Es ging dabei auch nicht darum Strom mit der Windkraftanlage zu produzieren, sondern es ging darum Aufmerksamkeit zu erregen. Dies wäre ein Projekt aus reinem Werbezweck gewesen. Eine Fachhochschule in Südkorea wollte eine schöne Windkraftanlage direkt neben der Schnellstraße hin bauen und das wichtigste an dieser Anlage war der Turm. Da sollte Werbung für die Schule drauf. Die Leute die auf der Schnellstraße vorbei fahren sollten auf den Turm schauen, daher wollte man keine zu große Anlage verwenden. Strom sollte diese Anlage auch erzeugen aber nur für die Strahler, welche die Straße beleuchten. Damit man eben auch nachts lesen kann was auf der Anlage draufsteht. Bei diesen Projekten sollte es nur darum gehen zu zeigen, dass diese Schule oder Supermarkt nachhaltigen und grünen Strom erzeugt und verbraucht.

In der Vergangenheit tendierten Landwirte zur Verwendung von unseren Windkraftanlagen, da diese den Platz besitzen. Mittlerweile haben wir alle möglichen Kunden. Sämtliche Industriezweige in denen die Unternehmen nicht zu groß sind. Einem Automobilhersteller würden unsere Anlage nicht ausreichen, der hat einen viel größeren Strombedarf. Da würde eher zu einer größeren Anlage oder mehreren Anlagen tendieren. Die Größe des Betriebs muss schon zu unseren Anlagen passen aber die Branchen sind breit gefächert, wenn sie in ihrem Industriegebiet unsere Anlagen aufstellen dürfen. Wenn Wohngebäude in der Nähe sind müssen Abstände wegen Lärm und sonstigen Belästigungen eingehalten werden.

Anfang der neunziger haben wir auch 6-10 Anlagen auf dem Platz gestellt aber das waren die Anfangszeiten, die Anlagen war nicht größer. Jetzt stellen wir maximal drei auf, theoretisch können wir auch mehrere aufstellen aber da ist es günstiger für die Kunden größere Anlage aufzustellen. Die größeren Anlagen sind hochgerechnet auf die Leistung günstiger. Mittelgroße Windkraftanlagen werden je nach Strombedarf und Genehmigung in Bezug auf die Höhe ausgewählt. In Deutschland gelten andere Bestimmungen bei Anlagen über 50 Meter und deswegen entscheidet sich Kunden manchmal für zwei kleine Anlagen anstatt einer große, weil sie die große nicht genehmigt bekommen.

Die Rechtslage beziehungsweise Genehmigungen in Europa können von Land zu Land völlig unterschiedlich sein. Es gibt sogar in den Landstrichen unterschiedliche Vorgehensweisen, auch in Deutschland und in anderen Ländern.

In einigen Gegenden ist es willkommen und in Anderen sind sie eben gegen Windkraftanlagen. Frankreich ist sehr schwierig da die französischen Energieunternehmen das alleinige Sagerrecht haben. Frankreich hat beispielsweise eine Insel im Atlantik, wo die Bürger eine Windkraftanlage haben wollen und dafür gekämpft haben. Schlussendlich hat sich die Bürgerbewegung im Kampf gegen das französische Versorgungsunternehmen EDF durchgesetzt und das Aufstellen von mittelgroßen Windkraftanlagen ermöglicht.

Unsere Anlagen werden jedoch hauptsächlich an private Unternehmen verkauft, dennoch haben wir auch Anfragen von Gemeinden wie in Südamerika wo das Stromnetz noch nicht vollständig erschlossen ist. Dieser Faktor spielt in Europa keine Rolle, da hat jeder Strom. Die erwähnte französische Insel hat ihren Strom vor dem errichten der Windkraftanlage mit Dieselgenerator erzeugt.

5. Frage

Wir lassen den Turm nach unseren Berechnungen extern fertigen und auch auf die Blätter werden gefertigt. Das sind aber unsere Formen in denen die Blätter hergestellt werden, die Gondel bauen wir hier. Transport und Montage machen wir auch. Weitere elektrische Bauteile werden, wie bei allen Windkraftanlagenherstellern, extern zugeliefert.

6. Frage

Im Ausland machen wir das nicht, da kennen wir uns ja gar nicht aus mit der Rechtslage. Es gibt Leute vor Ort mit denen wir zusammenarbeiten, beispielsweise anderen Partnern im Ausland. Im Ausland macht der Betreiber das Genehmigungsverfahren zum Teil selber, je nachdem. Wir stehen natürlich begleitend zur Seite und beliefern die benötigten Daten. Messungen können wir auch durchführen, wenn gefragt. In Deutschland fangen wir gerade an das Genehmigungsverfahren auch zu übernehmen. Jahrzehntlang haben wir in Deutschland keine Anlagen aufgestellt, sondern nur im Ausland. Ganz am Anfang haben wir in Deutschland mittelgroße Windkraftanlagen aufgestellt, doch der Markt war dann weg für unsere Anlagengröße. Windkraftanlagen sind immer größer geworden. Zurzeit, haben wir unglaublich viele Anfragen aus Deutschland und wir werden uns auch mit dem Genehmigungsverfahren in Deutschland befassen. Wie gesagt, in Deutschland ist es auch nicht so einfach. Es kommt praktisch auf den Sachbearbeiter an den man bekommt. Ob der für Windkraft ist oder eben nicht. Es können einem dadurch beim Genehmigungsverfahren viele Steine in den Weg geräumt werden. Durch die steigenden Strompreise macht es aus wirtschaftlicher Perspektive mehr Sinn mittelgroße Windkraftanlagen zu installieren.

Wir hatten 21.12.2021 in Deutschland an der europäischen Strombörse den höchsten Preis der jemals verzeichnet worden ist, das ist nicht allzu lange her. Unser größter Markt in den vergangenen Jahren war Großbritannien und Italien. In Großbritannien wirkte sich natürlich der Brexit auf unsere Marktlage aus. Der Einspeisetarif ist jedoch schon davor gesunken. Wir hatten eine Tochter Firma in Großbritannien die wir vor dem Brexit verkauft haben, da wir wussten, dass der Brexit kommen wird. Unseren Kunden in England stehen wir noch immer zu Seite und verkaufen beispielsweise Ersatzteile aber es ist aufgrund der politischen Situation schwieriger geworden.

7. Frage

Die Richtlinien in Bezug auf den Schattenwurf sind gleich wie bei großen Anlagen. Große Anlagen werfen einen viel weiteren Schatten, da sie viel höher sind, das heißt ein viel größerer Bereich kann vom Schattenwurf betroffen sein. Es gibt jedoch auch Urteil in Deutschland die miteinbeziehen das der Schattenwurf nur zu bestimmten Jahreszeiten und bestimmten Uhrzeiten entsteht und das auch nur für kurze Zeit. Von daher wird es noch immer berücksichtigt aber ist nicht mehr so wichtig in Deutschland. Der Schattenwurf kommt früh morgens oder spät abends und da auch nicht das ganze Jahr lang, da die Sonne immer unterschiedlich hoch steht also auf diesen betreffenden Punkt. Schatten betrifft längst nicht so lange viele Leute, daher kann man dies nachlässigen. Bei der Errichtung einer Anlage schauen wir aber natürlich trotzdem wer im Umfeld durch den Schatten betroffen werden könnte.

Beim Eisabwurf können wir die Anlage abschalten lassen, wenn es ein Problem gibt. Man kann Sensoren anbauen, die erfassen, dass sich Eis am Blatt bildet und es schaltet die Anlage dann ab. Das kann man mit einbauen lassen. Dies ist eine Option, falls Eisabwurf ein Problem darstellen könnte. Durch dieses nachrüsten würde die Anlage eben nicht laufen bei Vereisung. Im Falle einer Gefährdung durch Eisabwurf für Personen oder Mitarbeiter würde die Anlage dann abgestellt werden. In Großbritannien haben wir zwei Anlagen auf einem Parkplatz aufgestellt, das heißt da war vorher kein Parkplatz und hinterher wurde es ein Parkplatz. In England ist der Winter nicht so stark aber dort gibt es auch Tage an denen es Frost und Eis gibt. Die Windkraftanlage steht auf dem Parkplatz wo Autos stehen und Leute gehen. Beheizbare Rotorblätter bieten wir jedoch nicht an. Wir bauen jetzt eine Anlage die am Eismeer stehen soll, da interessiert es beispielsweise keinen ob Eis abgeworfen wird. Unsere mittelgroßen Anlagen laufen im Winter meist durch, auch wenn Veränderung der

aerodynamischen Verhältnisse, verursacht durch das Eis an den Rotorblättern, die Leistung verringert. Im Winter ist ja auch mehr Wind. Der Wind ist stärker und von daher gleicht sich das aus. Unsere Anlage erreicht bei 14-15 m/s ihre Nennleistung und wenn der Wind stärker ist – im Winter schon mal 18-20 m/s - und Eis auf den Rotorblättern wäre, gleicht sich das in etwa wieder aus.

Wenn man vor der Windkraftanlage steht ist sie sehr leise, der Schall wird ja weggetragen. Hinter der Windkraftanlage kommt der Schall an, da ist es laut oder lauter. Ein Unternehmen würde die Anlage so hinstellen, dass die Hauptwindrichtung in Richtung des Unternehmens ist, so dass der Schall in die andere Richtung geht. Es gibt eine Schallgutachten von unserer Anlage das angibt wie viel Schall produziert wird, das wird in allen Ländern gefragt. Da muss man eben so und so viel Abstand zu Wohngebieten halten.

Wie sich Schall oder Schattenwurf auf ein Unternehmen auswirkt, spielen beim Entscheidungsprozess weniger eine Rolle. Dies würde eher auf privat Personen zutreffen, die eine Anklage erheben.

Beim Naturschutz kommt dazu dass große Windkraftanlagen die Landschaft verschandeln, weil diese von weitem sichtbar sind. Das ist jedoch ein subjektives empfinden der Leute und darüber wird in Gerichten gestritten. Die Personen wollen dann beispielsweise Wald und keine Windkraftanlagen die oben raus schauen. Unsere Anlagen könnte man nicht an einen Wald bauen, da die Bäume zu hoch wären. Wenn Anlagen in einem Gewerbegebiet gebaut werden, müssen die Leute damit leben. Ein Gewerbegebiet unterliegt bestimmten Bestimmungen und ist es erlaubt eine Windkraftanlage hinzubauen, es sei denn es wohnt jemand zu dicht an dem Gewerbegebiet. Im Gewerbegebiet muss man mit einem hohen Geräuschpegel leben, da kann ja alles Mögliche an Gewerbe stattfinden. Prinzipiell müssen Anlagen die unter 50 Meter im Gewerbegebiet errichtet akzeptiert werden.

Wie diese Regelung in anderen Ländern ist weiß ich nicht, das müsste man sich anschauen. In England beispielsweise war die Beschränkung auf bis zu 500 kW, also auf die Leistung bezogen. Das Bauen von höheren Windkraftanlagen macht da auch weniger Sinn, da die Windgeschwindigkeiten weiter oben zu hoch sind und die Anlage sich aufgrund von Gefahr abschaltet. Die Genehmigung in England haben wir aber nicht gemacht.

8. Frage

Mittelgroße Windkraftanlagen tragen genauso wie große Anlagen zur Netzstabilität bei, nur in kleinerem Rahmen. Sie erzeugen zwar nicht so viel Energie aber stützen das Netz dennoch. Der Betreiber einer mittelgroßen Windkraftanlage belastet nicht das Netz, da er den produzierten Strom für sein Betrieb verwendet. Normalerweise hängt die Windkraftanlage auch mit am Netz und speist ein. Ob der Betrieb nun wirklich seinen eingespeisten Strom benutzt steht auf einem anderen Blatt. Wie alles was ins Netz einspeist stützt Windkraft auch das Netz, wenn irgendetwas ausfällt müssen eben andere Geräte wie zum Beispiel Biogasanlagen oder sonstiges eingreifen.

9. Frage

Speichersysteme haben wir noch nicht gebaut, jedoch gibt es diese Möglichkeit. Das Aufstellen von Speichersysteme liegt aus wirtschaftlicher Sicht wieder am Energiepreis für Unternehmen. Bei unseren Projekten wurden bis jetzt noch keine Speichersysteme angefordert, wir könnten das jedoch über Partner Firmen realisieren. Solche Sachen sind sehr abhängig vom Strombedarf des Kunden. Wie viel braucht er? Wie viel nimmt er ab? Auch wenn unsere Anlage viel Strom produziert, nimmt er vielleicht trotzdem alles ab. Das muss man prüfen, es gibt zum Beispiel auch Betriebe die nachts gar nicht arbeiten. Die Windkraftanlage arbeitet aber trotzdem weiter, da macht es sicherlich Sinn den Strom zu speichern. Das müsste man wie gesagt sehen, wie das im Einzelfall so ist. Bei Speichersysteme müssen wir auf Partner verweisen.

10. Frage

Es gibt Hindernisse da es Leute gibt die Windkraftanlagen eben nicht wollen. Windkraft ist zwar ganz toll aber woanders, nicht hier. In Bezug auf Förderung gab es in Deutschland das EEG, das läuft jetzt aus. Solche Förderungen gibt es nicht mehr. Der Strompreis steigt beziehungsweise ist stark gestiegen. Wie gesagt, wir haben ganz viele Anfragen aus Deutschland und wir werden in den nächsten Jahren Vollbeschäftigung haben nur um in Deutschland Anlagen zu produzieren. Die Genehmigung in Deutschland dauert fürchterlich lange. Die Grünen sind jetzt mit in der Regierung und die wollen das ändern, also dass die Genehmigungsverfahren schneller gehen. Wie lang dauert jedoch diese Änderung? Das macht es schwierig. Das Genehmigungsverfahren für Standorte an denen noch keine Windkraftanlage stand dauert einfach sehr lange. Die Genehmigung kann sich in manchen Fällen sehr in die Länge ziehen. Das muss nicht sein, ist jedoch leider häufig so. Das kostet Nerven und es kann natürlich sein, dass beim Warten die Preise steigen. Wir hatten jetzt gerade eine unheimliche Preissteigerung bei allen möglichen Rohstoffen als die Corona Pandemie nachgelassen hat.

Wir haben ein Nischenprodukt mit unseren mittelgroßen Anlagen. Wer die Möglichkeit und den Platz hat baut Megawatt-Anlagen um möglichst viel Strom fürs Netz zu produzieren. Es gibt aber noch genügend Beispiele wo dies nicht der Fall ist, die das eben nicht können, die etwas Eigenes haben wollen, ihren eigenen Strom.

Abschlusskommentar:

Es gibt sehr wenige Firmen die mittelgroße Windkraftanlagen vertreiben, da es nur wenig Nachfrage gibt, in Deutschland kommt diese Nachfrage wieder zurück aufgrund der hohen Energiepreise. Man hat Megawatt Anlage aufgestellt und nicht die kleinen. Für kleine Unternehmen ist Fotovoltaik einfacher und große Betriebe haben oftmals zum Beispiel auf großen Hallen genügend Platz für Fotovoltaik. Das ist natürlich viel einfacher aber mehr Strom kann man mit Windkraft generieren und natürlich 24 Stunden am Tag, das natürlich nicht immer da der Wind nicht immer weht, theoretisch ist es aber möglich.

12.2 Interview mit Vales, März 2022

Introduction of the Interview-partner & company:

I am Éric Vales at Vergnet for fifteen Years, I am a trained mechanical engineer and worked before for many companies specialized in heavy equipment and I joined Vergnet as a mechanical engineer. Now I am a product manager for wind turbines and I am in charge of developing a new turbine for medium capacity. We specialize in medium size wind turbines, historically when we started to do wind turbines 25 years ago it was only the French electrical utility company that was allowed to install wind turbines on the mainland and so they said if you want to install wind turbines you have to do so overseas, in the Caribbean for example. That's what we did. As you know, in the Caribbean the main problem are the tycoons and hurricanes. You also don't have big cranes over there, so it is not easy to install wind turbines. That is the reason why we developed a tilting turbine that could be secured on the ground when the hurricane comes and also makes it easier to be installed without big equipment.

The market initial was for isolated areas mainly, our biggest market today was the French Caribbean so in the Pacific Ocean and Caledonia. We have big farms over there. We also have some turbines in Japan and in India. We got turbines in Chile and in Puerto Rico and so on.

We had some markets in Europe, Great Britain and also Italy. It was a niche market because there was some nice electricity prices for buying wind turbine electricity. This is not the case anymore in the moment the market shut down for us. We think still there is a market for medium sized wind turbines in Europe, maybe in France but especially with geopolitical problems today because of electricity prices we are thinking about using wind energy to produce gas (power to gas). Because of the gas prices even before the Ukrainian war were increasing steadily, I think there will be a market for that.

1. Question; Adding to Question: Reason for using wind turbines with two blades?

The two blade decision was a consequence, at least at the time (referring to two online case studies of Vergnet, where they used the GEV MP model wind turbine which has two blades), for the cyclic system, when you tilt the turbine on the ground it is easier to put it on the ground with two blades because you got one blade less and it is easier to secure. So that's the main reason, otherwise there is no reason for using two instead of three blades.

Wind turbines are comprised of many many technical things and we wanted a light turbine. So we had this two bladed turbine because medium sized wind turbines with two blades are lighter. For tilting the turbine we needed a light nacelle. This makes it lighter but a bit more complex technically. And also, we got a turbine that is downwind that means that the rotor doesn't face the wind. When the wind comes it sees the mass first. But it is mainly for weight reasons.

Our turbines are pitch regulated. I am developing a new wind turbine today that is exactly the same technology of big turbines. There is no difference, modern midsize wind turbines are just smaller in size. What we call midsize today were actually the big sized wind turbines in the past. There are the same constraints for the production, so we need the regulations. Therefore we need a pitch for the performances, we need an inverter and so on. The specifications/regulations for the conception are the same and the certification is also the same. We use the same standards like big wind turbines.

Regarding costs, the main problem for a smaller wind turbine is maintenance because you need a lot of staff for the maintenance. If you go to maintain ten smaller turbines it is roughly ten times the cost of the maintenance of one big turbine, in terms of personnel costs. For spare parts it's not the same of course, but in terms of personnel cost it is much higher.

2. Question

The key difference is the height of the tower in comparison to big wind turbines. The biggest problem with wind turbines is wind turbulence, that is what makes wind turbines wear off more. If you got a very steady wind the wind turbine doesn't wear off very much and doesn't suffer very much. If you got turbulent wind, it makes the wind turbines suffer so obviously the turbulence is less if you go higher than when you are lower on the ground. The problem with small turbines is to resist to higher turbulences than big turbines. The classes are the same.

The biggest problem for installing a turbine is to have a good assessment of the wind. To do that you got to put a wind mast and have a recording of the wind. Of course, if you want to install a small turbine you want to cut the costs and don't always have the good wind there. That's what I said before, the main problem for a turbine is the turbulence. If you have buildings, if you have a forest, if you have something like that you have higher turbulences. You have to be sure that your turbine can resist the turbulences and it also could be a problem for the noise.

The optimal wind speed is the same as for big ones, so 6.5 meters per second, this is the best case. Depending on the feed-in tariff it can also be interesting to build a turbine if the wind speed is a bit lower than 6 meters per second but the soft spot is about 6.5 to 6.8 meters per second. There's no difference between two or three bladed wind turbines regarding the wind speed.

3. Question

Customers by the means to produce electricity at a certain cost, that's the thing. If they got good wind they will probably install a wind turbine, if they got sun resources they will install a solar panel, I think it is like that. It really depends on the production means.

I don't think that our customers are activist for green energy. Sometimes they have energy problems so they won't produce energy at a lower cost than they are buying from the grid, or otherwise there are good feed-in tariffs. All our customers in Europe are connected to the grid.

4. Question

The kilowatt hour cost really depends on the wind resource, this is really sensitive. The power of the wind turbine goes with the cube of the wind speed. The decision to acquire a wind turbine really depends on the customer. For example, we had a guy last week who has a biogas system and he needed something to produce a megawatt hour for ten euros. So it is difficult to answer your question. We had customers who had really good feed-in tariffs, they used turbines with not so much wind and they had a good return on investment. Others had a very good wind and also good return on investment but the price was not so high.

The market for midsize the wind turbines in Europe is quite difficult because we had no market for a long time. We had some opportunities about ten years ago because of good feed-in tariffs. But afterwards the feed-in tariffs were no longer available, so we had no other possibilities. Government support for wind turbines also came through feed-in tariffs. The past the feed in tariff was very high, this was an incentive for midsize wind turbines and I think they also got some tax reductions for their investments.

Today we think that there may be possibilities again because the energy prices are increasing. But we aren't really sure yet. What we need are also regulations that are lighter for the wind turbines, especially in France if you want to install a wind turbine it's a nightmare because you got to do studies over studies which is very expensive. We got an opportunity now for building wind turbines that are lower than 50 meters. It is easier to install turbines in this framework but I am not really specialized on this subject. I'm not sure how it is in other countries but I think the limit is also about 50 meters.

5. Question

At Vergnet we produce the blades at our facility in the south of France. Otherwise we buy all the main components so the structural component specific to the wind turbines. We don't have factories where we do some welding and building and so on. We subcontract all the fabrication

of the parts, the frames and so on and we assemble the components in our facility here in France. We ship the nacelle overseas and make the towers sometimes in China or somewhere else and ship them to our customers around the world.

We basically subcontract the production of the single parts and assemble them at our facility and then send them to our customers. The certification is being done during the design phase with people like DNV. They help us to follow lots of specifications and parallel, if you work with the DNV, they check if we respect all the specifications. Afterwards we do a prototype and we you do some measurements on the prototype. The results of the measurements are being checked by sensors on the prototype according to your calculations for performance for example. Afterwards they give you a certification that your turbine is fit for purpose. When you then build your wind turbine you just make sure you follow the rules – check your quality control and make sure that you produce your turbines according to how they have been designed - and you don't have to certify each turbine. Certification is very important for the customer for the investments. The banks require a certification to make sure that the turbine is fit for its purpose.

6. Question

The planning we don't do, we don't develop the projects. We can do EPC, that is engineering, procurement and construction as well as the maintenance but we don't do the development of projects. The legal approval procedures are part of the development as is the finding of the land, getting the approval for the building and to make sure that you get your feed-in tariff and the financing and many other different things.

7. Question

Same way they do big ones, we have to follow the same rules. For medium sized wind turbines the studies are not so deeply done yet. We have to produce the same data for noise for example.

Frost is really a problem because if there is ice on the blades obviously it can be a hazard for the neighbors. In central Europe it is not such a big problem for the mechanical strength of the turbine. It's a very big problem in places with very low temperatures like Alaska or Russia. There it can affect the strength of the material but this is not the case in Europe. If you don't go below minus 20 degrees it's not a problem. You've got to make sure you don't have too much snow or ice on the turbines before starting because otherwise it is not a big problem in central Europe. If you got ice on the blades and you start the turbine you can project ice far away. If there's too much ice on the blade in general we stop the turbine.

Our customers are mainly farmers and we never had a case that our turbines where a problem for animals. We also never had problems with shadow, the only problem we had was with noise. We had to take some conservative measures to be able to reduce the power of the turbine when the wind was coming from certain directions or to shut down the turbine if the wind came from certain directions. That was the only case.

8. Question

This is very interesting but a bit tricky because it is a distributed production. It is very interesting to have some production on different points of the grid that are a bit weaker. We have to talk about the connection study. Depending on where you put the turbine on the grid it can affect the grid in a good or in a bad way. If you got a very long line for example in the country you got some transformers for the lines and if you got a very long line this is connected to a village or something you have a higher voltage on the distribution line. If you put a wind turbine far away on the line, you will have a higher voltage also on this point and that can affect the customers. It can be interesting for the utility to have some distributed energy production. It can help the utility to stabilize the voltage but you have to have a connection between the utility and the wind turbine, so you got to work on reactive power.

- Extra Question: How high has the energy demand have to be so it makes sense to buy a midsized wind turbine?

It really depends on the scheme. If he is not allowed to sell energy he has to use almost all of the energy produced by the turbine. If he is allowed to sell on the grid maybe it's not the same tariff but it will help for the return on investment otherwise it is only to sit on the grid. I cannot answer a question like that. It depends what is the tariff, what is the energy cost and what is the energy produced by the wind turbine. This is the study we have to do on each site.

9. Question

I don't know of any installation with storage in Europe. We had some storage in batteries in Africa but I don't see any reason why we should put storage near a wind turbine. If I need some storage you can put it on the grid.

Forms of storage for the grid are too expensive and the amount of storage you need to store even one megawatt from wind production is huge. It's a huge expense and will not be allowed to be done for a farmer or something like that, too expensive.

10. Questions

The reason why they're not so many midsize Wind turbines is what I told you before, it's because the study for one big turbine is almost the same amount of work as for farm of 10 or 20 mid-sized wind turbines. The investment cost is almost as and the maintenance cost is also higher. The main reason is cost and that's also the reason why turbines are bigger and bigger, it's because of cost.

- Extra Question Why are your midsize wind turbines more successful outside of Europe than in Europe?

The midsize wind turbines I have been talking about are installed on islands mainly and most of the time in cyclonic islands or at remote places. In Africa we build some turbines because for maintenance we can tilt the turbines and for the installation we don't need big cranes and the transport is easier. We are shipping the turbines in containers, except for the blades, it's easier so to ship them abroad. But that are the only reasons.

12.3 Interview mit Overpelt, März 2022

Introduction of the Interview-partner & Company:

My name is Sjoerd Overpelt, I am a project developer for Wind Energy Solutions shortcut WES. We develop projects with midsize the wind turbines for mostly farmers, industrials, islands or investors. Our focus at the moment is Europe but in the past we also sold turbines to other parts of the world like for example Canada, the Middle East, North Africa and also Tunisia so south east Asia.

1. Question

The biggest difference in my opinion, but I am not sure if that is in fact for all the megawatt wind turbines is that we still used a so-called gearbox our turbines. I do think that a lot of megawatt scaled wind turbines are direct drive. I do know for example Enercon, which is a German manufacturer for megawatt turbines that uses direct drive but I am not sure. Vestas or Nordex are also using direct drive but we still use a gearbox in our turbine. To answer the question why we use a gearbox I have to start with some basic information. Our turbines so the WES turbines are based on the Lagerwey technology which is a technology that exists since 1983 and back in the days in the 80s it was one of the bigger commercial wind turbines but then as you can imagine everything was scaling up so in 1982 a 80 kilowatt turbine was a big turbine and the owner of Lagerwey wind energy used a gearbox and we never actually change the mechanical technology. So we bought the IP's somewhere in 2001 or 2002 and Lagerwey went into the megawatt wind turbine segment and we bought their IP's (internal

patent) from the 80 kilowatt to 250 kilowatt turbine. The technology we use nowadays is already more than 35 years old. Why do you use it? Because it's proven technology, the lifecycle is proven as well. Most of the WES turbines or former Lagerwey turbines are spinning for more than 25 years. It is a turbine that needs maintenance twice a year, mostly preventive maintenance but the mechanical technology itself has proven itself. That's why we have never changed anything about the mechanical structure of the turbine itself. Everything we changed are the electrical parts so we nowadays use the most modern converter technology etc. but the whole mechanical technology from the turbine itself is still the same as it was in the 80s or 90s. Some parts might have changed we use modern bearings but the basic technology is still the same as it was in the 80s, 90s until the early 2000s when Lagerwey went into administration and then we bought their IP. Before WES had the Lagerwey technology we already did maintenance and installations for other turbine manufacturers. So we already knew everything about the technology and when we had the chance to buy their IP we bought their IP's and from there on we manufactured and assembled the turbines our self and we owned the turbine technology IP. IP is short for intellectual property, so that's the owner of the technology itself and it basically means that other turbine manufacturers cannot use your technology) a lot of questions about the two blades because everywhere we go people say why two blades because now it's very common to use three blades but we still use it. The thing with two blades is that when you compare them to a three bladed rotor, when the rotor size is the same a three bladed rotor will have about two or three percent more production in kilowatt hours during the whole year but for the extra production you also need an extra blade which is an extra investment and you also have higher maintenance cost because you have to maintain three blades instead of two. I think the only reason why turbines nowadays or three bladed is because the visual aspect is different than when it comes to a two bladed turbine. So there is a lot of local governments, where we also are aware of, they like three blades better than two blades because the visual rotation of a two bladed turbine is different than a three bladed and our turbines have a higher RPM in general, so the number of rotations per minute is higher than a three bladed turbine. So it looks a little bit more nervous when a two bladed turbine is spinning. We have a short video that shows two turbines, one with two blades one with three blades, same height and same rotor size and they're spinning next to each other. And then you can see the difference. I think it's all about perception because I don't think a two bladed turbine is more nervous than the three bladed turbine. I might not be totally objective about that because I work for a two bladed turbine manufacturer. Nowadays I do think when it comes to offshore turbines there are still a lot of innovations with mega wide turbines with two blades. Customers need to get used to the two bladed turbines sometimes but the main issue about the turbines is that it does what it is designed for and that is producing electricity so we can also guarantee our power curve for example the power curve shows you at what windspeed a certain power is there and of course we have customers who say ok, we are aware of the fact that a three bladed turbine has a much more relaxed visual rotation than a two bladed wind turbine but we are absolutely 100% sure that the two bladed turbine does what it is designed for and that is the production of renewable energy. When it comes to maintenance, a two bladed turbine needs less maintenance cost than a three bladed turbine. When you got the Nacelle itself, two blades weigh less than when you have three blades so all the materials behind the rotor suffer more with a three bladed turbine because the amount is resting on the nacelle. Therefore we can assure a longer lifetime. Our turbines, WES turbines or Lagerwey turbines, I think at least 50% of our turbines are already spinning between 25 and 30 years in lifecycle. In general, we always measure and calculate with 25 years but when it comes to the turbines in the field itself, most of them are spinning between 20 to 30 years already.

2. Question

When it comes to topography it is much easier to get a permit as well when you are very far away from urban areas, so when it comes to permitting it's always an advantage for example to go to agriculture space because there's always a lot of space and not a lot of houses which can make objections against a permit but when it comes to production, it's a fact that when

the environment of the turbine is very flat it's very good for the turbine because there is not a lot of objects that can create turbulence. Why do you say turbulence? Turbulence can create more maintenance cost and when the turbulence is low. It's the same story with airplanes. The turbulence around the airplane makes everything shake. It basically works the same for wind turbines. Turbulence can be created by high trees or high buildings in the close surroundings then there is a lot of turbulence on the turbine. Things in the top of the turbine, in the nacelle, are starting to shake as well and it's not even a production issue but it's more for the materials in the Nacelle itself. There will be more damage in short term and you will need to do more maintenance and more corrective maintenance as well after a couple of years. When it comes to the location of the turbine it's ideal to build them close to a coastline because there the wind is in general very good. In our province in the Netherlands, in North Holland we have a location that is very flat and it is near the coast line, there are no trees, only fields and the wind is coming in from the sea and there's no trees or high stables or high buildings that could create turbulence in the wind. That would be the best but for example we also have two turbines on an island in the Caribbean, British Virgin Islands, they are basically standing between two hills and the wind direction is almost always the same. So it is almost like a wind tunnel over there. So these turbines are spinning almost at an average wind speed of 30 km an hour that is about 8 meters a second which is very high for low wind turbines. There it's different, you've got hills in the surroundings but the wind direction is always the same so when you put them over there and the wind is always coming from that side it's perfect.

When you build them closer to a business you have to make sure that the buildings are not higher than 10 or 12 meters and to make sure that the small wind turbines will be at least 24 to 30 meters. If you want to install a turbine next to were agricultural farms for example then you need to make sure that the stables are not too high and that the farm itself is not too high and you always have to make sure it's located on the right wind direction because for example in the Netherlands the most time the wind direction is southwest so you have to make sure that the turbines is pointing southwest because then it is the most efficient when it comes to production hours.

3. Question

Farmers are the biggest customers but we also sell turbines to islands all around the world. Why islands? Because most of the time they're conventional way of producing energy is quite high because a lot of times they use diesel generators for example and diesel nowadays is very expensive. We can make a hybrid solution for example a wind diesel solution, so the diesel generator is always standing by because diesel generator is creating the grid of the island but the wind turbine is mainly feeding the grid with their own production, so yes islands, agriculture farms but also industrials. In the past we also sold to water desalination companies, there is one in Scotland I think. At the moment I am doing a project in Belgium with an industrial company it is actually a big company that makes concrete. And for example in Italy and Greece we sell a lot of turbines to investors. So the investor is basically paying for the turbine itself, they have a feed-in tariff, that means every kilowatt hour produced and feed into the grid is subsidized with a certain amount of money and the only thing they actually buy are the farmers because most of the time the turbines are on the land of a farmer. They give the farmer an annual fee, only thing the farmer receives is an annual land lease, he does not need to invest anything else, he just receives money for his lands and the investor is actually the one who is buying the turbine from us and their payback period is based on their so-called incentive program this is a feed-in tariff.

They are not building megawatt turbines because of objections from the same area, there are a lot of people who don't like megawatt turbines because in general they are very high and you can see them from all spaces and one other important reason is that the grid in these areas is not suitable to install megawatt turbines. The grid is not able to receive and transport the power that is produced from megawatt turbines. They can adopt 100 kilowatt turbines and the grid is very unstable and thin over there. For example, in the Netherlands we have a very

stable grid, it's very reliable and there's almost no provinces in this area where you cannot inject energy with mega turbines but for example in the south part of Italy or on Greece islands the grid is very old-fashioned and sometimes it's just not of high-quality. It cannot adjust to megawatt turbines and then there are two possibilities either you make a whole new grid but this is very pricey of course or they create a possibility for lower power output turbines for example 100 kilowatt turbines, they are very easy to adapt to that kind of grid and they are also very small, so when it comes to the landscape etc. it's easier for the people who live there to adopt them as well.

The concrete factory I was talking about before is using 500,000 kilowatt-hours a year, one of our turbines can create or produce around 300 to 400,000 kilowatt-hour per year. So basically between 60 and 80% is coming from wind production. Besides that, they will not receive a permit for a bigger turbine because also in Belgium they are very strict when it comes to permits for wind turbines and at the moment there is also a suitable incentive program in Belgium that gives, for example concrete companies the chance to get a very lucrative incentive. For example, the investment might be half 1 million and some part will be subsidized from the government. My main focus at the moment is Belgium and Netherlands because there is a big market in these two countries but we have projects all over the world but our main focus for projects is in Europe because the maintenance, transportation and logistics is easier.

4. Question

Basically, you have to compare it to your price for energy, for example if you are a farmer and you just buy your energy from an energy supplier from the grid and there is a certain amount of price you pay to the energy supplier, that is a very important parameter.

Of course you need a location with the wind, because if there's no wind there's no production and then there will be no profit. There needs to be a policy from a government or local government that allows to get a permit for a wind turbine because without a permit it is not possible to install a turbine. A turbine has a certain amount of production per year, the more energy you use from the turbine for your own company the better because that's the part of energy you don't have to buy from an energy supplier. So for example, when you produce 400,000 kilowatt with your wind turbine it is very good if you can use 60 or 70% for yourself and the rest is sold to the grid for a certain amount of money. The more you use from your turbine the less you have to purchase.

The return on investment in the Netherlands is mainly between 6 to 8 years depending on the wind location, wind speed, current energy consumption and current energy prices. It also sometimes depends on if there is a good incentive program because the payback time of chorus would be shorter. So in between six and seven years is in general possible if it comes to midsize wind turbines. And sometimes longer and we had customers who said it more than 10 years are also acceptable. Of course you have to keep in mind that the lifecycle is between 20 and 25 years that we can guarantee and if the payback time is then more than 10 years it will probably be bit long for some investors but nowadays in the Netherlands and all around the world the energy prices go up, also because of the situation in the Ukraine, it is very profitable to buy a midsize wind turbine and create your own energy. It's not only that they want make profit from it but it's also because they can be independent for a big part when it comes to energy consumption and some customers also have a renewable ambition, they want to make sure that their company uses renewable energy. It's a combination of profits renewable ambition and independence, that are the three big biggest incentives. Of course you also have to have a permission to build a turbine and a permission that allows you to be connect to the grid because when the turbine is producing more energy than you use in your own company also needs a possibility to feed it into the grid and sell it to an energy supplier.

5. Question

The turbine has five main components: tower, blades, control cabinet, nacelle, rotor head

The nacelle, the rotor head and the control cabinet - the brain of the system - are all produced in the Netherlands and also assembled in the Netherlands over here in our factory. But the tower and the blades are made by different companies because they're specialized in that kind of manufacturing. So the tower and the blades are western European products but not assembled in the Netherlands. In the past it was created in the Netherlands, nowadays we are also looking for a partner in Italy because a lot of purchases are in Italy so when it comes to logistics it is easier to have a manufacturer of your towers closer because the installations will also be in Italy for example. It really depends where the market is at the moment because you have to keep in mind that the wind turbine has to be transported and then it is very easy when the tower is already in the land of destination.

6. Question

We do that all for the Netherlands and Belgium areas but when it comes to foreign installations for example in the UK or in Italy we have partners. We have local partners who do the whole process if it comes to development and when it comes to permits and when it comes to a connection to the grid also when it comes to for example the incentives. We work a lot together with local companies, with local project developers but also with local companies who were organize the plan for example the concrete foundation is all done by local companies because when we have to send a Dutch concrete company to the south part of Italy for example to create a local foundation it will be very costly so we work a lot together with local companies especially when the project or outside of the Netherlands or Belgium.

- Extra Question: What makes medium sized wind turbines easier to get approved in comparison to larger wind turbines?

The biggest problem with large megawatt turbines is that they are very high so when it comes to the pollution of the sky there is a lot of objections especially in the Netherlands but also in Belgium there is a lot of objections against big megawatt turbines. Of course the efficiency of a megawatt turbine is way better than from a midsized turbine. What we also discovered is that in the east part of the Netherlands, where we have the German border, there is a lot of objections from local people against big megawatt turbines especially against wind parks. Nowadays some turbines will have a hub height of between 140 and 160 meters and in their opinion the landscape becomes different when there are a lot of turbines. Midsized wind turbines are just more easy to adopt too. We of course also get some objections but it is not even a tenth of the objections that are being created when it comes to plans for a megawatt turbine. The biggest thing is, as I said, it needs to be possible to connect a megawatt turbine to the grid because when the grid is not strong enough to transport all the energy that is produced by the megawatt turbine then they have a problem. Then there are two options; create a stronger grid which will cost a lot of money or make sure that midsize wind turbines will be able. You need an incentive for that but the incentive part of money will still be much less than when you have to create a new grid.

7. Question

Sometimes to receive a permit they need to do a lot of research for example they need to create a research document for noise. Sometimes the permits can only be given to a farmer when they have a document about the noise when they have a document about the shadow flickering, when do you have a so-called quick scan on Flora and Fauna, so they need to do research the amount of birds that are flying and the amount of bats that are flying during night times. For example, in Belgium they are very strict, so they have a lot of additional documents that are needed to receive a permit. In general that is probably the same when it comes to megawatt turbines but I am not an expert on megawatt turbines.

Sometimes for example in Belgium the regulations are very strict and high and in the Netherlands it is different between local communities, one time is it is quite easy to get a permit but sometimes you also need to make sure if all kind of research documents are added into the permit restrictions. It depends from area to area and yes, we also need to create several research documents when it comes to the environment.

In the Netherlands we also sometimes use local consulting companies because sometimes it is just easier to let them to it and pay then us doing it ourselves. It really depends from situation to situation, when it comes to other countries besides the Netherlands and Belgium we are mainly turban suppliers, so the whole project development itself is done by different companies, partners from our side. We coordinate and manage that kind of relationship with those companies but we don't have people for example in the UK who do that. We have local companies that are supported from us and they do the planning and restrictions, they do the project development and so on.

8. Question

To be honest we never really did do research for that because our main objective is that we want to make sure that the turbine owners, being a farmer or industrial, biggest part of energy consumption is covered by his own production. Whether the turbines are also suitable for grid stabilization... I am not sure about it. To be honest I don't know, it might be for example in areas where the grid is very weak and you need midsized wind turbines because megawatt turbines are not able to adapt and to inject their energy production but I'm not sure about that.

The whole idea is, the more companies produce their own energy the better for the grid. You always need a grid because there will always a moment during the day, or the week, or the month where there is no wind so there is no production and then you need a functioning grid. I do know companies who are off grid but that means that they also have a backup diesel generator so when the wind is down because there is no wind production and the diesel generator will produce the energy they need. Wind is a beautiful way of producing energy but you never know when the wind is on. There are months with a good average wind speed, for example during the summer but there are also always times in between months when there is no wind outside.

9. Question

We have storage systems that we installed, combinations between storage batteries and wind turbines but we don't have that technology in our company. So we do it and we combine it with other technologies and we have a so-called power managing system in between. We are mainly focused on wind turbines and when other companies ask for example to combine it with their products it is okay and the same with vice versa. We don't have the technology for storage.

In the Netherlands everybody is connected to the grid, perhaps some farmers not but that's it. The things we did in the past were on islands for example in the Caribbean where there are islands that have to do their own energy consumption and production. They have a combination of sun, wind, storage and even a diesel generator because when the battery is empty, it is night and there is no sunshine and the wind is going down you still need energy and then the diesel will charge. When you want to be completely off the grid without a diesel generator set as a backup then you need a very big battery and batteries are still very expensive nowadays but it all depends on the local situations. For example at those islands every kilowatt hour produced by a diesel generator is very expensive because diesel needs to be transported to the island with a ship. All those costs will be measured in one kilowatt-hour. Over there it is much more profitable for example install a 500 kilowatt-hour storage system than for example in the Netherlands.

10. Question

Renewable ambition is very noble but at the end of the day you also want profit of course and we had some times in the Netherlands for example, between 2010 and 2019, when the energy prices were very low. When you bought energy from the grid the price was very low so it was costlier to create your own energy with wind turbines in comparison to the grid. Back in those days farmers always told us and our competitors as well to produce your own energy is much more expensive than to buy from the grid so why would I invest in a wind turbine? Since the beginning of 2021 so basically one year ago energy prices went up, energy prices from energy suppliers became more and more expensive and nowadays it is very it is very expensive in

the Netherlands. So nowadays farmers call us and say: "hey let's talk about the wind turbines because I pay a lot of money at the moment for my current energy bills". It all depends on the profits of the wind turbines which depends on current energy prices as well and it also depends on incentive programs, so when a government really wants to stimulate renewable energy, especially in the Netherlands then you need a kind of incentive program to make it interesting for household or for companies to invest in turbines or in solar PV or whatever. Of course you also need some kind of policy so that farmers or industrials are allowed to install a turbine because of course, it can be very profitable to own. Especially at the moment in the Netherlands it is very profitable to buy your own turbine but if you are not allowed to install a turbine there is no chance that you will install a turbine because you need a permit for it. In the Netherlands, for every kind of wind turbine starting from 15 meters hub height do you need a permit and there are areas in the Netherlands where it is still not allowed.

- Extra Question: Why is it not allowed to install a wind turbine in some parts of the countries?

People don't like it, this is one of the reasons. When it comes to the Netherlands and there is the discussion about wind turbines we have a lot of people who don't want wind turbines because they think they're ugly, they think it's sky pollution they think they will have a lot of disadvantages from it for example from noise or shadow flickering. The Netherlands is a very highly populated country so there are a lot of people on a very small piece of land, so for example if you go to the UK; we've got a lot of installations in the UK as well, it is less densely populated so it is easier to install a turbine over there. This also concerns megawatt turbines, even offshore turbines to get problems with project development because of objections as well.

But for example in Denmark, their mindset is different because I do know that in Denmark the number of installations is much higher than for example in the Netherlands. To be honest, Denmark is bigger than the Netherlands and they also have less people living over there but there is still more discussion about wind energy in the Netherlands.

Regarding Germany we don't have any new wind turbines there but this is also because WES, for the last 20 years, went to the countries where there is a market, there was a demand for wind turbines, there was a very good business case when it came to investing into wind turbines and there was also a good wind speed at a low height. In the UK for example, the wind speed at low heights is very good, in Greece the wind speed and low heights is also very good but in Germany I only think in the north part, so near the coast line, there are areas where small or medium sized wind turbines can be profitable. Over there I am not sure about the number of small and midsize wind turbine in Germany but I can imagine that it is much lower than for example in the UK or in the Netherlands. We also have our wind sources when it comes to measuring wind speeds and especially in the middle and south part of Germany I cannot imagine that wind turbines in this size are profitable, only in the north part probably. Therefore Germany never has been an interesting market for us.