



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM



Fakultät Maschinenbau
und Versorgungstechnik

Windkraftanlagen: Potentialanalyse und Technologievergleich

WindpowerToEnergy



Analyse des Windpotentials in der Europäischen Metropolregion Nürnberg im
Hinblick auf die Energiewende.

Name: Lisa Herrmann
Anschrift: Kleinried 14
91572 Bechhofen
E-Mail: herrmannli64343@th-nuernberg.de
Telefon: 015151518050
Matrikelnummer: 2876334
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Korrektor: Florian Fichtner

Unterschrift

Abstract

Die vorliegende Projektarbeit gibt einen Überblick über die Ausbausituation von Windkraftanlagen in der Europäischen Metropolregion Nürnberg für das Jahr 2030 und 2050. Im Jahr 2030 wird angestrebt, den CO₂ Ausstoß um 40 Prozent zu reduzieren. Dazu müssen 60 Prozent des Strombedarfs aus regenerativen Energieträgern gewonnen werden. 2050 soll der gesamte Energiebedarf mit erneuerbaren Energie gedeckt werden. Desweiteren wird die Wirtschaftlichkeit von vertikalen Windenergieanlagen untersucht.

Bei der Bedarfsanalyse wurde ein Energiemix von 65 Prozent Windenergie und 35 Prozent Solarenergie zu Grunde gelegt. Für das Jahr 2030 hat sich somit ergeben, dass 642 weitere Windkraftanlagen benötigt werden, um das Klimaziel zu erreichen. Bis zum Jahr 2050 muss diese Anzahl weiter auf 1256 Anlagen erhöht werden.

Das Ergebnis der Flächenanalyse für die Europäische Metropolregion Nürnberg hat erbracht, dass prinzipiell noch 1890 Anlagen zusätzlich aufgebaut werden können. Somit besteht theoretisch die Möglichkeit, die Klimaziele zu realisieren.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse für vertikale Windenergieanlagen hat ergeben, dass es aus ökologischer und ökonomischer Sicht nicht sinnvoll ist, diese Anlagen zu Energiegewinnung zu installieren.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Ziel und Forschungsfragen	2
3 Analyse	3
3.1 Ermittlung der potentiellen Flächen	3
3.2 Ermittlung der Anlagenanzahl	5
3.3 Ermittlung der benötigten Anlagenanzahl	6
3.3.1 Erzeugungssituation 2017	6
3.3.2 Stromverbrauchsdaten der EMN	8
3.3.3. Ermittlung des Windpotentials	9
3.3.4 Berechnung der benötigten Anlagenanzahl	9
3.3.5 Berechnung der Referenz-Anlagenanzahl	11
3.3.6 Berechnung der Windleistung bei vollständigem Ausbau	11
4 Vertikale Windenergieanlagen	13
4.1 Allgemeiner Technologievergleich	13
4.1.1 Savonius-Rotoren	13
4.1.2 Darrieus-Rotoren	14
4.1.3 Darrieus-H Rotor	14
4.1.4 Darrieus Helix-Rotor	15
4.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse am Standort Hirschaid	15
4.2.1 Auswertung der Messergebnisse	16
4.2.2 Bewertung verschiedener Windenergieanlagen	18
4.3 Sinnvolle Standorte für Windenergieanlagen in der EMN	20
4.4 Vor- und Nachteile von vertikalen Windenergieanlagen	27
5 Fazit	28
Literaturverzeichnis	VI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mittlere Windgeschwindigkeit in 130 m & Gebietskulisse Windkraft	3
Abbildung 2: Erzeugungssituation im Jahr 2017	6
Abbildung 3: Einspeisung der MDN über das Jahr 2017	8
Abbildung 4: Savonius Rotor	13
Abbildung 5: Darrieus Rotor mit zwei und drei Rotorblättern	14
Abbildung 6: Darrieus H-Rotor	14
Abbildung 7: Helix Rotor	15
Abbildung 8: Prognostizierte Windgeschwindigkeit am Anlagestandort Hirschaid	15
Abbildung 9: Skizze des Standortes und der umgebenden Gebäude	16
Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung Hirschaid oberes Anemometern	17
Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung Hirschaid unteres Anemometer	17
Abbildung 12: Mittlere Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe	20
Abbildung 13: Standort Ansbach	21
Abbildung 14: Standort Weißenburg-Gunzenhausen	22
Abbildung 15: Standort Tischenreut	22
Abbildung 16: Standort Fichtelgebirge, Landkreis Bayreuth und Wunsiedel	23
Abbildung 17: Standort Fichtelgebirge, Landkreis Hof	24
Abbildung 18: Standort Hof	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Windkraftanlagen	5
Tabelle 2: Ausbausituation Solar- und Windenergie für 2030 und 2050	7
Tabelle 3: Anlagenanzahl	10
Tabelle 4: Anlagenanzahl im besten Windjahr	11
Tabelle 5: optimaler Energiemix	12
Tabelle 6: Verfügbare Windenergieanlagen 5 kW +/- 1 kW	19
Tabelle 7: Anzahl an möglichen Kleinwindanlagen in windstarken Gebieten	25
Tabelle 8: Erzeugungsanteil vertikaler WEA an der gesamten Windenergie	25
Tabelle 9: Vor- und Nachteile vertikaler WEA	27

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EMN	Europäische Metropolregion Nürnberg
10 H-Regel	Als 10 H-Regelung wird eine Bestimmung in der Bayerischen Landesbauordnung bezeichnet, wonach seit dem 17.11.2014 Windkraftanlagen "einen Mindestabstand vom 10-fachen ihrer Höhe zu Wohngebäuden in Gebieten mit Bebauungsplänen, innerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile...einhalten“ müssen (KommunalWiki. 2018)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MERRA-2	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version2
WEA	Windenergieanlagen
MDN	Main-Donau-Netzgesellschaft
W _E	Energiemenge die durch Windkraft erzeugt werden muss
V	Stromverbrauch der EMN
W _A	Auszubauender Anteil von Windenergieanlagen
W _L	Benötigte Windkraftleistung
BG	Benutzungsgrad
n	Benötigte Anlagenanzahl
P	Leistung einer Windkraftanlage

1 Einleitung

Die durch den CO₂ Ausstoß verursachte globale Erwärmung und der daraus resultierende Klimawandel führt zu immer größer werdenden Problemen. Folgen dieses Wandels sind beispielsweise der Anstieg des Meeresspiegels und die zunehmenden Wetterextremen (Ökosystem Erde, 2015). Um dieser globalen Veränderung entgegenzuwirken, haben sich 2015 auf der Pariser Klimaschutzkonferenz 195 Länder zusammengeschlossen und sich auf ein weltweites Klimaschutzübereinkommen geeinigt. Demnach sollen die CO₂ Emissionen minimiert werden, um den weltweiten Anstieg der Durchschnittstemperatur auf unter zwei Grad Celsius zu halten (Europäische Kommission, ohne Datum).

Damit dieser geschlossenen Klimapakt umgesetzt werden kann, hat sich die Europäische Metropolregion Nürnberg (EMN) bis zum Jahr 2030 das Ziel gesetzt, den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß gegenüber 2017 um 40 Prozent zu reduzieren. Dieser Vorsatz ist nur realisierbar, wenn bis dahin etwa 60 Prozent der benötigten Energie aus regenerativen Energieträgern gewonnen wird. Bis zum Jahr 2050 soll der Energiebedarf vollständig aus erneuerbaren Energien erzeugt werden.

Wie und ob dieses Ziel überhaupt möglich ist, wird im Rahmen einer Projektarbeit von Studenten der Technischen Hochschule Nürnberg, Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik untersucht. Das Projekt wird von Prof. Dr. –Ing. Matthias Popp betreut und in Kooperation mit der „N-ERGIE“ durchgeführt. Diese Arbeit ist ein Teil des gesamten Projekts und betrachtet das Thema Windkraft in der Europäischen Metropolregion Nürnberg genauer.

2 Ziel und Forschungsfragen

Ziel der Arbeit ist herauszufinden, welchen Energieanteil Windkraftanlagen in der EMN zum Klimaziel beitragen können. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit folgende Forschungsfragen geklärt:

- Welche potentiellen Standorte für Windenergieanlagen gibt es in der Europäischen Metropolregion Nürnberg? Die 10 H-Regel wird dabei nicht berücksichtigt.
- Welchen Betrag können die noch möglichen Windkraftanlagen zur Stromversorgung in der EMN leisten?
- Sind vertikale Windkraftanlagen sinnvoll und welche Technologie kann an welchen Standorten in der EMN rentabel eingesetzt werden?
- Welchen Anteil der erzeugten Windenergie können vertikale Windkraftanlagen leisten?

Um diese Fragen zu beantworten, werden zunächst Winddaten aus dem Energie-Atlas Bayern ausgewertet. In diesem sind alle für die Windkraftnutzung relevanten Flächen, sowie die Windgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen verzeichnet. Anhand dieser Daten wird die potentielle Anlagenanzahl sowie die benötigte Anzahl für die Jahre 2030 und 2050 in der Metropolregion ermittelt. Nachdem diese berechnet worden sind, wird mit Hilfe von Daten der MERRA-2 Datenbank der NASA untersucht, welchen Anteil an Energie die noch möglichen Windkraftanlagen im besten und schlechtesten Windjahr liefern können. Daraufhin folgt ein Vergleich von verschiedenen vertikalen Windenergieanlagen (WEA). Dabei geht es in erster Linie darum, wo und ob diese Form der Winderzeugung rentabel ist. Zudem wird ermittelt welche Energiemenge vertikale Windenergieanlagen zu der jährlichen Gesamtmenge an Windenergie liefern können.

3 Analyse

Um die ersten beiden Forschungsfragen beantworten zu können, müssen zunächst einige Analysen bezüglich der potentiellen Flächen, zusätzlich möglichen Anlagen und der benötigten Anlagenanzahl durchgeführt werden.

3.1 Ermittlung der potentiellen Flächen

Zunächst gilt es für die Analyse der potentiellen Flächen zu untersuchen, in welchen Regionen das Windaufkommen am höchsten ist. Ein erster Überblick wird durch den Energie-Atlas Bayern ermöglicht. In dieser Datenbank sind unter anderem die mittleren Windgeschwindigkeiten und die, für Windkraftanlagen möglichen Flächen erfasst. In Abbildung 1 ist das Windprofil in einer Höhe von 130 Metern und Flächen, die für die Nutzung von Windenergie gut geeignet sind, zu sehen.

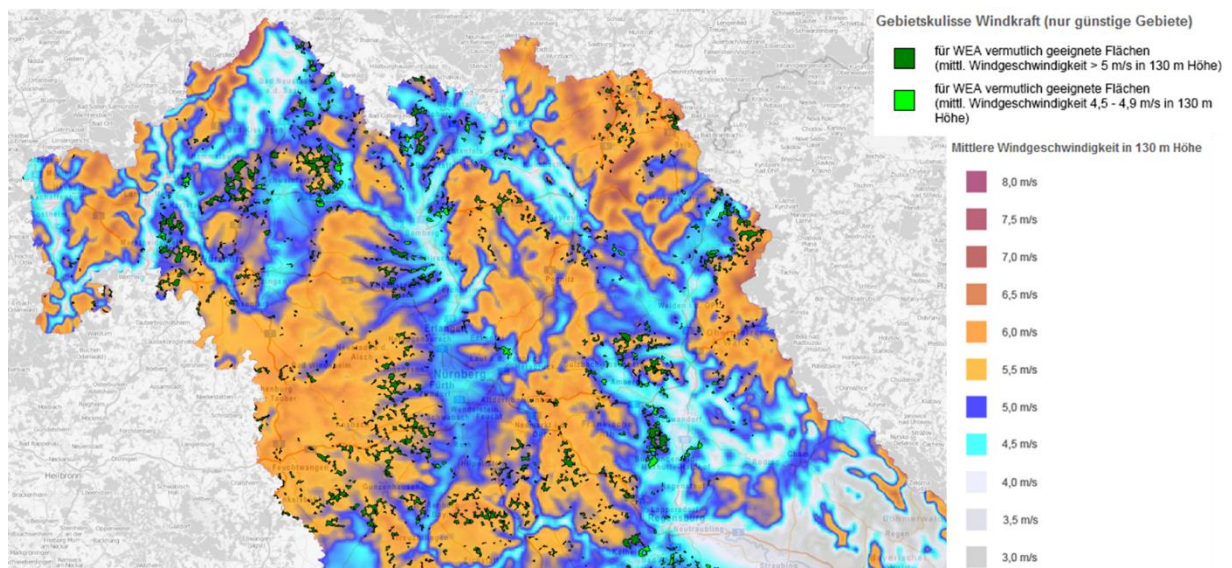


Abbildung 1: Mittlere Windgeschwindigkeit in 130 m & Gebietskulisse Windkraft (Energie-Atlas Bayern. o. D.)

Bei genauer Betrachtung der Abbildung 1 fällt auf, dass es in der EMN noch viele Flächen gibt, die ein hohes Potential für die Nutzung der Windenergie haben. Diese Flächen sind hier grün eingefärbt. Die Gebietskulisse für mögliche Flächen wurde basierend auf den Windenergie-Erlass Bayern und dem Bayerischen Windatlas erstellt. Bei der Erstellung wurden zahlreiche Umweltfachdaten, sowie Belange des Trinkwasserschutzes, naturschutzfachliche Daten und Abstandsflächen zu Verkehrswegen, Hochspannungsleitungen und Siedlungen berücksichtigt. Die

10 H-Regelung, Militärische Schutzgebiete, landschaftsprägende Denkmäler, Hochwasserschutzgebiete, Wetterradarstationen und unterirdische Leitungstrassen wurden nicht beachtet. Diese Faktoren müssen von jeder Kommune vor Ort geprüft werden. Auf den hellgrünen Flächen herrscht eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4,5 bis 4,9 Metern pro Sekunde in 130 m Höhe allerdings bei einer geringen Windhäufigkeit. Diese Flächen sind für die Installation von Windkraftanlagen im Vergleich zu den dunkelgrünen Flächen weniger gut geeignet und werden deshalb für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt. Die dunklen Flächen weisen eine ausreichende Windhäufigkeit und eine mittlere Windgeschwindigkeit von mehr als 5 Metern pro Sekunde auf und dienen deshalb als Grundlage für das Windkraftpotential.

Im Folgenden werden diese Flächen in die Regierungsbezirke Unter-, Ober-, Mittelfranken und Oberpfalz aufgeteilt und genauer analysiert.

Unterfranken

Die im Bezirk Unterfranken für Windkraft geeigneten Flächen betragen 2,9 Prozent (Energie-Atlas Bayern. o. D.) der Gesamtfläche von 8531 Quadratkilometer (Regierung von Unterfranken. 31.08.2017). Es liegen jedoch nur zwei Landkreise des Bezirks in der EMN. Die Fläche dieser beiden Landkreise beträgt 19,2 Prozent von der Gesamtfläche. Somit ergibt sich eine potentiell nutzbare Fläche von 48 Quadratkilometern.

Oberfranken

Der gesamte Regierungsbezirk Oberfranken, mit einer Fläche von 7230 Quadratkilometern, liegt in der Europäischen Metropolregion. Das Windkraftpotential beträgt hier 2,2 Prozent. Daraus ergibt sich eine für Windkraftnutzung gut geeignete Fläche von 159 Quadratkilometern.

Oberpfalz

56 Prozent der Oberpfalz liegen im Gebiet der EMN. Bei einem Windpotential von 2,5 Prozent und einer Gesamtfläche des Bezirkes von 9691 Quadratkilometern, entspricht das eine potentiell für die Energiegewinnung durch Windkraft gut geeignete Fläche von 134 m².

Mittelfanken

Das größte Windkraftpotential mit 3,9 Prozent liegt in Mittelfanken. Dieser Bezirk mit einer Fläche von 7245 Quadratkilometern liegt komplett in der Metropolregion und bietet somit eine 283 m² große Fläche, die für Windkraft potentiell geeignet ist.

3.2 Ermittlung der Anlagenanzahl

Um in einem Windpark alle Abstandsflächen einzuhalten, wird für jede Windkraftanlage eine Fläche von circa 15 Hektar benötigt (Energie-Atlas Bayern. o. D.). Weiterhin muss beachtet werden, dass die oben ermittelten Flächen nicht zusammenhängend, sondern auf den gesamten Bezirk verteilt sind. Somit ergeben sich viele kleine Flächen auf denen teilweise nur eine Windkraftanlage gebaut werden kann oder Flächen bei denen die Geometrie und Landschaftsgegebenheiten den vollständigen Ausbau nicht zulassen. Zudem werden einige der unter dem Abschnitt 3.1 genannten Faktoren nicht berücksichtigt. Des Weiteren muss beachtet werden, dass Windkraftanlagen von einem Teil der Bevölkerung nicht oder nur mit hohem Widerstand akzeptiert werden. Aus diesem Grund werden die potentiell gut geeigneten Flächen durch den Faktor 2,2¹ geteilt. Somit ergeben sich die geeigneten Flächen. Die Anzahl der daraus resultierenden möglichen Windkraftanlagen ist in der Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Mögliche Windkraftanlagen

	Potentiell geeignete Flächen [km ²]	Geeignete Flächen [km ²]	Möglich Windkraftanlagen
Unterfranken	48	22	144
Oberfranken	159	72	482
Oberpfalz	134	61	407
Mittelfranken	283	128	856
Summe	624	283	1890

¹ Persönliche Kommunikation mit Dr. Nikolaus Meier, Hochschule Weihenstphan-Triesdorf

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass es möglich ist 1890 weitere Windkraftanlagen in der Europäischen Metropolregion zu installieren.

3.3 Ermittlung der benötigten Anlagenanzahl

Im Folgendem wird ermittelt, wie viele Windkraftanlagen in der EMN mindestens eingesetzt werden müssen, um im Jahr 2030 sechzig Prozent und im Jahr 2050 hundert Prozent des Strombedarfs aus regenerativen Energieträgern gewinnen zu können.

3.3.1 Erzeugungssituation 2017

Dazu muss zunächst analysiert werden, wie der Strom in der Europäischen Metropolregion bisher produziert wird. Daraus lässt sich im Anschluss berechnen, welcher prozentuale Anteil mittels Windenergie zu erzeugen ist. In Abbildung 2 ist die derzeitige Stromerzeugungssituation in der EMN zu sehen.

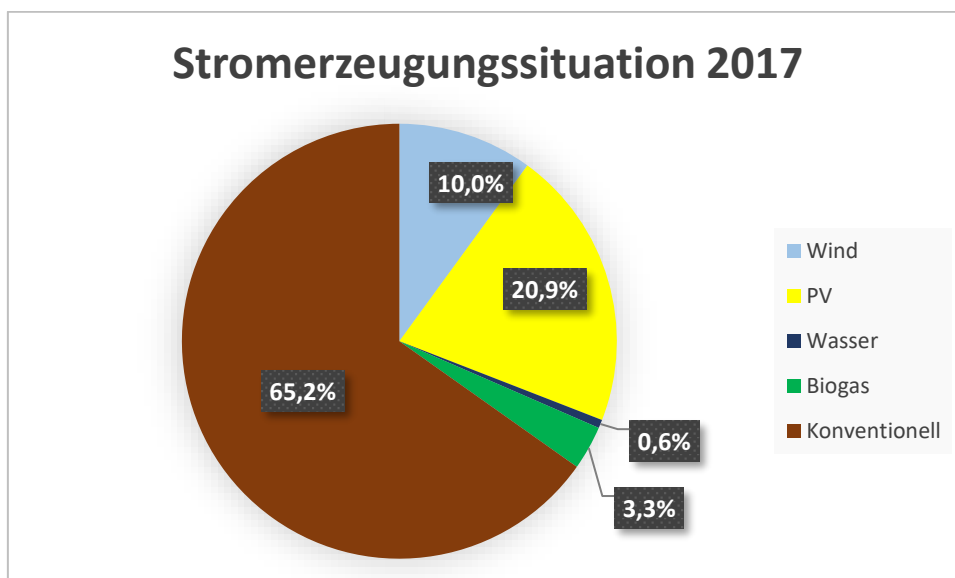


Abbildung 2: Erzeugungssituation im Jahr 2017 (eigene Darstellung)²

Beim Betrachten der Abbildung 2 ist zu erkennen, dass bereits 34,8 Prozent des Strombedarfs aus regenerativen Energieträgern gedeckt wird. Da Wasserkraft mit

² Datenquellen: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Vorbereitung für den Accelerator am 27.03 und 28.03.2018; TenneT: derzeit installierte Bio- Wasser- Sonne- und Windenergieanlagen

einem Anteil von 0,6 Prozent und Biogas mit 3,3 Prozent nicht weiter ausgebaut werden können, muss im Jahr 2030 56,1 Prozent des benötigten Stroms aus Wind- und Sonnenkraft erzeugt werden. Um den optimalen Strom-Mix zu erhalten, ist von einem Ausbau von 65 zu 35 auszugehen. Das bedeutet, dass 65 Prozent des Stroms aus Windenergie und 35 Prozent aus Sonnenenergie gewonnen werden. Um im Jahr 2050 den Gesamtbedarf vollständig mit erneuerbaren Energieträgern zu decken, muss beachtet werden, dass diese stark wetterabhängig sind. Daher müssen entweder mehr Anlagen, als eigentlich benötigt oder große Speicher mit möglichst geringen Verlusten errichtet werden. In dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass die durch Sonne und Wind erzeugte Energie gleichmäßig bereitgestellt oder durch verlustfreie Speicher bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt wird. Das bedeutet, dass 2050 86,7 Prozent des benötigten Stroms aus Wind- und Sonnenenergie, in einen Mix von 65:35 gewonnen werden müssen. In Tabelle 2 ist zu sehen, um welchen prozentualen Anteil Wind- und Sonnenkraft bis zu den Jahren 2030 und 2050 ausgebaut werden muss.

Tabelle 2: Ausbausituation Solar- und Windenergie für 2030 und 2050

[%]	2030		2050	
F_{reg} Forderung regenerativ	60		100	
A_{Wasser} Anteil an Wasserkraft	0,6		0,6	
A_{Bio} Anteil an Biogas	3,3		3,3	
A_{res} Resultierender Anteil $A_{res} = F_{reg} - (A_{Bio} + A_{Wasser})$	56,1		96,4	

[%]	Wind		Solar	
E_{Mix} Energiemix	65	35	65	35
A_{Wind/Solar} Prozentualer Anteil $A_{Wind/Solar} = A_{res} \times E_{Mix}$	36,5	19,6	62,7	33,7
A_{Bestehend} Bestehender Anteil	10	20,9	10	20,9
A_{Ausb.} Auszubauender Anteil $A_{Ausb.} = A_{Wind/Solar} - A_{Bestehend}$	26,5	-1,3	52,7	12,8

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass im Jahr 2030 ein Zuwachs von 26,5 Prozent an Windenergie erforderlich ist, um das Klimaziel zu erreichen. Durch einen derzeitigen Überschuss von 1,3 Prozent, ist es nicht erforderlich, Solarenergie weiter auszubauen. Bis zum Jahr 2050 ist es notwendig die Windenergie im Vergleich zu 2017, um 52,7 Prozent auszubauen. Dabei muss die Sonnenenergie um 12,8 Prozent erweitert werden.

3.3.2 Stromverbrauchsdaten der EMN

Im Folgenden werden die Einspeisedaten der Main-Donau-Netzgesellschaft (MDN) herangezogen und analysiert. Da in der MDN ca. 1,3 Millionen Verbraucher registriert sind, in der Europäischen Metropolregion Nürnberg jedoch 3,5 Millionen, wird der Verbrauch mit dem Faktor 2,7 multipliziert, um den groben Verbrauch der EMN zu erhalten. Die eingespeiste Energiemenge der Main-Donau-Netzgesellschaft ist in der Abbildung 3 zu sehen.

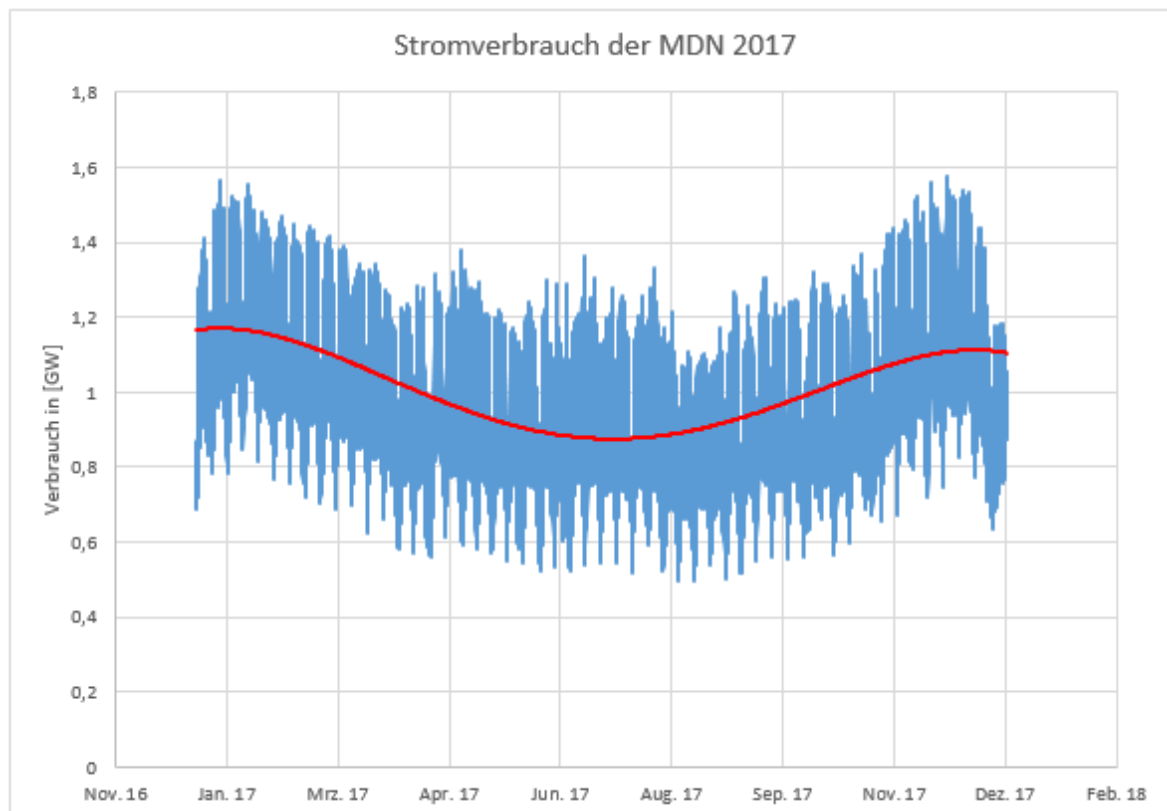


Abbildung 3: Einspeisung der MDN über das Jahr 2017

Um herauszufinden, welche Last in der Europäischen Metropolregion Nürnberg abgedeckt werden muss, wird die tägliche Spitzenlast ermittelt und daraus der jährliche Mittelwert gebildet. Somit ergibt sich für die Main-Donau-Netzgesellschaft ein mittlerer Spitzenwert von 1,22 GW. Multipliziert mit dem oben ermittelten Faktor von 2,7 folgert sich eine mittlere Spitzenlast von circa 3,3 GW für die Europäische Metropolregion Nürnberg.

3.3.3. Ermittlung des Windpotentials

Damit es möglich ist, eine Aussage darüber treffen zu können, welches Windpotential im Jahr 2030 und 2050 tatsächlich zu Verfügung steht, werden die MERRA-2 Daten der NASA herangezogen. Dazu wurde der Benutzungsgrad des jeweiligen Windjahrs von 1980 bis 2017 ermittelt. Dieser ergibt sich aus der Division der mittleren Windgeschwindigkeit mit der maximalen Geschwindigkeit. Bei der Auswertung der Daten stellte sich heraus, dass im Jahr 2014 das schwächste Windaufkommen herrschte. In diesem Jahr lag der Benutzungsgrad bei 0,33 Prozent. Das höchste Windpotential wurde im Jahr 1890, mit einem Benutzungsgrad von 0,42 Prozent, aufgezeichnet.

3.3.4 Berechnung der benötigten Anlagenanzahl

Die Ermittlung der notwendigen Anlagen für die beiden Szenarien wird für die Wetterverhältnisse des windschwachen Jahres 2014 berechnet, da davon ausgegangen werden muss, dass der Wind ebenfalls ein solch geringes Potential haben kann. Die Beispielrechnung erfolgt für das Jahr 2030.

Zunächst gilt es zu berechnen, welcher Anteil durch Windenergie zu erzeugen ist.

$$W_E = V * W_{Ausb.}$$

$$W_E = 3,3 \text{ GW} * 26,5 \% = 0,87 \text{ GW}$$

W_E = Windenergiemenge

V = Verbrauch

$W_{Ausb.}$ = Auszubauender Anteil

Im Anschluss kann die benötigte Windkraftleistung (W_L) ermittelt werden.

$$W_L = \frac{W_E}{BG}$$

$$W_L = \frac{0,87 \text{ GW}}{0,33} = 2,63 \text{ GW}$$

BG = Benutzungsgrad ($BG_{2030} = 33$ Prozent)

Zuletzt kann die benötigte Anlagenanzahl n berechnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Windkraftanlagen Enercon E-115 mit einer Leistung von $P = 4,1$ Megawatt gebaut werden.

$$n = \frac{W_L}{P}$$

$$n = \frac{2630 \text{ MW}}{4,1 \text{ MW}} = 642$$

In Tabelle 3 ist zu sehen wie viele Windkraftanlagen benötigt werden, um die Ziele für die beiden Jahre zu erreichen.

Tabelle 3: benötigte Anlagenanzahl im schlechtesten Windjahr

Jahr	Anlagenanzahl
2030	642
2050	1256

Bis zum Jahr 2050 werden demnach 1256 Anlagen mehr als bisher benötigt, um die Klimaziele zu realisieren (siehe Tab. 3). Beim Vergleichen dieser Anzahl und der in der EMN in windstarken Gebieten möglichen Anlagen, lässt sich folgern, dass die Menge von Windkraftanlagen ausreichen würde, um die besagten Ziele zu erreichen. In Anbetracht der 627 Windkraftanlagen, die bereits bestehen und derzeit zehn Prozent des benötigten Energiebedarfs abdecken, erscheint die Anzahl der noch benötigten Anlagen verhältnismäßig gering. Diese Zahl ist jedoch durchaus realistisch, da davon ausgegangen wird, dass ausschließlich leistungsstarke Anlagen mit 4,1 MW errichtet werden. In der Summe von 2017 sind ebenfalls kleine Anlagen mit 0,5 MW aufgelistet.

3.3.5 Berechnung der Referenz-Anlagenanzahl

Um zu ermitteln, wie stark die benötigte Anlagenanzahl von den Wetterbedingungen abhängt, wird als Referenz die erforderliche Menge für das beste Windjahr (1890) berechnet. Dies erfolgt analog zur der oben aufgezeigten Berechnung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: benötigte Anlagenanzahl im besten Windjahr

Jahr	Anlagenanzahl
2030	505
2050	1011

Beim Vergleichen der Werte aus Tabelle 3 und 4 ist zu erkennen, dass sich die benötigte Anlagenanzahl deutlich unterscheidet. Demnach liegt die Differenz im Jahr 2030 bei 137 und im Jahr 2050 bei 245 Anlagen. Dadurch verdeutlicht sich, wie stark eine vollständig regenerative Versorgung den Wettereinflüssen unterliegt. Für die weitere Arbeit werden die Kennwerte aus dem windschwachen Jahr verwendet.

3.3.6 Berechnung der Windleistung bei vollständigem Ausbau

Um festlegen zu können, welchen Betrag Windkraft maximal zur Versorgung in der Europäischen Metropolregion Nürnberg leisten kann, wird davon ausgegangen, dass alle möglichen Windkraftanlagen gebaut werden. Die unter 3.3.4 aufgeführte Rechnung kann dafür zurückgerechnet werden.

$$W_L = n * P = 1890 * 4,1 \text{ MW} = 7.749 \text{ MW}$$

$$W_E = W_L * BG = 7,8 \text{ GW} * 0,33 = 2,6 \text{ GW}$$

$$W_a = \frac{W_E}{V} = \frac{2,6 \text{ GW}}{3,8 \text{ GW}} = 68,4 \%$$

Gesamte Windenergie:

$$W_{ges} = W_a + W_{vorhanden}$$

$$W_{ges} = 68,4 \% + 10 \% = 78,4 \%$$

Es ist ersichtlich, dass durch einen maximalen Ausbau der Windkraft, 78,4 Prozent des Energieverbrauchs der EMN abgedeckt werden kann. Der optimale Energiemix für die Europäische Metropolregion Nürnberg ist in der Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: optimaler Energiemix (Projektarbeit Florian Fichtner)

Wind [%]	Sonne [%]	Wasser [%]	Biomasse [%]	Umwandlungsvermögen [%]	Umwandlungsreserve [%]
73,50	36,75	3,0	10,0	123,25	23,25

Somit lässt sich sagen, dass der optimale Energiemix, mit einem Windanteil von 73,5 Prozent, erreicht werden kann (siehe Tab. 5). Zusätzlich bleibt eine Reserve von knapp fünf Prozent übrig.

4 Vertikale Windenergieanlagen

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung der Zweckmäßigkeit und der standortbezogenen Rentabilität von vertikalen Windkraftanlagen. Dazu wird zunächst ein allgemeiner Technologievergleich von vier verschiedenen Typen der Vertikalachsenanlagen durchgeführt. Im Anschluss folgt eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Standort Hirschaid. Abschließend wird untersucht, ob und an welchen Standorten in der Europäischen Metropolregion Nürnberg vertikale WEA sinnvoll eingesetzt werden können.

4.1 Allgemeiner Technologievergleich

Nun folgt der Technologievergleich von vier vertikalen Windenergieanlagen, bei dem kurz auf den Aufbau, sowie die Vor- und Nachteile der jeweiligen Anlagenform eingegangen wird.

4.1.1 Savonius-Rotoren

Der in Abbildung 4 zu sehende Savonius Rotor besteht aus zwei ineinander verdrehten Zylinderhälften. Diese sind an einer vertikalen Rotorachse gegenüberliegend angebracht. Durch diese Anordnung wird der anströmende Wind von der offenen zur entgegengesetzten Seite umgeleitet. Als Vorteile dieser Anlagenform gelten der simple Aufbau, die einfache Montage und die hohe Laufruhe. Zusätzlich kann die Anlage schon bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten von 2 bis 3 Metern pro Sekunde betrieben werden. Nachteilig hingegen ist der geringe Wirkungsgrad von nur 28 Prozent (Haute Innovation. 08.2011).

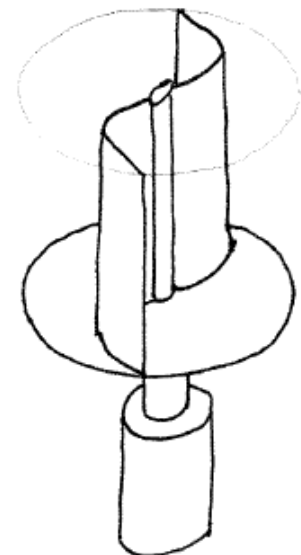


Abbildung 4: Savonius Rotor
(eigene Darstellung)

4.1.2 Darrieus-Rotoren

Bei Darrieus-Rotoren wird die Energie ebenfalls durch die Rotation um eine vertikale Achse gewonnen. Bei dieser Anlagenform sind zwei bis drei bogenförmige Rotorblätter am oberen und unteren Ende an einer drehbaren Welle gelagert. Diese Rotorform ist in der Herstellung jedoch sehr teuer. Außerdem muss diese WEA aus Stabilitätsgründen mit Hilfe von Stahlseilen gespannt werden. Zudem kann sie nicht selbstständig anlaufen. Als Vorteile dieser Bauart zählt jedoch der hohe Wirkungsgrad von bis zu 40 Prozent (Haute Innovation. 08.2011). Zudem können der Generator und das Getriebe am Boden angebracht werden, was die Wartung und Montage extrem erleichtert. In Abbildung 5 ist der Darrieus Rotor mit zwei und mit drei Rotorblättern dargestellt.

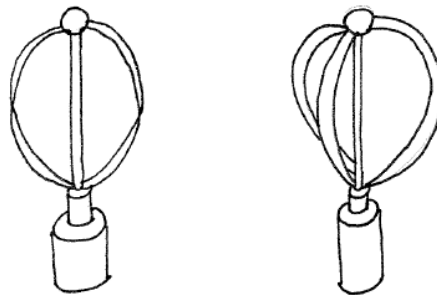


Abbildung 5: Darrieus Rotor mit zwei und drei Rotorblättern (eigene Darstellung)

4.1.3 Darrieus-H Rotor

Darrieus-H Rotoren, wie in der Abbildung 6 zu sehen, besitzen zwei oder mehrere senkrecht zur Drehachse angeordnete Rotorblätter. Die Vorteile dieser Windenergieanlage bestehen darin, dass diese keine Starthilfe benötigt. Außerdem ist die Fertigung der Blätter einfach und somit auch günstiger. Der Wirkungsgrad dieser Anlagenform beträgt 30 bis 40 Prozent (Moritz Gutsch. 2012/13).

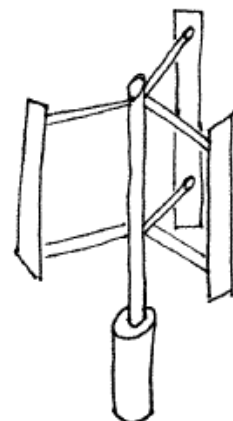


Abbildung 6: Darrieus H-Rotor (eigene Darstellung)

4.1.4 Darrieus Helix-Rotor

Darrieus Helix Rotoren (siehe Abbildung 7) besitzen spiralförmig angeordnete Rotorblätter. Durch diese besondere Form der Blätter, entsteht kein störender Schattenschlag. Desweiteren benötigt auch diese Anlagenform keine Starthilfe. Windenergieanlagen mit Helix Rotoren haben einen Wirkungsgrad von 35 Prozent (Schmelmer & Denk. 2014).



Abbildung 7: Helix Rotor
(eigene Darstellung)

4.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse am Standort Hirschaid

Im Rahmen des Projektes soll außerdem untersucht werden, ob sich der Betrieb einer vertikalen Kleinwindanlage als wirtschaftlich erweist. Dafür wird der Anlagenstandort Hirschaid genauer untersucht. Aus den Daten des Energie-Atlas Bayern lässt sich schließen, dass der Standort suboptimal für Kleinwindanlagen ist, da dieser mit Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s als windarm gilt (Energie-Atlas Bayern. o. D.). In Abbildung 8 ist ein Auszug dieses Gebietes aus dem Energie-Atlas Bayern zu sehen.

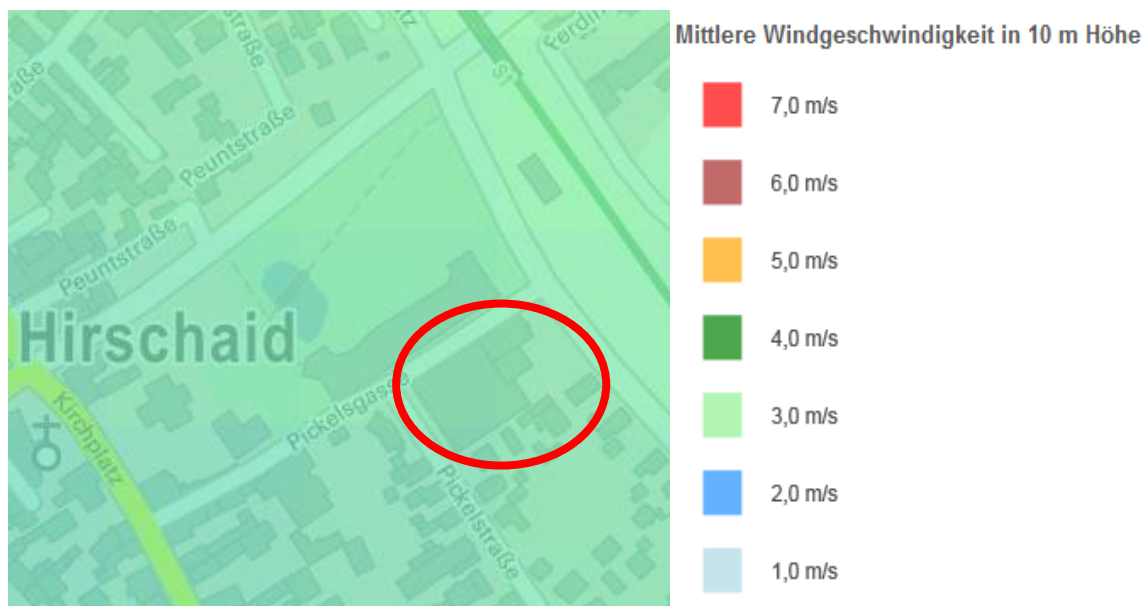


Abbildung 8: Prognostizierte Windgeschwindigkeit am Anlagestandort Hirschaid (Energie-Atlas Bayer. O. D.)

Demnach liegt an diesem Standort eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,9 m/s in einer Höhe von 10 m vor (sieht Abb. 8).

4.2.1 Auswertung der Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden Messergebnisse ausgewertet, um die Aussage über den Standort zu konkretisieren. Die Winddatenerfassung im Energiepark Hirschaid findet auf einem Industriegebäude statt (Persönliche Kommunikation. 24.05.2018). Dort werden zwei Messungen in unterschiedlichen Höhen vorgenommen. Die erste Messstelle befindet sich 1,2 m über der 8 m hohen Industriehalle, die zweite 9 m über der Halle. Zur Datenaufnahme wird das „Aeolog Advanced“ Messsystem verwendet. Dieses System besteht aus zwei Anemometer, einer Windfahne und einem Datenlogger. Die Windgeschwindigkeit wird im 10-Sekundentakt gemessen. Der Datenlogger berechnet daraus die mittlere Windgeschwindigkeit, sowie den Minimal- und Maximalwert der Windgeschwindigkeit jeder Minute. Außerdem werden die Standartabweichung und die Windrichtung berechnet. In Abbildung 9 ist der genaue Standort des Messsystems und der dort installierte Windmast zu sehen.



Abbildung 9: Skizze des Standortes und der umgebenden Gebäude (Persönliche Kommunikation. 24.05.2018)

Die Position der Windfahne weicht an dem Standort um 50° von Nord ab (siehe Abb. 9). Das bedeutet, dass bei einer Anzeige von 0° ein Nordostwind von 50° vorliegt.

Die Windmessung wurde vom 03.11.2017 bis 16.03.2018 durchgeführt. Die relative Häufigkeitsverteilung der Messwerte für das obere und untere Anemometer ist in Abbildung 10 und 11 dargestellt.

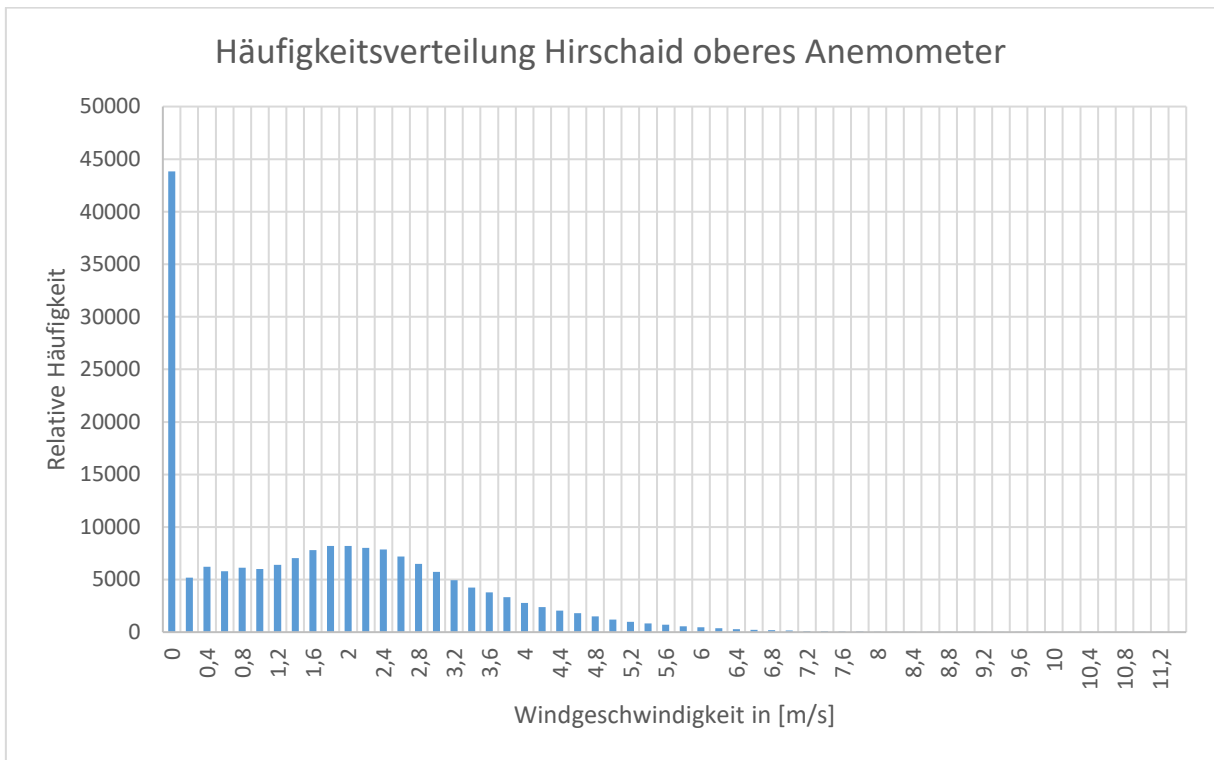


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung Hirschaid oberes Anemometer (eigene Darstellung)

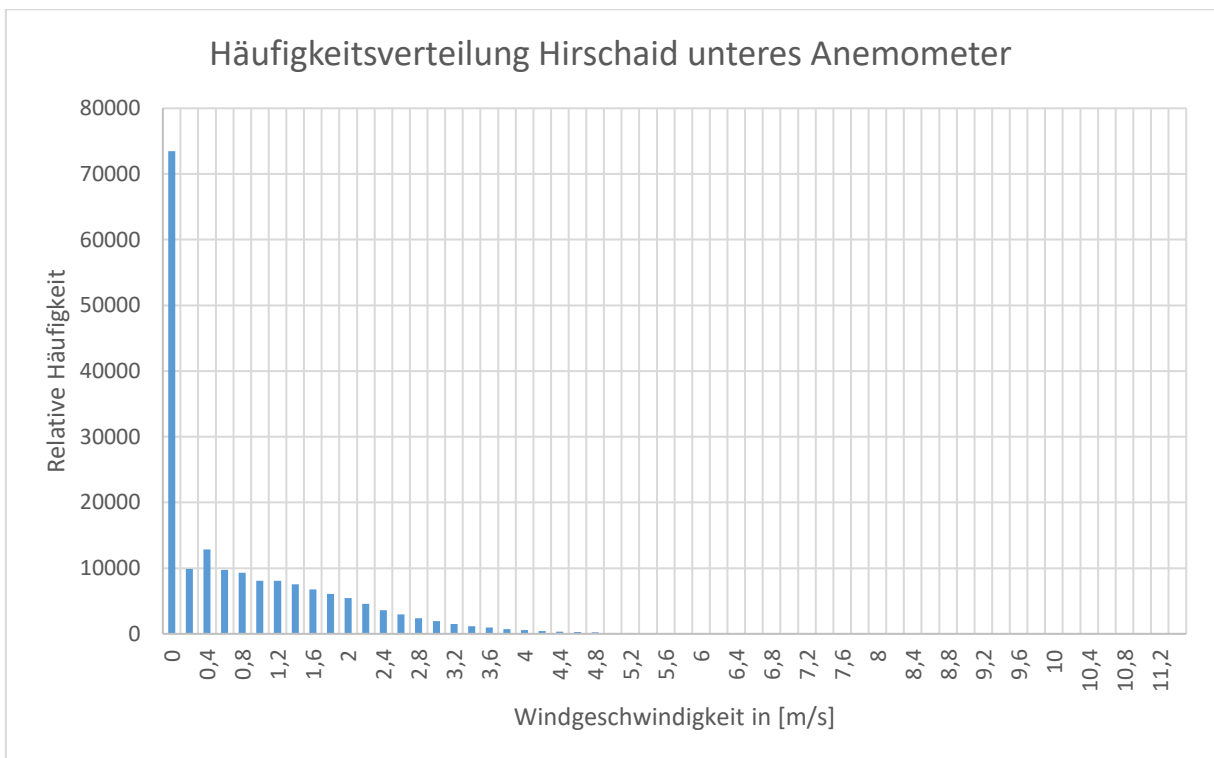


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung Hirschaid unteres Anemometer (eigene Darstellung)

Aus der relativen Häufigkeitsverteilung (Abb. 10 und 11) lässt sich entnehmen, dass es an der Messstelle in Hirschaid oft windstill ist. Beim oberen Anemometer ist ein Hochpunkt bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s zu sehen. Die Einschaltgeschwindigkeit von vertikalen Windenergieanlagen liegt jedoch meist bei 2 m/s. Um festzulegen, wie viel Prozent der Windenergie nicht nutzbar ist, werden die Geschwindigkeiten unter zwei Meter pro Sekunde aufsummiert und durch die Gesamtanzahl der Messungen geteilt. Somit ergibt sich ein nicht nutzbares Windaufkommen von 60,1 Prozent³. Beim unteren Anemometer fällt die relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit linear ab. Eine Geschwindigkeit von 4,2 m/s und höher wird selten erreicht. Die nicht nutzbare Windhäufigkeit liegt an dieser Messstelle bei 84,5 Prozent. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Messungen nur von November bis Mitte März aufgenommen wurden und somit nicht den vollständigen Jahresverlauf widerspiegeln.

4.2.2 Bewertung verschiedener Windenergieanlagen

Um zu ermitteln, ob eine WEA in Hirschaid sinnvoll ist, werden verschiedene vertikale Windenergieanlagen mit einer Leistung $5 \text{ kW} \pm 1 \text{ kW}$ betrachtet. Dabei wird untersucht, welche relative Windhäufigkeit für eine Nutzung möglich ist. Dafür wird die Windgeschwindigkeit am oberen Anemometer betrachtet. Die unterschiedlichen Anlagen sind in der Tabelle 6 zu sehen.

³ Gilt für die durchschnittliche Anlaufgeschwindigkeit von 2 m/s bei vertikalen WEA

Tabelle 6: Verfügbare Windenergieanlagen 5 kW +/- 1 kW (Vertikale Kleinwindanlagen in Bayern. 2014. S.60)

Hersteller	Typ-Bezeichnung	Nennleistung [kW]	Einschaltgeschwindigkeit [m/s]	Nenngeschwindigkeit [m/s]	Abschaltgeschwindigkeit [m/s]	Nutzbare Windhäufigkeit [%]
AirVVin Us, Inc.	AV-R3	5	1,8	10	25	44,5
Amperius	VK 205	5	2,5	12,5	15	29,5
Biotech	VBT-5	5	2,5	12	40	29,5
CrossWind	CrossWind 5 kW	5	1,3	9	10	25,5
Eightwind	EW	5	1,5	11	55	51,8
Fairwind	F16.05	5	3	12	20	19,7
Neuhäuser Windtech	Vata H5	5	0,5	10,5	14	69,3
Quietrevolution	qr5	6	4,5	12,5	26	5,6
Ropatec	Maxi Vertical	6	3	14	25	19,7
Silent Future	Silent Future 4,2	4,2	3	11,3	13	19,7
Winddam	AWT(2) x2000	4	2,9	10,5	14	21,8
XCO2	XCO2	6	4,5	15,5	16	5,6

Die Anlagen von Neuhäuser Windtech „Vata H5“ schneidet mit einer nutzbaren Windhäufigkeit von 69,3 Prozent am besten ab (siehe Tab. 6). Mit der Anlage „EW“ von Eightwind können 51,8 Prozent der Windenergie genutzt werden. Als Drittbestes folgt die Anlage „AV-R3“ von AirVVin Us, Inc. Mit dieser Anlage können 44,5 Prozent der Windhäufigkeit genutzt werden. Das Schlusslicht bilden die Anlagen „qr5“ und „XCO2“. Mit diesen beiden Typen ist lediglich die Nutzung von 5,6 Prozent möglich. Alle oben aufgeführten Anlagen sind jedoch mit Nenngeschwindigkeiten von mehr als 9 m/s angegeben. Diese wird am Standort in Hirschaid allerdings nur selten oder gar nicht erreicht. Somit lässt sich sagen, dass eine Kleinwindanlage in dem untersuchten

Gebiet nicht rentabel ist, da höhere Windgeschwindigkeiten benötigt werden, um die Anlage im Nennleistungsbereich betreiben zu können.

4.3 Sinnvolle Standorte für Windenergieanlagen in der EMN

In Kapitel 4.2.2 wurde der windarme Standort in Hirschaid untersucht. Nun wird der Energie-Atlas Bayern hinzugezogen, um festzustellen, wo es in der Metropolregion Nürnberg Standorte gibt, die eine höhere Durchschnittswindgeschwindigkeit aufweisen. In Abbildung 12 ist ein Auszug aus dem Energie-Atlas Bayern zu sehen.

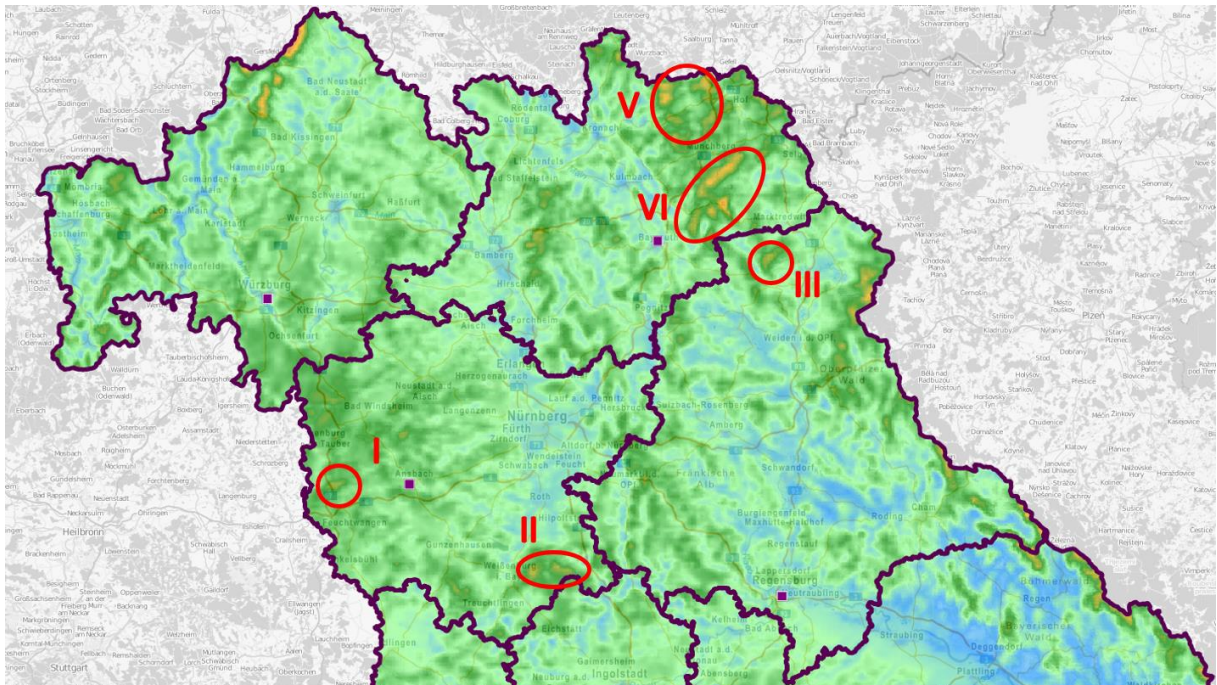


Abbildung 12: Mittlere Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe (Energie-Atlas Bayern. o. D.)

Beim Betrachten der Abbildung 12 fallen fünf Standorte auf, diese sind rot gekennzeichnet. An diesen beträgt die Windgeschwindigkeit mehr als 4 m/s. Die einzelnen Standorte werden nun genauer untersucht. Hierbei werden vor allem freie Flächen außerhalb der Wohngebiete analysiert. Auf diesen ist es möglich, größere vertikale Windenergieanlagen mit einer Leistung von 20 kW zu errichten. Die kleinen Anlagen, die auf den Dächern installiert werden können, werden nicht berücksichtigt, da diese lediglich eine Leistung von 5 kW aufbringen. Um die Leistung von einer horizontalen Anlage mit 4,1 MW zu erreichen, müssten demnach 820 dieser kleinen, vertikalen installiert werden. Um eine Anzahl von möglichen WEA herauszufinden, wird

davon ausgegangen, dass nicht alle Flächen für Windenergie zur Verfügung gestellt werden können, sondern nur ein Anteil von 30 Prozent⁴. Zudem muss mit einbezogen werden, dass eine vertikale Windenergieanlage in einem Energiepark einen Abstand von mindestens 22 m zur nächsten einhalten muss (Windkraft Journal. 17.07.2011). Dieser Abstand entspricht dem vierfachen Rotordurchmesser.

Standort I: Ansbach

Der erste windstarke Standort liegt in der Gemeinde Schillingsfürst im Landkreis Ansbach. Dort liegen Windgeschwindigkeiten von 4,4 m/s vor. In Abbildung 13 ist dieser Standort zu sehen.

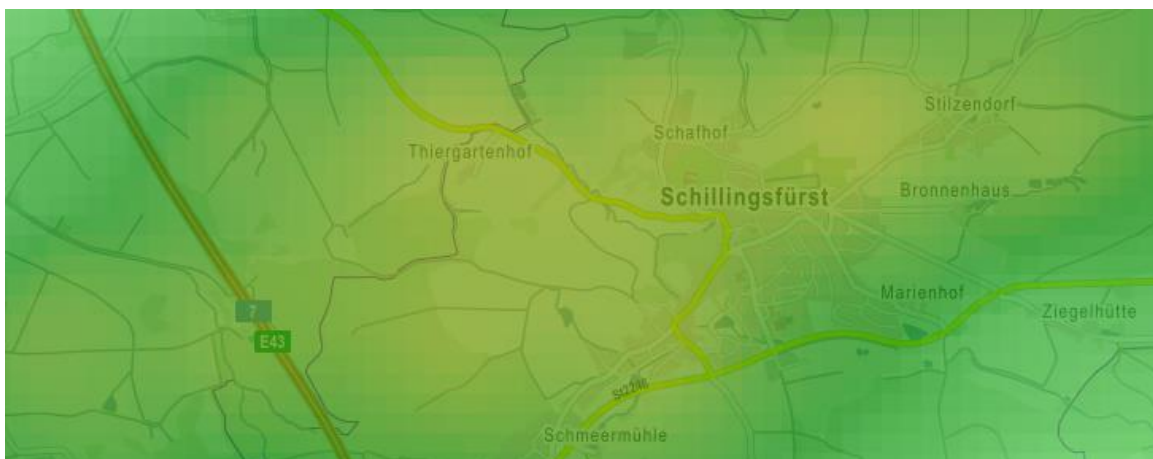


Abbildung 13: Standort Ansbach (Energie-Atlas Bayern. o D.)

An dem Standort Schillingsfürst (siehe Abb. 13) steht eine Fläche von 1,1 km² zur Verfügung, die zurzeit für landwirtschaftliche Zwecke verwendet wird. Hier könnten circa 66 vertikale Windenergieanlagen errichtet werden.

⁴ Dieser Wert wurde durch persönliche Kommunikation mit mehreren Landwirten ermittelt.

Standort II: Weißenburg-Gunzenhausen

Die beide Standorte Heidenheim und Meinheim liegen im Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen. Hierliegt eine Windgeschwindigkeit von ungefähr 4,5 m/s vor.



Abbildung 14: Standort Weißenburg-Gunzenhausen (Energie-Atlas Bayern. o D.)

Auch an diesen Standorten stehen potentielle Flächen zur Verfügung, die derzeit landwirtschaftlich genutzt werden. Insgesamt könnten auf eine Fläche von 1,9 km² 114 WEA gebaut werden.

Standort III: Tischenreuth

Der Standort Pullenreuth im Landkreis Tischenreuth weist eine Windgeschwindigkeit von 4,6 m/s auf. Das Gebiet ist in Abbildung 15 zu sehen.



Abbildung 15: Standort Tischenreuth (Energie-Atlas Bayern. o D.)

Der dort vorherrschende Wind kann allerdings nicht für die Energieerzeugung mittels vertikaler Kleinwindanlagen verwendet werden, da die nutzbaren Flächen im Wald liegen und somit ungünstige Bedingungen gegeben sind (siehe Abb. 15).

Standort IV: Fichtelgebirge

Der nächste windstarke Standort liegt im Fichtelgebirge im Landkreis Bayreuth und Wunsiedel. An diesen Orten liegen Windgeschwindigkeiten zwischen 4,5 und 5,4 m/s vor. Ein Auszug aus dem Energie-Atlas Bayern ist in Abbildung 16 zu sehen.

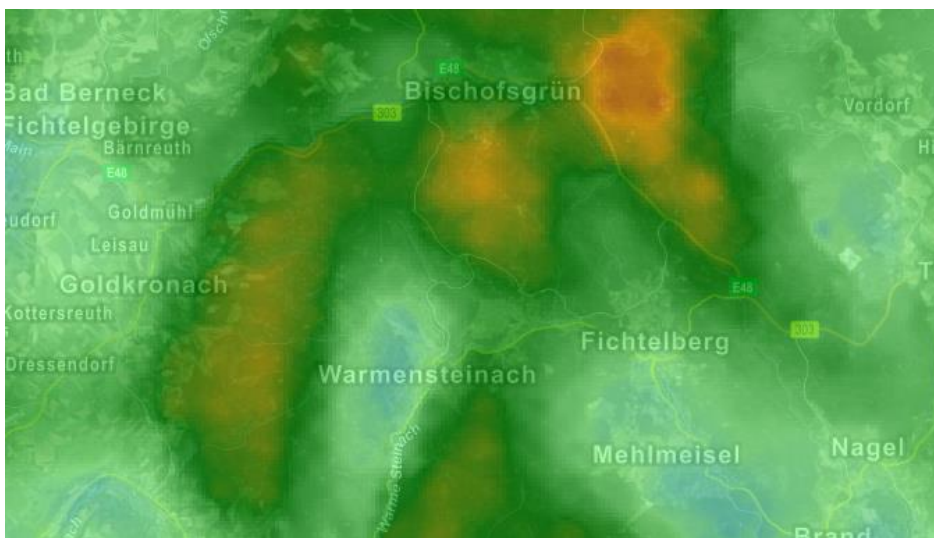


Abbildung 16: Standort Fichtelgebirge, Landkreis Bayreuth und Wunsiedel (Energie-Atlas. o. D.)

Da das windstarke Gebiet mitten im Fichtelgebirge liegt, kann auch der dort auftretende Wind nicht für die Energieerzeugung mittels vertikalen Kleinwindanlagen genutzt werden.

Der in Abbildung 17 zu sehende Standort befindet sich ebenfalls im Fichtelgebirge im Landkreis Hof. Dort weht der Wind mit einer Geschwindigkeit von circa 5 m/s.



Abbildung 17: Standort Fichtelgebirge, Landkreis Hof (Energie-Atlas Bayern, ohne Datum)

Im Landkreis Hof gibt es ungefähr 9,5 km² Flächen, die für die Landwirtschaft genutzt werden. Hier könnten 570 Windenergieanlagen gebaut werden.

Standort V: Hof

Der fünfte windstarke Standort, der betrachtet wird, liegt ebenfalls im Landkreis Hof. Dort gibt es fünf Gebiete, an denen die Windgeschwindigkeit zwischen 4,3 und 4,9 m/s beträgt (siehe Abb. 18)

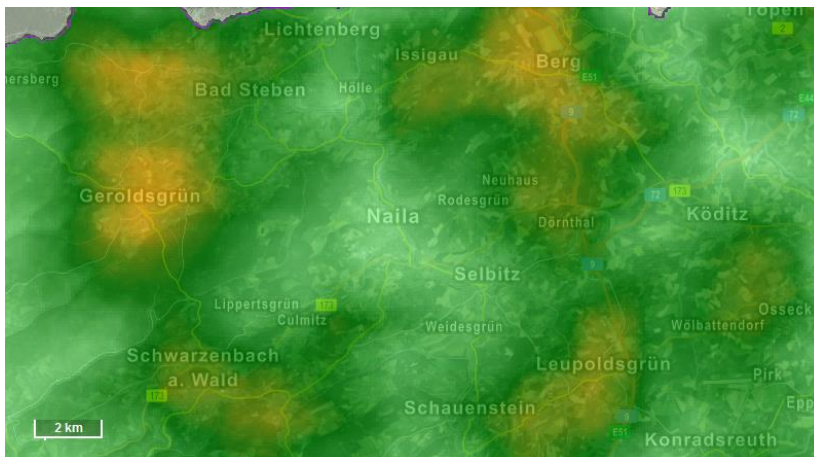


Abbildung 18: Standort Hof (Energie-Atlas Bayern, ohne Datum)

Die fünf in Abbildung 18 zu sehenden Gebiete, haben insgesamt eine 16,1 km² große Fläche, die der Zeit landwirtschaftlich genutzt wird. Auf dieser könnten 966 Windenergieanlagen platziert werden.

Zusammenfassung der Standorte für WEA

In Tabelle 7 ist eine Zusammenfassung der fünf betrachteten Standorte dargestellt.

Tabelle 7: Anzahl an möglichen Kleinwindanlagen in windstarken Gebieten

	Freie Fläche [km ²]	Nutzbare Fläche [ha]	Anlagenanzahl
I: Ansbach	1,1	33	66
II: Weißenburg-Gunzehausen	1,9	57	114
III: Tischenreuth	-	-	-
IV: Fichtelgebirge	9,5	285	570
V: Hof	16,1	483	966
Summe	28,6	858	1716

Somit ergibt sich eine überschlagene Anlagenanzahl in windstarken Gebieten, von 1.716. Werden dort WEA mit einer Leistung von 20 kW gebaut, können diese bei einem Benutzungsgrad von 0,04⁵ eine Gesamtleistung von circa 1,4 MW erzielen. In Tabelle 8 ist zu sehen welchen Anteil an Windenergie diese Anlagenform in dem jeweiligen Ausbaujahr ausmacht.

Tabelle 8: Erzeugungsanteil vertikaler WEA an der gesamten Windenergie

Jahr	Prozentualer Anteil an der gesamten Windenergie [%]
2030	0,16
2050	0,08

In der Tabelle 8 ist ersichtlich, dass vertikale Energieanlagen nur einen sehr kleinen Beitrag zu der durch Windkraft erzeugten Energie beitragen können. Dies liegt vor allem an der geringen Anlagengröße. Um die Energie zu erzeugen, die eine

⁵ Der Benutzungsgrad von 0,04 wurde ebenfalls aus den MERRA-2 Daten für eine Höhe von 10 Metern berechnet.

horizontale Windkraftanlage mit 4,1 MW bereitstellt, müssten 205 vertikale Anlagen installiert werden.

Welche Technologie an welchen Standort eingesetzt werden sollte, ist nicht ohne weiteres zu ermitteln. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ist es notwendig, für jeden einzelnen Standort Messungen analog zu der oben aufgeführten Messung durchzuführen. Diese Werte müssen im Anschluss ausgewertet und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden. Es ist zudem notwendig, die Herstellungs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die Installationskosten zu betrachten.

4.4 Vor- und Nachteile von vertikalen Windenergieanlagen

Um die Frage zu klären, ob vertikale Anlagen sinnvoll sind, werden nun die Vor- und Nachteile der vertikalen gegenüber der horizontalen Windenergieanlagen in Tabelle 8 veranschaulicht.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile vertikaler WEA (Klein-Windkraftanlagen. 12.2011)

Vorteile	Nachteile
Keine Windnachführung nötig	Geringer Wirkungsgrad
Für turbulente Gebiete geeignet	Geringere Wirtschaftlichkeit
Einfacher Genehmigung (höhere Akzeptanz)	Hohe Schwingungen und Belastungen
Geringe Lärmbelastigung	Nur geringe Bauhöhe
Kein Schattenschlag	Große Anzahl wird benötigt
Einfache Wartung	

Beim Betrachten der Tabelle 8 ist zu erkennen, dass vertikale Windenergieanlagen in den Punkten Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit gegenüber den horizontalen deutlich schlechter abschneiden. Die Kilowattstunde einer vertikalen Anlage kostet circa 38 Cent. Die der horizontalen Anlagen hingegen nur 16 Cent (Vertikale Kleinwindanlagen. 12.2011). Außerdem müssen aufgrund der geringen Anlagenleistung deutlich mehr Anlagen installiert werden. Dadurch wird mehr landwirtschaftliche Nutzfläche versiegelt. Somit lässt sich sagen, dass vertikale WEA aus ökonomischer und ökologischer Sicht weniger sinnvoll eingesetzt werden können. Dennoch können sie einen kleinen Anteil der benötigten Energie erzeugen und sind von der Bevölkerung wegen des geringen Schattenschlags, der niedrigeren Lärmbelastigung und der kleineren Bauhöhe eher akzeptiert als horizontale Anlagen.

5 Fazit

In dieser Projektarbeit wurde das Thema „Analyse des Windpotentials in der Europäischen Metropolregion Nürnberg im Hinblick auf die Energiewende“ untersucht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Windenergie zu einer vollständig regenerativen Versorgung, bei einem Energiemix von 65 Prozent Wind- und 35 Prozent Solarenergie, beitragen kann. Dafür müssen im Vergleich zum Jahr 2017 weitere 1256 Windkraftanlagen mit einer Leistung von 4,1 MW installiert werden. Die maximale Ausbausumme liegt bei 1890 Anlagen. Mit dieser Anzahl ist es sogar möglich, rund 78 Prozent des gesamten Strombedarfs abzudecken.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse vertikaler Windenergieanlagen hat ergeben, dass es aus ökonomischer und ökologischer Sicht nicht sinnvoll ist, diese Anlagenart zur Stromerzeugung zu nutzen. In windstarken Gebieten steht eine Fläche von insgesamt 858 Hektar zur Verfügung, die zurzeit landwirtschaftlich genutzt wird. Hier ist es möglich, 1716 vertikale Windenergieanlagen mit einer Leistung von 20 kW zu installieren. Diese enorme Menge von WEA trägt allerdings nur einen verhältnismäßig sehr kleinen Anteil von 0,08 Prozent an der durch Windkraft produzierten Energie bei.

Literaturverzeichnis

Energie-Atlas Bayern (). Durchschnittliche Anlage. Abgerufen am 24.5.2018 von https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/daten.html

Energie-Atlas Bayern (). Gebietskulisse. Abgerufen am 17.5.2018 von https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/940/Karte_Gebietskulisse_A4.pdf.

Europäische Kommission. (). Pariser Übereinkommen. Abgerufen am 6.5.2018 von https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de

Facharbeit Moritz Gutsch. (2012/13). Einfluss von Flügelanzahl, Flügelprofil, Rotordurchmesser und Anströmbedingung auf die Drehzahl und den Wirkungsgrad eines Darrieus H-Rotors. Abgerufen am 06.06.2018 von http://www.st-antoniush-gymnasium.de/files/UNTERRICHT/Alle_Faecher/Physik/Wettbewerbe/Gutsch-%20Facharbeit.pdf

Haute Innovation. (08.2011). Kleinwindanlagen mit vertikaler Achse. Abgerufen am 11.05.2018 von <http://www.haute-innovation.com/de/magazin/energie/savonius-und-darrieus-rotoren.html>

Klein-Windkraftanlagen. (12.2011). Funktionsweise und Bauformen vertikaler Windkraftanlagen. Abgerufen am 03.06.2018 von <https://www.kleinwindkraftanlagen.com/technik/vertikale-windkraftanlagen/>

Klein-Windkraftanlagen. (12.2011). Vertikale Windkraftanlagen im Vergleich mit horizontalen Anlagen. Abgerufen am 03.06.2018 von <https://www.kleinwindkraftanlagen.com/news/vertikale-windkraftanlagen-im-vergleich-mit-horizontalen-anlagen/>

KommunalWiki. (10.01.2018). 10H-Regelung. Abgerufen am 07.06.2018 von <http://kommunalwiki.boell.de/index.php/10H-Regelung>

Ramona Schmelmer, Petra Denk (2014). Vertikale Kleinwindanlagen in Bayern: Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse. Wiesbaden: Springer Gabler.

Regierung von Unterfranken. (31.08.2017). Schnellübersicht Fläche und Bevölkerung. Abgerufen am 17.05.2018 von

https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/uiz/schnell%C3%BCbersicht_f%C3%A4che_und_bev%C3%B6lkerung_170831.pdf

TenneT. (2018). Strommarkt in Deutschland. Abgerufen am 10.05.2018 von <https://www.tennet.eu/de/strommarkt/strommarkt-in-deutschland/>

Windkraft Journal. (17.07.2011). Windenergie und Erneuerbare Energien Nachrichten. Abgerufen am 04.06.2018 von <https://www.windkraft-journal.de/2011/07/17/fur-windparks-sind-vertikalturbinen-bis-zu-10-mal-effektiver/1838>

Ökosystem Erde. (2015). Die Folgen des Klimawandels. Abgerufen am 6.5.2018 von <http://www.oekosystem-erde.de/html/klimawandel-02.html>