

# **Evaluierung der Auswirkungen von gebäudemontierten KWEA auf Performance, Personen, Gebäude und Umgebung**

SmallWindPower@Home

K. Leonhartsberger, A. Hirschl,  
S. Schidler, B. Priglinger, M. Peppoloni,  
D. Österreicher, K. Baumann-Stanzer,  
S. Stenzel, C. Lotteraner, T. Duer,  
K. Leeb, K. Strohkendl, C. Tiefgraber,  
A. Stökl, F. Lachinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**10/2022**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Evaluierung der Auswirkungen von gebäudemontierten KWEA auf Performance, Personen, Gebäude und Umgebung

SmallWindPower@Home

Kurt Leonhartsberger, MSc., Alexander Hirschl, MSc.,  
Mag.<sup>a</sup> Dr.<sup>in</sup> Susanne Schidler, DI B. Priglinger,  
M. Peppoloni, MSc., D. Österreicher, BSc.  
Fachhochschule Technikum Wien

Dr. Kathrin Baumann-Stanzer, Maga. Sirma Stenzel,  
Dr. Christoph Lotteraner  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

Tanja Duer  
DUER Solutions GmbH

Ing. Kurt Leeb  
Solvento energy consulting GmbH

Konstantin Strohkendl, Christoph Tiefgraber,  
Alexander Stökl, Florian Lachinger  
Energiewerkstatt Verein

Wien, Mai 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Kleinwindkraft</b> .....	<b>14</b>
	3.1. Definition .....	14
	3.2. Technik.....	14
	• 3.2.1. Horizontalachsiger Auftriebsläufer.....	14
	• 3.2.2. Vertikalachsiger Auftriebsläufer (Darrieus-Rotor).....	16
	• 3.2.3. Widerstandsläufer .....	17
	• 3.2.4. Konzentratoren.....	18
	3.3. Marktentwicklung .....	18
	• 3.3.1. International .....	18
	• 3.3.2. Kleinwindkraft in Österreich .....	20
<b>4</b>	<b>Ausgangssituation und Problemstellung</b> .....	<b>23</b>
	4.1. Stand der Technik .....	23
	4.2. Problemstellung .....	25
	4.3. Projektziele .....	27
<b>5</b>	<b>Mess- und Prüfinfrastruktur</b> .....	<b>28</b>
	5.1. Energieforschungspark Lichtenegg.....	28
	• 5.1.1. Infrastruktur.....	29
	• 5.1.2. Mess- und Prüfdienstleistungen.....	29
	5.2. Erweiterung der Messinfrastruktur zur Untersuchung von gebäudemontierten Klein- und Mikrowindanlagen .....	30
	• 5.2.1. Infrastruktur freies Messfeld .....	31
	• 5.2.2. Errichtung Flachdach .....	32
	• 5.2.3. Errichtung Giebeldach .....	32
	• 5.2.4. Vorbereitungen Wirkungsmonitoring KWEA.....	32
<b>6</b>	<b>Modellierung, Simulation und messtechnische Erfassung der Strömung</b> .....	<b>33</b>
	6.1. Strömungsmodellierung und -simulation .....	33
	• 6.1.1. Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen.....	34
	• 6.1.2. Vergleich der gemessenen Windverhältnisse über Giebeldach und Flachdach.....	40
	• 6.1.3. Modell-Modell-Vergleich.....	42
	6.2. Messtechnische Erfassung .....	45
	6.3. Verifikation der Simulationsergebnisse .....	51

<b>7</b>	<b>Evaluierung des Betriebsverhaltens.....</b>	<b>54</b>
	7.1. Kleinwindkraftanlagen im Test .....	54
	• 7.1.1. BluePower BlueOne.....	54
	• 7.1.2. Venturicon 3.Zero Windturbine .....	54
	• 7.1.3. Vertikon M.....	55
	• 7.1.4. SuperWind 1250.....	55
	7.2. Messzeiträume und Windmessdaten .....	55
	7.3. Monitoring des Betriebsverhaltens und Ertragsmessung .....	57
	• 7.3.1. BlueOne .....	57
	• 7.3.2. Vertikon M.....	59
	• 7.3.3. Superwind 1250.....	61
	• 7.3.4. Venturicon .....	63
	• 7.3.5. Zusammenfassung.....	65
	7.4. Vermessung der Leistungskennlinie .....	66
	• 7.4.1. Methode .....	66
	• 7.4.2. Ergebnisse.....	67
	7.5. Schall- und Infraschallmessung.....	73
	• 7.5.1. Methode .....	73
	• 7.5.2. Ergebnisse.....	74
	7.6. Vibrations- und Schwingungsmessung .....	75
	• 7.6.1. Methode .....	75
	• 7.6.2. Ergebnisse.....	76
	7.7. Power Quality Messungen.....	77
	• 7.7.1. Methode .....	78
	• 7.7.2. Ergebnisse.....	78
<b>8</b>	<b>Umweltwirkungen von KWEA .....</b>	<b>80</b>
	8.1. Methoden .....	80
	• 8.1.1. Klimabilanz.....	81
	8.2. Kritikalität.....	84
	8.3. Toxizität.....	85
	8.4. Konfliktrohstoffe .....	86
	8.5. Erweiterung der Bewertungskriterien - Technikfolgenabschätzung .....	86
	8.6. Vergleichende Bewertung der Anlagen .....	87
	8.7. Ergebnisse .....	87
	• 8.7.1. Sachbilanz .....	87

• 8.7.2.	Wirkungsabschätzung.....	94
• 8.7.3.	Energetische und CO <sub>2</sub> -Amortisation.....	95
8.8.	Kritikalität und Toxizität der eingesetzten Rohstoffe sowie Umgang mit Konfliktrohstoffen	99
• 8.8.1.	Kritikalität .....	99
• 8.8.2.	Toxizität .....	100
• 8.8.3.	Konfliktrohstoffe.....	100
• 8.8.4.	Technikfolgenabschätzung .....	100
• 8.8.5.	Auswertung.....	105
• 8.8.6.	Ergebnisse - Gesamtbewertung der Anlagen .....	105
• 8.8.7.	Ergebnisse - Einfluss der Dachform auf die Bewertung .....	108
<b>9</b>	<b>Evaluierung und Bewertung .....</b>	<b>110</b>
9.1.	Evaluierung der Strömungsbeeinflussung .....	110
9.2.	Evaluierung von Leistungskurve, Energieertrag und -prognosen .....	114
• 9.2.1.	BlueOne .....	116
• 9.2.2.	Vertikon M.....	117
• 9.2.3.	Superwind.....	118
• 9.2.4.	Venturicon .....	119
9.3.	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit.....	120
• 9.3.1.	BlueOne .....	121
• 9.3.2.	Vertikon M.....	123
• 9.3.3.	Superwind.....	124
• 9.3.4.	Venturicon .....	125
9.4.	Evaluierung Schwingungsentkopplung .....	126
<b>10</b>	<b>Anforderungen, Kriterien und Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>128</b>
10.1.	Entwicklung eines Kriterienkatalogs.....	128
• 10.1.1.	Bewertungssystem – Kriterien-Entwicklung.....	128
• 10.1.2.	Kriterienkatalog .....	128
10.2.	Handlungsempfehlungen.....	135
• 10.2.1.	Standortbewertung und -auswahl.....	135
• 10.2.2.	Auswahl einer KWEA .....	136
• 10.2.3.	Detailplanung, Vorbereitung und Betrieb .....	141
10.3.	Umweltwirkungen / Nachhaltigkeit gebäudemontierter KWEA .....	146
<b>11</b>	<b>Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....</b>	<b>147</b>

11.1.Auswirkungen von komplexen Hindernissen auf die Strömung sowie auf die Anströmung von gebäudemontierten Kleinwindenergieanlagen .....	147
11.2.Auswirkungen dachmontierter KWEA auf deren Performance.....	148
• 11.2.1. Auswirkungen auf den Energieertrag.....	148
• 11.2.2. Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit.....	150
11.3.Auswirkungen unterschiedlicher, dachmontierter KWEA auf das Gebäude, dessen Bewohner und die unmittelbare Umgebung.....	151
11.4.Umweltwirkungen gebäudemontierter KWEA .....	151
• 11.4.1. Auswirkungen auf Anwohner:innen/Anrainer:innen .....	151
• 11.4.2. Auswirkungen auf die Umwelt .....	152
• 11.4.3. Globale Auswirkungen.....	153
<b>12 Verzeichnisse.....</b>	<b>154</b>
12.1.Literaturverzeichnis .....	154
12.2.Abbildungsverzeichnis .....	158
12.3.Tabellenverzeichnis.....	163

# 1 Kurzfassung

## **Ausgangssituation, Problematik und Motivation:**

Speziell unter der Prämisse eine versorgungssichere, nachhaltige und resiliente urbane Energieversorgung sicher zu stellen, die nicht ausschließlich auf Energieerzeugung aus dem Umland angewiesen ist, gilt es, die vorhandenen Energieressourcen in der Stadt bestmöglich zu nutzen. Neben der Photovoltaik stellt die Kleinwindkraft eine der wenigen Möglichkeiten dar, auch in dicht bebauten Gebieten sowie im städtischen Umfeld umweltfreundlich elektrische Energie zu erzeugen und somit die Ziele der neuen EU-Gebäuderichtlinie, mit der Forderung nach „nearly zero energy“ Gebäuden, zu erreichen. Gemeinsam mit dem immer stärker werdenden Wunsch nach privater Energieautonomie führt dieser Umstand dazu, dass Kleinwindenergieanlagen (KWEA) vermehrt auch in den Fokus privater Haushalte rücken und zunehmend auch in dicht besiedelten Gebieten bzw. im Stadtgebiet auf oder in unmittelbarer Nähe zu Ein- und Mehrfamilienhäusern errichtet werden. Mangels Erfahrungswerte wird jedoch dabei oftmals der Einfluss der Umgebung auf die Performance der Anlage vernachlässigt. Geringe Erträge bzw. häufige Störungen und Defekte sind unter anderem die Folgen dieser Planungsfehler. Darüber hinaus müssen auch sicherheitstechnische Aspekte sowie die unmittelbaren Auswirkungen der KWEA (z. B. Schall, Infra- und Körperschall, Vibrationen, Schwingungen) auf das Gebäude, dessen Bewohner:innen sowie die bewohnte Umgebung berücksichtigt werden, um eine Beeinflussung der Lebensqualität zu vermeiden.

## **Ziele und Innovationsgehalt:**

Um diese Aspekte bei zukünftigen Planungen berücksichtigen zu können, bedarf es einer umfassenden messtechnischen Evaluierung. Im Zuge des Projekts wurden daher mehrere am Markt verfügbare KWEA unterschiedlicher Technologie auf einem Gebäude montiert und unter Berücksichtigung verschiedener Dachaufbauten im Praxisbetrieb messtechnisch untersucht. Dabei wurden primär folgende Ziele verfolgt:

- Evaluierung der Auswirkungen von komplexen Hindernissen (Wohngebäude mit unterschiedlichen Dachaufbauten) auf die Strömung sowie auf die Anströmung von gebäudemontierten KWEA unter realen Betriebs- und Umgebungsbedingungen
- Messtechnische Evaluierung der Auswirkungen unterschiedlicher, dachmontierter KWEA auf deren Performance (Ertrag, Lebensdauer, ...) sowie auf das Gebäude, dessen Bewohner:innen und die unmittelbare Umgebung hinsichtlich Schall, Infrschall und Körperschall, Vibrationen und Schwingungen sowie sicherheitstechnischer Aspekte

## **Methodische Vorgehensweise:**

Im Energieforschungspark Lichtenegg wurden zwei Gebäudenachbauten mit verschiedenen Dachaufbau (Flachdach, Giebeldach) errichtet. Während sich bisher durchgeführte Untersuchungen auf Simulationen bzw. Modellmessungen im Windkanal beschränkt haben, bietet diese Infrastruktur die Möglichkeit, KWEA unter realen Umgebungsbedingungen direkt auf einem Gebäude zu vermessen und die Auswirkung gebäudemontierter KWEA messtechnisch zu erfassen. Dazu wurden im Betrieb

- die Strömungsverhältnisse rund um das Gebäude (Windgeschwindigkeit, -richtung und -beschleunigung, Turbulenzintensität und -frequenz),

- Ertrag und ausgewählte Betriebsparameter der KWEA (z.B. Leistung, Drehzahl),
- Vibrationen und Schwingungen an der KWEA sowie im/am Gebäude,
- Schall und Infraschall in unmittelbarer Umgebung sowie Körperschall im Gebäude

erfasst. Im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtung wurden die Messergebnisse mit einer Technikfolgenabschätzung (Lebenszyklusanalyse, Wirtschaftlichkeitsbewertung, Auswirkungen auf Betroffene, ...) ergänzt.

#### **Ergebnisse und Erkenntnisse, Ausblick:**

Auf Basis der gewonnen Mess- und Erfahrungswerte wurden ein Kriterienkatalog für die Umsetzung von KWEA in dicht bebauten und bewohnten Gebieten auf oder in unmittelbarer Umgebung von Wohngebäuden sowie ein Anforderungskatalog für die Prüfung/Zertifizierung von gebäudemontierten KWEA erarbeitet. Um die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden diese in einem Leitfaden für die Errichtung und den Betrieb von gebäudemontierten KWEA zusammengefasst.

## 2 Abstract

### **Initial situation, problem to solve and motivation:**

Following the objective to create sustainable and resilient urban energy supply that doesn't rely purely on the supply from surrounding areas, it is necessary to harvest urban energy potentials in the best possible manner. Alongside photovoltaics, the application of roof-mounted small wind turbines in urban and densely populated areas is one of the few promising alternatives to achieve the ambition of the EU-building directive with the requirement of "nearly zero energy buildings". Paired with the growing desire for private energy autonomy, this circumstance elevates small wind turbines (SWT) into focal topic for private households and communities in densely populated or urban areas. A growingly popular option is to install SWT on the roof of buildings. Due to a lack of experience in this regard, environmental impacts and poorly performing turbines are often caused by these installations. Scarce yields, disturbances and frequent failures are consequences of these design errors. In addition, safety aspects and environmental impacts of SWT such as noise, vibrations and oscillations need to be considered in order to avoid life quality constraints for neighbours.

### **Goals and level of innovation:**

In order to give planners the necessary knowledge to consider these aspects, a number of assessments has been performed. These assessments have been performed on different types of SWT which have been installed on different types of buildings and monitored throughout the project. The main goals of these assessments were:

- The evaluation of the impact of complex obstacles (buildings with various roof types) on the surrounding wind flow as well as on the wind flow feeding the SWT under real life conditions.
- Metrological assessment of the impact of various building mounted SWT on the performance (yield, lifetime, ...) as well as on the building, its residents and the immediate surroundings. The assessment included acoustic measurements, measurements of body borne noise, oscillation measurements and the evaluation of safety aspects

### **Methods:**

In order to reach these goals two building replicas with different roof shapes (flat roof, gabled roof) have been erect in the Lichtenegg research park. Whilst in previous research, only simulations or scaled wind tunnel tests on these topics have been performed, this infrastructure allows to monitor SWT directly on a building under real life conditions and to assess its impacts. In order to do so, the following parameters were recorded:

- Wind conditions around the building (wind speed, wind direction, turbulence intensity and frequency)
- Power output and selected operational parameters of the turbines (RPM, ...)
- Vibrations and oscillations at the turbine as well as in the building
- Noise emissions and infrasound in proximity as well as body borne sound in the building

Within the framework of holistic assessment the measurement results were supplemented with a technological impact assessment (life cycle assessment, economical assessment, repercussions on concerned parties).

**Results and findings, outlook:**

Based on the achieved results and experiences a list of criteria for SWT in urban or densely populated areas and building mounted SWT was deducted. Furthermore, a catalogue of requirements for testing and certifying building mounted SWT was developed. In order to make the results available for the public, a guideline for planning, installing and operating a building mounted SWT was concluded.

# 3 Grundlagen der Kleinwindkraft

## 3.1. Definition

Für den Begriff „Kleinwindkraft“ gibt es keine exakte Definition in der Fachliteratur. Laut IEC 61400-2, Anhang H werden Windkraftanlagen als Kleinwindenergieanlagen (KWEA) bezeichnet, wenn die vom Rotor überstrichene Fläche kleiner als 200 m<sup>2</sup> ist und die Spannung unter 1.000 V (bei Wechselspannung) bzw. 1.500 V (bei Gleichspannung) liegt. Dazu zählen in der Regel alle Windkraftanlagen mit einer Generatorleistung kleiner 50 kW. (OVE/ON 2011)

## 3.2. Technik

Kleinwindenergieanlagen werden in unterschiedlichen Bauformen und technischen Eigenschaften angeboten. Dabei ist wie bei der Großwindkraft die gängigste Bauform der 3-Blatt Horizontalrotor, gefolgt von vertikalachsigen Auftriebsläufern und Widerstandsläufer. Einige experimentelle Bauformen nutzen die Energie durch oszillierende Schwungmassen. Die häufigste Form der KWEA bilden die Auftriebsläufer, welche über ein aerodynamisches Profil auf den Rotoren den über den Wind gewonnenen Auftrieb in eine Drehbewegung umwandeln. Grundsätzlich wird in der Windkraft der strömenden Luft kinetische Energie (Wind) entzogen und diese dadurch abgebremst und in Rotationsenergie umgewandelt, die wiederum von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Das Betz'sche Gesetz beschreibt dabei das Verhältnis aus mechanischer Leistung und Leistung im Wind und daher den maximal möglichen Umwandlungsgrad von 59,2 %. Dieser ist unter realen Umständen, aufgrund von mechanischen Verlusten praktisch nicht erreichbar (Gasch, Kamieth 2016).

### 3.2.1. Horizontalachsiger Auftriebsläufer

Auftriebsläufer mit horizontal liegender Drehachse stellen die häufigste Bauform von KWEA dar, aufgrund des im Vergleich zu den anderen Anlagenkonzepten höchsten Wirkungsgrad (40 % bis 50 %). Das aerodynamische Profil der Rotorblätter ist mit einer bestimmten Winkelabweichung von der Drehachse installiert und bewirkt bei Anströmung durch den Wind einen Auftrieb und schlussendlich die Drehbewegung.

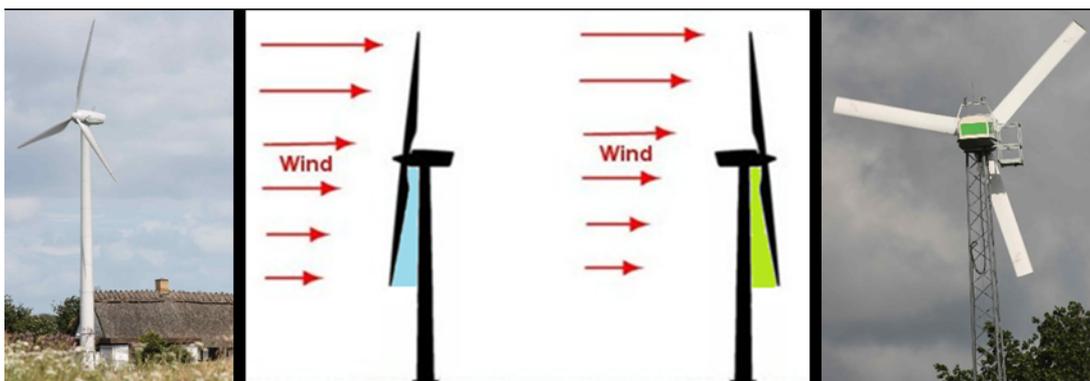


Abbildung 1: Luvläufer (links) und Leeläufer (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

Ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal ist die Orientierung des Rotors zum Wind, wobei zwischen Luvläufern – der Rotor ist dem Wind zugewandt – und Leeläufern – der Rotor pendelt im Wind – unterschieden wird (siehe Abbildung 1) (Gasch, Kamieth 2016).

Bei Luvläufern muss je nach Ausführung der Rotor durch eine Windfahne oder elektronisch in den Wind gerichtet werden. Beim Luvläufer wirkt der Rotor selbst als Fahne zur Ausrichtung in den Wind. Zusätzlich gibt noch die Rotorblattzahl als Unterscheidungsmerkmal. Es wird zwischen 1-Blatt, 2-Blatt und 3-Blattrotoren (selten 4-Blattrotoren) unterschieden, wobei sich aufgrund günstiger Massenverteilung am Rotor und weitem Drehzahlbereich der 3-Blattrotor als häufigste Bauform durchgesetzt hat (Hau 2008).

Die Leistungsbegrenzung der Anlagen wird entweder durch die Drehung der Rotorblätter aus dem Wind (Pitch-Regelung) und damit einer Auftriebsreduktion bewirkt oder bei fixem Einbau der Rotorblätter durch den physikalisch bedingten Strömungsabriss bei steigender Drehzahl (Stall-Regelung). Vorteilhaft ist hier die Pitch-Regelung die elektronisch oder über die Zentripetalkraft und Wuchtmassen an den Rotoren möglich ist. Dabei lässt sich im Vergleich zur Stall-Regelung die Nennleistung nicht nur bei einem bestimmten Punkt erreichen, sondern über einen weiten Windgeschwindigkeitsbereich regeln. Zusätzlich werden KWEA über den Generatorkurzschluss und/oder über mechanische Bremsen bei Überdrehzahl abgebremst (Hau 2008).

Erfahrungen aus Forschungsprojekten haben gezeigt, dass sich für das urbane Gebiet beim horizontalachsigen KWEA bestimmte systembedingte Vor- und Nachteile gegenüber anderen Technologien ergeben:

#### Vorteile:

- Horizontalachsige Anlagen weisen den höchsten Umwandlungswirkungsgrad von 40 bis 50 % aufgrund einer größtenteils homogenen Anströmung am gesamten Rotor auf (Hau 2008).
- Die Pitch-Regelung ermöglicht die effiziente Nutzung eines weiten Windgeschwindigkeitsbereichs.
- Die symmetrisch verteilte Windlast macht diesen Typ von KWEA nicht so anfällig für Schwingungen und Vibrationen, welche speziell im besiedelten Gebiet als problematisch angesehen werden können.

#### Nachteile:

- Aufgrund der horizontalen Rotorachse kann dieser Anlagentyp nur Wind aus einer Richtung aufnehmen. Im urbanen bzw. strömungstechnisch komplexen Gebiet wechseln jedoch Windrichtung und Intensität oftmals rasch und stark. Daher muss der Rotor beim Windrichtungswechsel erst ausgerichtet werden.
- Die im Vergleich zu anderen Typen verhältnismäßig hohen Blattspitzengeschwindigkeiten führen zu erhöhten Schallemissionen, was sich speziell im dicht besiedelten Gebiet problematisch für Personen sein kann. Dieser Umstand wird verdeutlicht durch den Umstand, dass mit 25 % höherer Drehzahl der Geräuschpegel um 6 dB(A) steigt (Hau 2008).
- Im urbanen Gebiet sind aufgrund von Hindernissen die Luftmoleküle größtenteils nicht laminar gerichtet, sondern können auch aufwärts strömen. Diese vertikale Schrägströmung kann von diesem Anlagentyp verhältnismäßig schlecht genutzt werden.

### 3.2.2. Vertikalachsiger Auftriebsläufer (Darrieus-Rotor)

Bei der vertikalachsigen Drehachse rotieren meistens drei Rotorblätter mit festem Abstand zur Achse. Dabei lässt sich der Winkel der Rotorblätter nicht steuern – spezielle Konzepte haben verstellbare Rotorblätter erprobt, diese sind aber nicht über die Prototypenreife gekommen. Das Grundprinzip für die Drehung des Rotors ist wie bei horizontalachsigen KWEA das aerodynamische Auftriebsprinzip. Hierbei ändert das Rotorblatt jedoch seinen relativen Winkel bei einer Umdrehung zum Wind, was zu unterschiedlichen Auftriebswerten führt. Abbildung 2 links zeigt das Auftriebsprinzip, wobei die Länge der roten Pfeile und Richtung den momentanen Auftrieb eines Rotorblatt pro Quadrant anzeigt. Statt geraden Rotorblättern haben einige vertikalachsige Anlagen eine Helixform der Rotoren, um auch vertikale Winde nutzen zu können (Hau 2008).

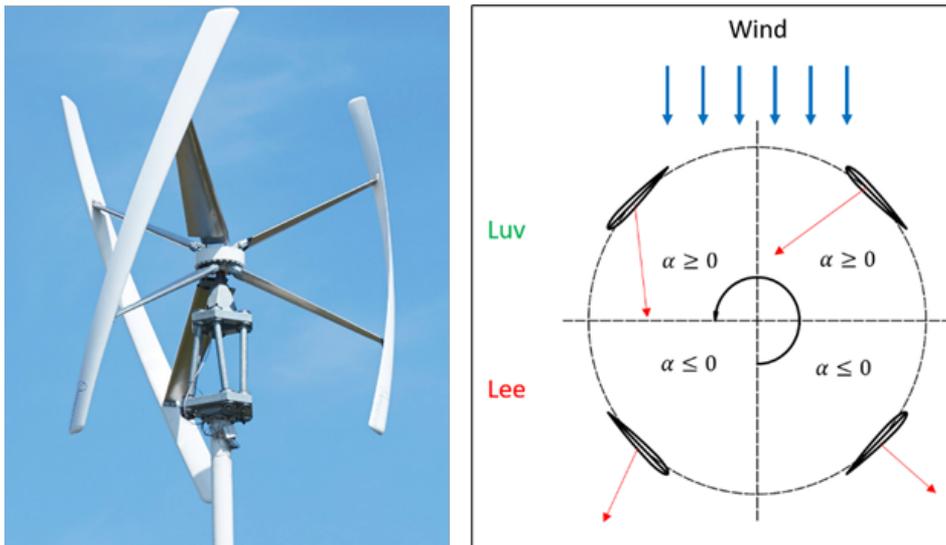


Abbildung 2: vertikalachsiger Darrieus-Helix Rotor (rechts) und Funktionsprinzip (links) (Quelle: eigene Darstellung)

Die Leistungsregelung wird einmal durch Strömungsabriss (Stall-Regelung) und durch den Generatorkurzschluss ermöglicht. Selten haben diese Anlagen auch eine mechanische Bremse verbaut.

Aufgrund der vertikalen Achslage ergeben sich Vorteile, welche speziell im urbanen Bereich mit turbulenter Strömung ausschlaggebend sind.

#### Vorteile:

- Die vertikale Achslage lässt die Nutzung des Windes gleichzeitig aus verschiedenen Richtungen zu, da sich in jeder Himmelsrichtung ein Rotorblatt befindet (Hau 2008).
- Des Weiteren wird keine Nachführung des Rotors in den Wind benötigt (Hau 2008).
- Die maximale Drehzahl dieses Anlagentyps ist verglichen mit einer leistungsbezogenen gleichen Anlage geringer. Schallemissionen sind daher vergleichsweise geringer, was in besiedelten Gebieten vorteilhaft ist.
- Die Helixform lässt die Nutzung von Schrägströmungen zu, welche speziell bei der Gebäudemontage vorkommen.

#### Nachteile:

- Der Anlagentyp hat aufgrund der ungleich verteilten Auftriebskräfte am Rotor einen geringeren Wirkungsgrad, der zwischen 30 und 40 % liegt (Hau 2008).
- Zusätzlich führt der Umstand der ungleich verteilten Auftriebskräfte zu Schwingungen und Vibrationen, die bei diesem Anlagentyp durch Entkopplungselemente von der Tragstruktur getrennt werden müssen (Hau 2008).

### 3.2.3. Widerstandsläufer

Anders als Auftriebsläufer funktionieren Widerstandsläufer (Savonius-Rotoren) nach dem Prinzip des Widerstands. Eine dem Wind zugewandte Fläche wird durch den Winddruck um eine vertikale Achse in Drehung versetzt. In Abbildung 3 rechts ist das Funktionsprinzip abgebildet. Dabei sind die Rotoren gekrümmt. Der Rotor, welcher mit der Krümmung dem Wind zugewandt ist, hat einen geringeren Windwiderstandswert ( $c_w 0,3$ ) als die hohle Seite ( $c_w 1,3$ ). Der Unterschied der Windwiderstandswerte bringt den Rotor in Drehung. Diese älteste Form der Windkraftnutzung zeichnet sich durch den einfachen Aufbau aus (Gasch, Kamieth 2016).

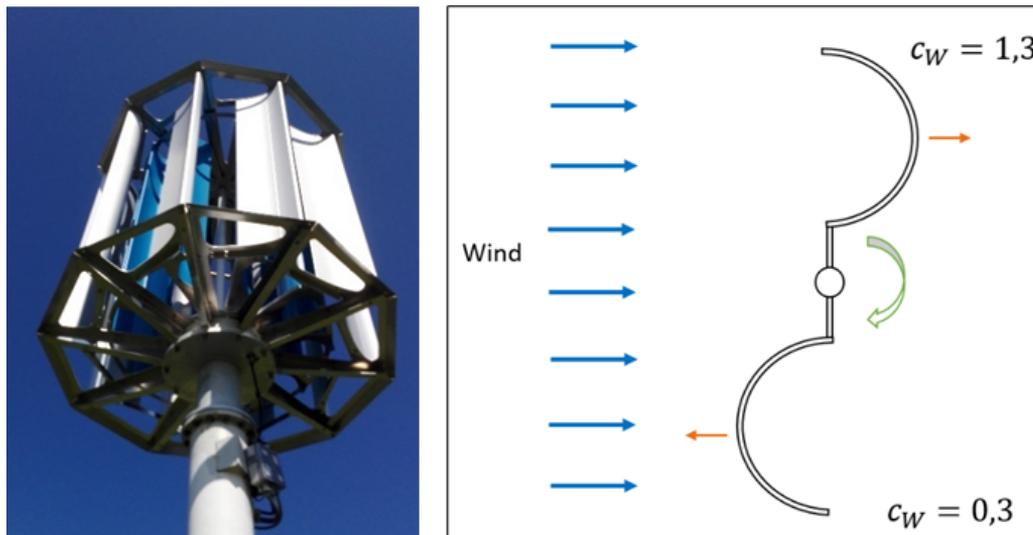


Abbildung 3: Savonius-Rotor (links) und Funktionsprinzip (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

#### Vorteile:

- Da bei diesem Typ kein Auftrieb an einem Rotorblatt generiert werden muss, kann dieser Anlagentyp schon bei sehr geringen Windgeschwindigkeit (1 bis 2 m/s) anlaufen. Dieser Vorteil ist speziell im urbanen Gebiet von Vorteil.
- So wie beim Darrieus-Helixrotor ist keine Windnachführung aufgrund der vertikalen Achslage nötig. Der Wind kann wiederum aus jeder Richtung genutzt werden.
- Durch die geringen Drehzahlen sind Schallemissionen bei diesem Anlagentyp vergleichsweise gering.

#### Nachteile:

- Da immer ein Rotor gegen den Wind gedreht werden muss und dieser einen vergleichsweise hohen Windwiderstandsbeiwert hat, liegt der maximale Wirkungsgrad dieses Typs bei 20 % (Hau 2008).

- Im Vergleich zu Auftriebsläufern ist aufgrund der geschlossenen Form des Rotors die Windlast wesentlich höher, was die statischen Anforderungen verschärft.

### 3.2.4. Konzentratoren

Mantelturbinen, welche als Konzentratoren oder Diffusoren ausgeführt sind, stellen eine Sonderform des horizontalachsigen Auftriebsläufers dar. Um den Rotor ist eine Mantelkonstruktion installiert, die das Einschnüren der Windröhre verhindert. In Abbildung 4 ist der Querschnitt der Windströmung, die auf einen Rotor auftrifft, zu sehen. Beim klassischen Horizontalrotor wird der Querschnitt am Rotor ( $A_2$ ) im Vergleich zum Strömungsquerschnitt vor dem Rotor ( $A_1$ ) größer, weil die Luft durch die Umwandlung der kinetischen Energie in eine Drehbewegung abgebremst wird. Bei der Mantelturbine wird die Querschnittsverringeringung theoretisch reduziert. Daher ist auch ein höherer Wirkungsgrad von 66 % theoretisch möglich. In der Praxis konnten verbesserte Leistungswerte noch nicht bestätigt werden (Hau 2008).

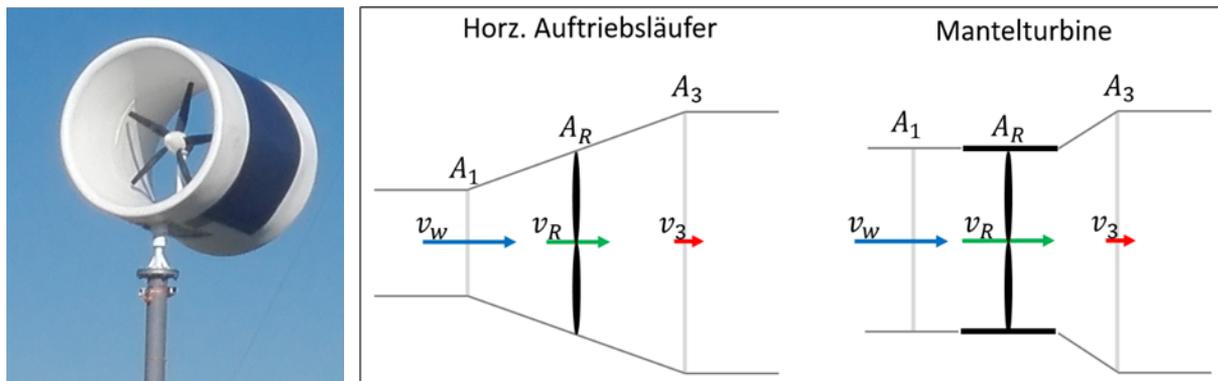


Abbildung 4: Mantelturbine (links) und Funktionsprinzip (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

In Bezug auf die Installation ergeben sich im besiedelten Gebiet Vorteile. Eiswurf und damit die Gefährdung von Personen wird durch den Mantel verhindert. Da die Rotorspitzen sehr nahe am Mantel rotieren, sind die Schallemissionen an den Blattspitzen reduziert. Zusätzlich wird der störende Diskoeffekt (Flackern der Rotorblätter) durch den Mantel abgeschattet.

## 3.3. Marktentwicklung

### 3.3.1. International

Laut World Wind Energy Association (WWEA) waren Ende 2015 bereits knapp 991.000 KWEA weltweit installiert (ca. 948 MW Leistung), wobei davon knapp 56.000 KWEA bzw. 118 MW im Jahr 2015 errichtet wurden. Im Vergleich zu den Vorjahren ergab dies eine prozentuelle Steigerung von 5 % bezogen auf die Anzahl der installierten Anlagen bzw. 14 % bezogen auf die installierte Leistung (WWEA 2017).

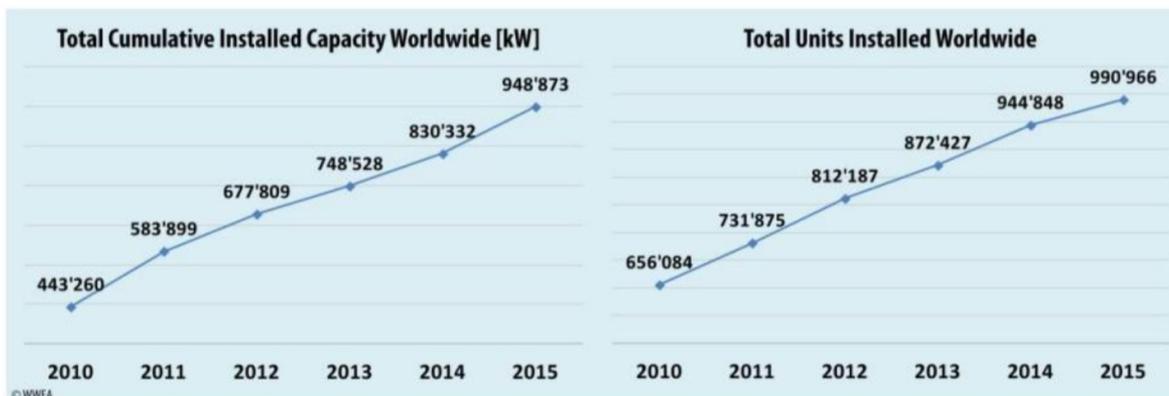


Abbildung 5: Installierte Gesamtleistung (links) sowie Anzahl (rechts) der weltweit in Betrieb befindlichen KWEA von 2010 bis 2015 (WWEA 2017)

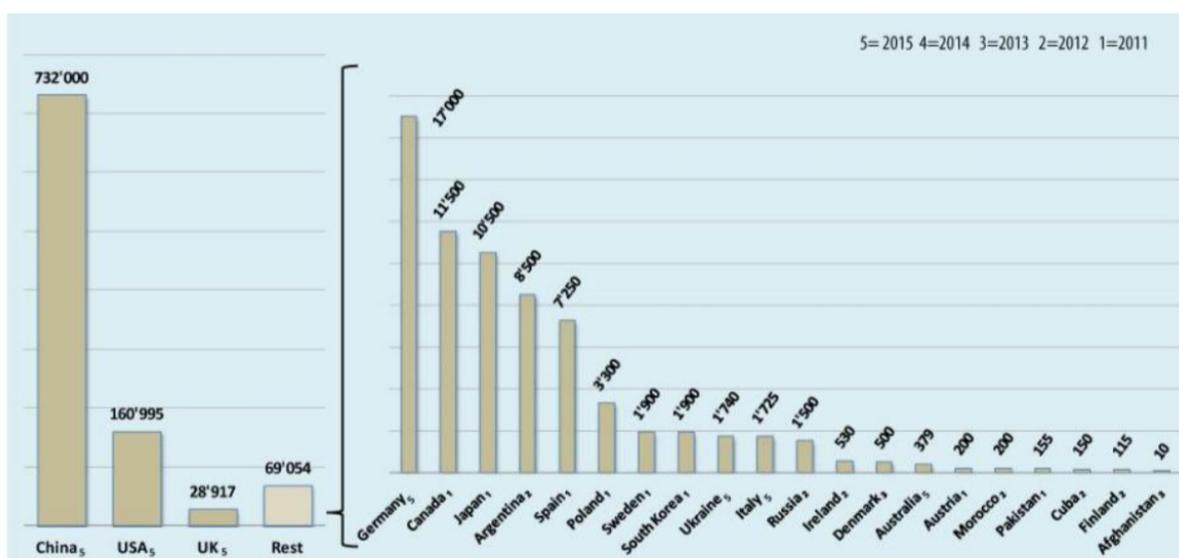


Abbildung 6: Anzahl der Ende 2015 weltweit in Betrieb befindlichen KWEA (WWEA 2017)

Die World Wind Energy Association erwartet binnen der nächsten Jahre ein Wachstum, das mit der Entwicklung der Photovoltaik in der jüngsten Vergangenheit vergleichbar sein wird. Speziell die dynamische Entwicklung der Märkte in China, den USA und Großbritannien in den letzten Jahren bestätigen diesen Trend (WWEA 2017). Gemeinsam sind diese drei Länder für über 90 % der installierten KWEA bzw. über 80 % der weltweit installierten Kleinwindkraft-Leistung verantwortlich. Mit knapp 42 % der weltweit installierten Gesamtleistung nimmt China die Spitzenposition ein, gefolgt von der USA mit knapp 17 %.

Innerhalb der EU hat Kleinwindkraft in Großbritannien ihre größte Verbreitung: Insgesamt sind über 28.900 KWEA mit einer Gesamtleistung von über 146 MW installiert. Etwas über 2.500 Anlagen davon sind auf Gebäuden installiert, wobei mit 1.054 installierten Anlagen der Höhepunkt 2007 erreicht wurde.

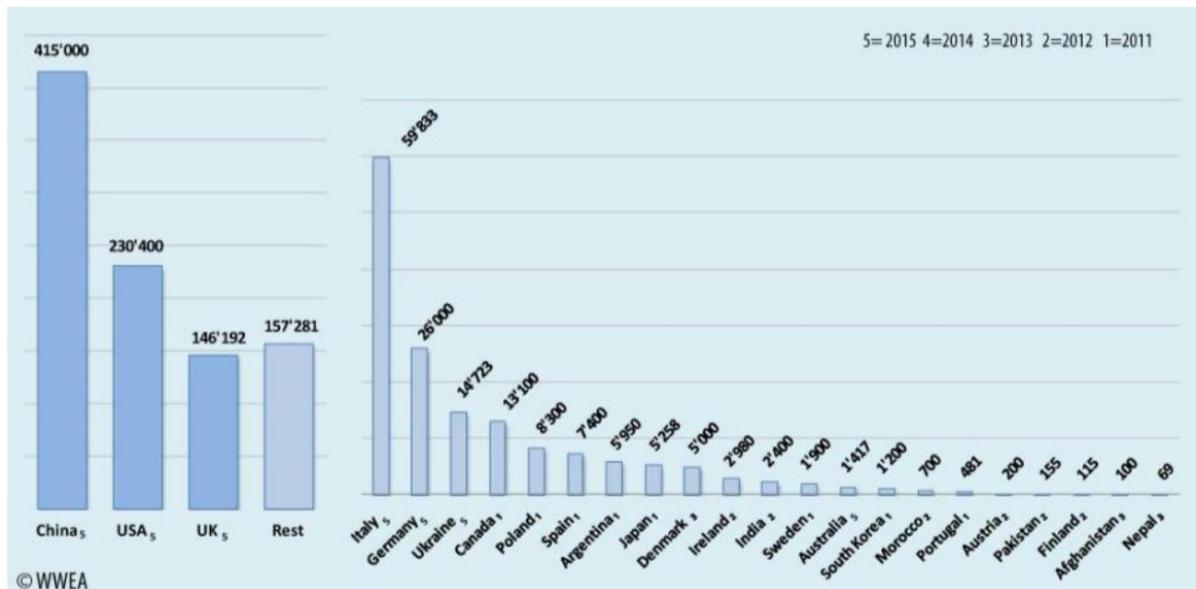


Abbildung 7: Gesamtleistung der Ende 2015 weltweit in Betrieb befindlichen KWEA (WWEA 2017)

Lag die weltweit durchschnittliche Anlagengröße im Jahr 2010 noch bei 0,66 kW, betrug diese Ende 2014 bereits 0,87 kW. Während die durchschnittliche Nennleistung einer KWEA Ende 2014 in China 0,5 kW beträgt, liegt diese in den USA bei etwa 1,5 kW, in Großbritannien bei 5,1 kW und in Italien sogar bei 37,1 kW.

### 3.3.2. Kleinwindkraft in Österreich

Während die KWEA-Technologie in Ländern wie China, den USA und in UK bereits in großer Anzahl umgesetzt wurde, ist die Anzahl der in Österreich installierten Anlagen noch verhältnismäßig gering. Ende 2018 waren in Österreich insgesamt 359 KWEA mit einer Gesamtleistung von ca. 1.720 kW in Betrieb, davon 131 KWEA mit einer Nennleistung bis 1 kW (36,49 %) sowie 206 KWEA mit einer Nennleistung bis 10 kW (57,38 %). Nur 22 KWEA weisen eine Nennleistung > 10 kW auf (6,13 %). In Bezug auf die Leistung entfallen 75,40 % auf KWEA mit einer Nennleistung zwischen 1 und 10 kW, 21,30 % auf Anlagen mit einer Nennleistung > 10 kW und lediglich 3,30 % auf KWEA ≤ 1 kW.

Abbildung 8 stellt sowohl die Anzahl der in Österreich installierten KWEA als auch die kumulierte Leistung der installierten KWEA zum Stichtag 31.12.2018 dar, sowie deren Aufteilung auf die Leistungsklassen kleiner 1 kW, 1 kW bis 10 kW sowie größer 10 kW. Die durchschnittliche Größe der in Österreich Ende 2018 installierten KWEA betrug 4,8 kW.

Der österreichische Kleinwindkraftmarkt wird sowohl von Hersteller:innen, Händler:innen und Vertriebsorganisationen sowie Planer:innen und Errichter:innen aus Österreich als auch aus dem Ausland – überwiegend aus Deutschland – bearbeitet. Abbildung 9 gibt einen Überblick über den österreichischen Kleinwindkraftmarkt sowie die darin vertretenen Akteur:innen.

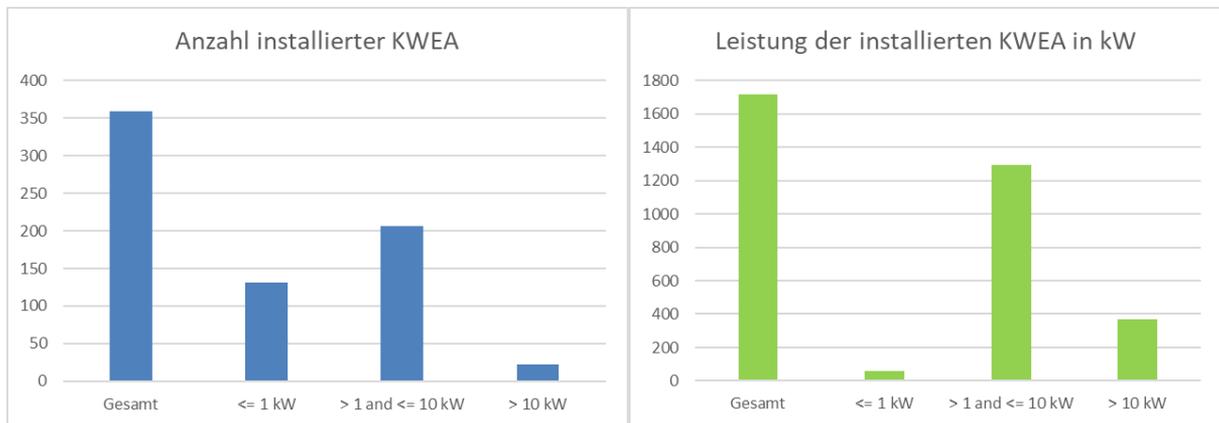


Abbildung 8: Anzahl sowie Gesamtleistung der in Österreich zum Stichtag 31.12.2018 in Betrieb befindlichen KWEA sowie deren Aufteilung auf die Leistungsklassen kleiner 1 kW, 1 kW bis 10 kW sowie größer 10 kW

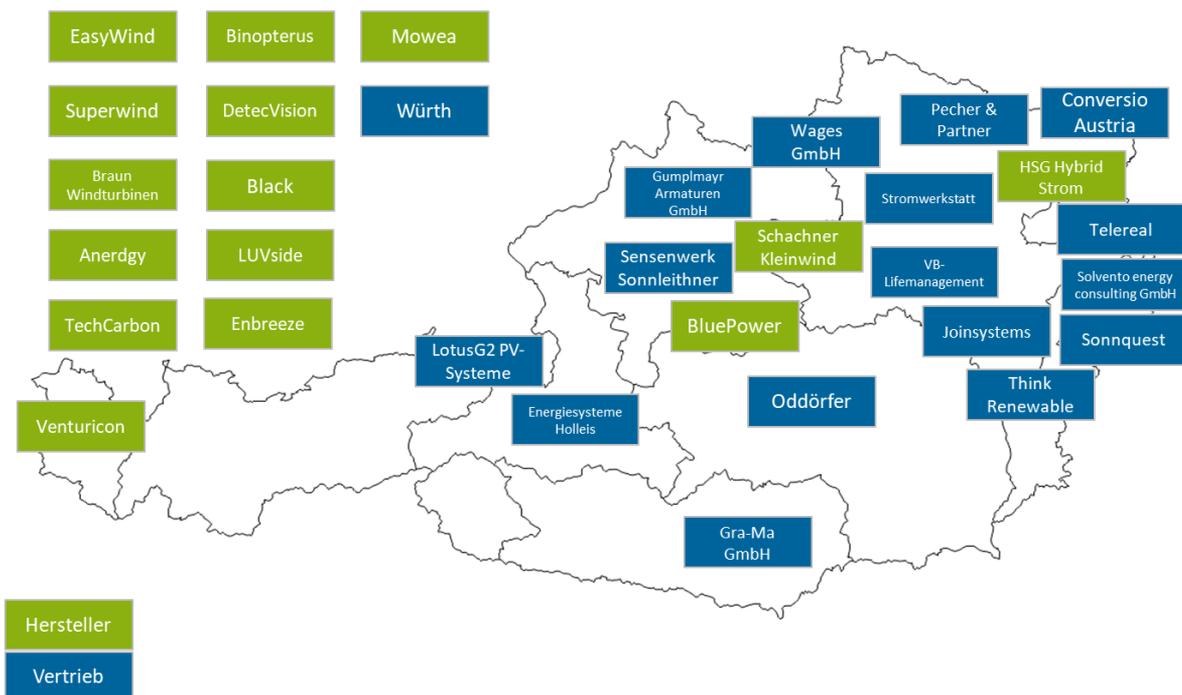


Abbildung 9: Überblick über die Akteure des österreichischen Kleinwindkraftmarkts im Jahr 2018

Trotz einiger negativer Erfahrungen mit qualitativ minderwertigen KWEA in den letzten 10 Jahren in Österreich gibt es diverse Beispiele, die zeigen, dass diese Technologie über lange Zeit verlässlich und sicher eingesetzt werden kann. Eine in den Jahren 2015 bis 2018 durchgeführte Befragung der FH Technikum Wien unter 34 Betreiber:innen von KWEA zeigt, dass knapp 90 % der Befragten mit ihrer KWEA zufrieden sind und erneut in eine KWEA investieren würden. Sie zeigt jedoch auch, dass einige wenige Betreiber:innen ihre KWEA bereits nach kurzer Zeit aufgrund schwerwiegender Probleme wieder demontieren mussten (Leonhartsberger et al. 2019a).

Dieses Bild zeigt sich auch im Energieforschungspark Lichtenegg, einer unabhängigen Mess- und Prüfeinrichtung für KWEA: An diesem Starkwind-Teststandort erzeugen einzelne KWEA trotz regelmäßiger Starkwindereignisse und den damit einhergehenden Belastungen für die Anlage bereits seit Jahren zuverlässig Energie. Doch nicht alle Anlagen können in Bezug auf Qualität,

Betriebssicherheit und Leistungsbereitschaft langfristig überzeugen. Dass aufgrund fehlender, verpflichtender Qualitäts- und Leistungstests ein Teil dieser minderwertigen, nicht funktionsfähigen KWEA dennoch in Österreich verkauft werden, ist einer der größten Schwachpunkte der Kleinwindkraft in Österreich. Insbesondere, da Österreich mit dem Energieforschungspark Lichtenegg über eine entsprechende Mess- und Prüfinfrastruktur für KWEA verfügt, die auch international einen hohen Bekanntheitsgrad genießt.

Genehmigung: Kleinwindkraftanlagen sind in Österreich grundsätzlich genehmigungspflichtig. Wie in Deutschland fällt das Genehmigungsverfahren auch in Österreich in den Zuständigkeitsbereich der Bundesländer. Die gemeinsame Grundlage für alle Genehmigungsverfahren stellt seit Ende 2012 ein „Anforderungskatalog für die Beurteilung von kleinen Windenergieanlagen“ dar, der vom BMWFJ veröffentlicht wurde (BMWFJ 2012). Darin enthalten sind weitere relevante Anforderungen an KWEA, z. B. erforderliche Unterlagen für die technische Beurteilung durch die Behörde oder Vorgabe für die Integration der KWEA in das Verteilernetz.

Jedoch gelten je nach Bundesland unterschiedliche (zusätzliche) Bestimmungen für die Errichtung einer KWEA. Die erste Bauinstanz ist in jedem Bundesland der/die Bürgermeister:in. Um eine Entscheidung für oder gegen die Errichtung einer KWEA treffen zu können, ziehen diese bei Bedarf Sachverständige hinzu. Die nicht einheitlichen Bestimmungen sowie deren teils unterschiedlichen Auslegung durch die zuständigen Sachverständigen können in der Praxis zu schwer planbaren, mitunter willkürlich scheinenden Genehmigungsverfahren führen.

# 4 Ausgangssituation und Problemstellung

Sinkende Preise und attraktive Förderungen, in Verbindung mit dem wachsenden Wunsch privater Haushalte und Gewerbebetriebe nach Energieautonomie, aber auch die Klimaziele der EU sowie die neue EU Gebäuderichtlinie treiben eine Entwicklung an, die dezentrale erneuerbare Erzeugungstechnologien zunehmend zu einer Massenanwendung werden lassen. Immer mehr private Haushalte und Gewerbebetriebe nutzen dezentrale Erzeugungstechnologien, um ihren eigenen Strom zu erzeugen. Unter der Prämisse eine versorgungssichere, nachhaltige und resiliente urbane Energieversorgung sicher zu stellen, die nicht ausschließlich auf Energieerzeugung aus dem Umland angewiesen ist, gilt es die vorhandenen Energieressourcen auch in der Stadt bestmöglich zu nutzen. Neben der Photovoltaik stellt die Kleinwindkraft eine der wenigen Möglichkeiten dar, auch in dicht bebauten Gebieten sowie im städtischen Umfeld umweltfreundlich elektrische Energie zu erzeugen und kann somit zu den Zielen der Energy Performance of Building Directive (European Commission 2019) der europäischen Union beitragen. Diese fordert zum einen, dass ab dem 31. Dezember 2020 alle neu errichteten Gebäude dem Niedrigstenergiestandard entsprechen müssen und zum anderen, dass auch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen bei der Berechnung der Energieeffizienz eines Gebäudes berücksichtigt werden muss. Gemeinsam mit dem immer stärker werdenden Wunsch nach privater Energieautonomie führt dieser Umstand dazu, dass KWEA vermehrt auch in den Fokus privater Haushalte rücken und immer häufiger auch in dicht besiedelten Gebieten bzw. im Stadtgebiet auf oder in unmittelbarer Nähe zu Ein- und Mehrfamilienhäusern errichtet werden.

Im Vergleich zur PV sind beim Einsatz von KWEA auf oder in unmittelbarer Nähe von Gebäuden jedoch zusätzliche Herausforderungen zu berücksichtigen. Vor allem die aufgrund der Bebauung oftmals turbulenten und von anderen Gebäuden beeinflussten Windverhältnisse stellen eine Herausforderung für KWEA dar: Mögliche Ertragseinbußen sowie erhöhte Belastungen für die Anlage und deren Umfeld (Umweltwirkungen z. B. erhöhter Schallpegel, Vibrationen, Schwingungen) müssen daher bereits bei der Planung berücksichtigt werden. Darüber hinaus gewinnen aufgrund der Nähe zu bewohnten Gebäuden die Umweltwirkungen von KWEA wie Schall, Schattenwurf, Discoeffekt oder Infraschall sowie sicherheitstechnische Aspekte wie z. B. eine potenzielle Gefährdung für Personen und Sachgüter durch Eisabfall und Eiswurf immer mehr an Bedeutung. Bei gebäudemontierten Anlagen müssen auch die Auswirkungen auf das Gebäude, dessen Bewohner und die unmittelbare Umgebung hinsichtlich Schall und Körperschall sowie Vibrationen und Schwingungen berücksichtigt werden.

## 4.1. Stand der Technik

Speziell für den Einsatz in urbanen bzw. dicht bebauten Gebieten wurden in den letzten Jahren zahlreiche neue Technologien und alternative Ansätze entwickelt (Ragheb 2014). Laut Wissensstand des Konsortiums liegen jedoch zu den Auswirkungen von gebäudemontierten KWEA auf das Gebäude, dessen Bewohner sowie die unmittelbare Umgebung hinsichtlich Vibrationen, Schwingungen, Infraschall und Körperschall keine Studien oder Untersuchungen vor. Lediglich die Umweltwirkungen Schall und Schattenwurf werden in Genehmigungsverfahren berücksichtigt.

Die Beeinflussung der Strömung durch Gebäudestrukturen ist seit mehr als 40 Jahren Gegenstand von Windkanaluntersuchungen und Feldexperimenten, motiviert durch Fragestellungen der Bausicherheit

(Windlast und Windkomfort) sowie der Luftschadstofftransportmodellierung (Hunt 1971). Aufgrund wesentlicher Weiterentwicklungen des Messinstrumentariums (Turbulenzmessung mittels 3D-Ultraschallanemometer) sowie der Möglichkeiten moderner Computermodelle (Complex Fluid Dynamics-Simulationen) kann mittlerweile Fragen hinsichtlich der Windverhältnisse und Turbulenzintensitäten in bebauten Gebieten in deutlich höherer Detailliertheit und Komplexität nachgegangen werden. Um die Planungssicherheit für KWEA zu erhöhen, befassten sich seitdem mehrere Untersuchungen mit der Beeinflussung der laminaren Strömung durch Hindernisse wie z. B. Gebäude. Mittels CFD-Simulationen wurde nachgewiesen, dass ein einzelnes Gebäude die Windgeschwindigkeit beschleunigen kann (Toja 2016) und die Dachform einen erheblichen Einfluss auf die örtliche Strömungsverteilung und Turbulenzintensität hat (Ozmen et al. 2016) (Abohela et al. 2013). Mehrere Gebäude auf dicht bebauten Flächen verstärken diese Beeinflussung der Strömung weiter. Auf Basis der CFD-Simulationen wurden erste Methoden zur optimierten Standortbestimmung von KWEA auf Gebäuden beschrieben (Ledo et al. 2011). Die einzige, dem Konsortium bekannte Studie, die in diesem Zusammenhang auf reale Messwerte verweisen kann, ist jene der DTU (Pena et al. 2014). Darin wurde die Strömungsbeeinflussung durch einen opaken Holzzaun mittels LIDAR Messgeräten erfasst. Komplexere Hindernisse wie Gebäude mit unterschiedlichen Dachaufbauten wurden jedoch nicht untersucht.

Auch der Einfluss der speziellen Strömungsverhältnisse in dicht bebauten Gebieten auf KWEA wurde bereits in verschiedenen Studien untersucht. Lubitz (2014) beschreibt in seiner Untersuchung den Einfluss von Turbulenzintensität auf den Ertrag einer KWEA anhand eines Versuchsaufbaus in einem im Umkreis von mindestens 100 Metern in jede Richtung unbebauten Felds. Im freien unbeeinflussten Strömungsfeld werden jedoch wesentlich geringere Turbulenzintensitätswerte als im urbanen Bereich bzw. bei gebäudemontierten KWEA erreicht.

Kosasih und Saleh Hudin (2016) vergleichen sowohl mittels Simulation als auch mittels Messungen im Windkanal, Strömungen mit Turbulenzintensitäten zwischen 2 % und 29 % und ermitteln so die Abhängigkeit des Leistungsbeiwertes einer KWEA einmal mit und einmal ohne Diffusor. Die Ergebnisse zeigen, dass Turbulenzen je nach Drehzahl der Anlage sowohl positive als auch negative Effekte auf den Ertrag haben können und ein Diffusor diese Effekte verringern kann. Diese Ergebnisse können als Referenz zu den Untersuchungen des geplanten Projekts dienen.

Mikkelsen untersucht in ihrer Masterthesis (2013) den Einfluss von Turbulenzintensität auf die Leistungsfähigkeit eines 3-Blatt Horizontalläufers und vergleicht dazu Simulationsergebnisse mit Windkanalmessungen. Hierbei wird explizit auf die Schwachstellen einer Windkanalmessung mit Windkraftanlagen in reduziertem Maßstab aufmerksam gemacht und der Bedarf nach Freifeldmessungen deutlich aufgezeigt. Untersuchungen in Großbritannien haben gezeigt, dass die im freien Strömungsfeld gemessenen Leistungskurven nicht für den turbulenten urbanen Bereich geeignet sind (Peacock 2008) (Walker 2011).

Im Gegensatz zum geplanten Projekt wurden die Simulationsergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten nur mit Messwerten, die von anderen Studien übertragen wurden, verglichen, nicht anhand eines gezielten Feldversuchs verifiziert.

Auch zu gebäudemontierten KWEA gibt es einige Studien, die sich mit größeren KWEA (Nennleistung 5-10 kW) auf gewerblich genutzten Gebäuden (Flachdach) befassen. Eines dieser Projekte ist das Forschungsprojekt „Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum“, das unter der Leitung der HTW Berlin durchgeführt wurde. Im Rahmen dieses Projekts hat sich das

Projektkonsortium mit den Potenzialen sowie den Herausforderungen, die der Einsatz von KWEA in der Stadt mit sich bringt, befasst (Twele 2013). Darüber hinaus beschäftigte sich ein interdisziplinäres Forscher:innenteam im Forschungsprojekt „Urbane Windenergie - Entwicklung von Beurteilungsmethoden für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen in urbaner Umgebung“ unter der Leitung des Technikum Wiens im unter anderem mit Fragestellungen in diesem Kontext (Leonhartsberger et al. 2019).

## 4.2. Problemstellung

Fehlende praktische Erfahrungen hinsichtlich der Auswirkungen von Gebäuden mit unterschiedlichen Dachaufbauten und anderen Hindernissen auf die Strömung sowie auf die Anströmung von KWEA: Bisher wurden bei bisher durchgeführten Untersuchungen vorwiegend Simulationen bzw. Modellmessungen im Windkanal durchgeführt, um die Strömungsbeeinflussung durch unterschiedliche Hindernisse (Gebäude) und deren Auswirkungen auf den Betrieb von KWEA zu bestimmen. Praktische Erfahrungen und Messungen in der Praxis, um die Ergebnisse der Modellmessungen und Simulationen zu verifizieren bzw. die Simulation gegebenenfalls zu verbessern, sind jedoch nur bedingt verfügbar. Die einzige, dem Konsortium bekannte Studie zu diesem Thema, die auf Messwerte verweisen kann, ist jene der DTU (Pena et al. 2014). Die Strömungsbeeinflussung durch komplexere Hindernisse wie Gebäude mit Giebeldach wurde jedoch nicht untersucht. Nur durch entsprechende Messungen können das Verständnis für die Strömungsbeeinflussung durch komplexere Hindernisse und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Anströmung und den Betrieb einer KWEA verbessert werden.

Fehlende messtechnische Evaluierung der Korrelation einzelner Strömungsparameter und dem Ertrag einer KWEA: Forschungsarbeiten, welche den Einfluss von Turbulenzen auf KWEA in Windkanälen untersuchen, erzeugen verschiedene Turbulenzintensitäten mithilfe eines Gitters, welches in variabler Entfernung zu Anlage aufgestellt wird. Die entstehenden Wirbel haben dabei eine festgelegte und nicht veränderbare räumlich Ausdehnung. Natürliche Verwirbelungen können damit nur bedingt nachgestellt werden. Darüber hinaus wurde in bisherigen Studien ausschließlich der Einfluss der Turbulenzintensität berücksichtigt. Da jedoch davon auszugehen ist, dass die räumliche Ausdehnung von Turbulenzen und somit auch deren, über das reynoldsche Gesetz damit verbundene Frequenz einen Einfluss auf die Performance der Anlage haben, wird im vorliegenden Projekt untersucht, ob eine Korrelation zwischen Ertrag und Frequenz der Turbulenzen besteht. Dieser Zusammenhang wurde in bisherigen Untersuchungen jedoch vernachlässigt, auch andere Strömungsparameter wurden nur bedingt berücksichtigt.

Fehlende Erfahrungen hinsichtlich der Auswirkungen von dachmontierten KWEA auf deren Performance (Ertrag, Lebensdauer...): Während bereits in einigen Studien die Performance von KWEA an unterschiedlichen Standorten (z. B. Standorte mit hoher Turbulenzintensität, Standorte mit geringer Turbulenzintensität) ermittelt und verglichen wurde, wurde der Einfluss einzelner Einflussgrößen wie z. B. der Montageart auf die Performance (Ertrag, Lebensdauer,...) einer KWEA in bisherigen Studien nicht ermittelt. Da jedoch zunehmend KWEA mit einer Nennleistung von bis zu 2 kW auf Ein- und Mehrfamilienhäusern montiert werden, ist der Einfluss der Gebäudemontage zu ermitteln, um eine Entscheidungsgrundlage für zukünftige Umsetzungen zu schaffen und Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Unklare Auswirkungen gebäudemontierter KWEA auf das Gebäude, dessen Bewohner und die unmittelbare Umgebung: Während einzelne Umweltwirkungen wie z. B. die Schallemissionen bereits im Zuge der Zertifizierung überprüft werden, werden andere wie z. B. Vibrationen und Schwingungen vernachlässigt. Da jedoch zunehmend KWEA auf Ein- und Mehrfamilienhäusern montiert werden, sollten auch bisher vernachlässigte Umweltwirkungen messtechnisch erfasst werden, um darauf aufbauend deren Einfluss auf das Gebäude, dessen Bewohner:innen und die Umgebung beurteilen zu können. Einflussgrößen mit großer Wirkung (z. B. potenzielle Gefährdung der Umgebung) können so zukünftig im Zuge der Zertifizierung bzw. im Rahmen des Genehmigungsverfahrens überprüft werden.

Mangelnde Qualität, Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit: Dass nicht alle am Markt erhältlichen Anlagen die Anforderungen an Qualität, Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit erfüllen, zeigen Untersuchungen im Energieforschungspark Lichtenegg. Im Projekt „Kleinwindkraftanlagen“ wurden 13 KWEA untersucht und vermessen. Nur sechs der getesteten Anlagen konnten die auf Basis der Leistungskurve der Hersteller berechneten Erträge annähernd erreichen (Warmuth et al. 2014). Insgesamt wurden in den letzten Jahren ca. 20 KWEA im Energieforschungspark Lichtenegg vermessen. Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich, konnten nicht alle KWEA hinsichtlich Qualität und Betriebssicherheit überzeugen.



Abbildung 10: Erfahrungen aus dem Energieforschungspark Lichtenegg: gebrochener Stahlmast einer KWEA (links), gebrochener Flügel einer KWEA (Mitte links), abgestürzter Rotor (Mitte rechts), defekte KWEA Typ Windtronics (rechts)

Fehlende Standards bzw. Gütesiegel für gebäudemontierte KWEA: Diese Erfahrungen zeigen, wie wichtig es ist, dass die Qualität, Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit von einer unabhängigen Prüfeinrichtung überprüft bzw. sichergestellt wird. Für freistehende Anlagen gibt es mittlerweile mehrere Gütesiegel und Standards (z. B. AWEA Standard, BWEA Standard, Danish Requirement, JSWTA0001), die sich jeweils auf die 61400er Normenreihe (IEC 61400) beziehen. Spezielle Anforderungen (z. B. Vibrationen und Schwingungen), die durch die Montage von KWEA auf Gebäuden entstehen, werden dabei jedoch nicht berücksichtigt. Solange hier klare Richtlinien fehlen, welche Anforderungen eine KWEA erfüllen muss, damit sie für die Gebäudemontage, speziell für Ein- und Mehrfamilienhäuser, geeignet ist, können Interessent:innen bzw. Käufer:innen von KWEA nicht vor unseriösen Hersteller:innen bzw. qualitativ minderwertigen KWEA geschützt werden.

Mangelnde Verfügbarkeit objektiver Informationen über gebäudemontierte KWEA für Interessierte und zukünftige Betreiber:innen: Eine höhere Marktdurchdringung kann nur durch Information und Aufklärung der interessierten Öffentlichkeit erreicht werden. Mit der Veröffentlichung des Leitfadens für die Planung und Umsetzung von KWEA im Rahmen des Projekts „Kleinwindkraftanlagen“ für

zukünftige Betreiber:innen und Interessierte wurde dazu ein wertvoller Beitrag für die Entwicklung der Kleinwindkraft geleistet (Warmuth et al. 2014). Für gebäudemontierte KWEA sind objektive Informationen und Erfahrungen nicht oder nur bedingt verfügbar. Dieser Mangel an Informationen führt zu einer hohen Markttransparenz, da die wesentlichen Kriterien/Einflussgrößen für die Errichtung und den Betrieb von KWEA auf Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie die damit verbundenen zusätzlichen Anforderungen an die KWEA nicht bekannt sind und damit auch nicht berücksichtigt werden können. Geringe Erträge, häufige Störungen und Defekte bis hin zu einer Gefährdung der Umgebung bzw. einer Beeinträchtigung der Lebensqualität können die Folgen solcher Planungsversäumnisse sein.

Unklarer Beitrag von KWEA zu einer nachhaltigen Energieversorgung: Für viele erneuerbare Energie nutzende Erzeugungstechnologien, wie PV, Windkraft oder Biomasse wurde in den letzten Jahren eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt, um deren Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung sicher zu stellen. Für KWEA ist nach Wissensstand des Konsortiums diese Bewertung bisher nicht erfolgt.

*„Für GWEA liegen Berechnungen der energetischen Amortisation vor. Diese tritt bei den dargestellten Anlagen der Hauptmarktakteure in Österreich in wenigen Monaten ein. Im Vergleich dazu liegen keine Aussagen zu derzeit am Markt verfügbaren KWEA vor.“ (Reinhold et al. 2012)*

Vor allem in Anbetracht einer möglichen zukünftigen Förderung von KWEA ist deren Nachhaltigkeit - und dabei insbesondere die energetische Amortisation - sicherzustellen.

### **4.3. Projektziele**

Um diese Fragen zu beantworten, wurden im Projekt primär folgende Ziele verfolgt:

- Messtechnische Evaluierung der Auswirkungen von komplexen Hindernissen (Wohngebäuden mit unterschiedlichen Dachaufbauten) auf die Strömung sowie auf die Anströmung von gebäudemontierten Kleinwindenergieanlagen
- Messtechnische Evaluierung der Auswirkungen unterschiedlicher, dachmontierter KWEA (Darrieus-Helix Vertikalläufer, Horizontalläufer) auf deren Performance (Ertrag, Lebensdauer...) sowie auf das Gebäude, dessen Bewohner:innen und die unmittelbare Umgebung hinsichtlich Schall, Infraschall und Körperschall, Vibrationen und Schwingungen sowie sicherheitstechnischer Aspekte

# 5 Mess- und Prüfinfrastruktur

## 5.1. Energieforschungspark Lichtenegg

Der Energieforschungspark Lichtenegg ist eine unabhängige Mess- und Prüfeinrichtung für Kleinwindkraftanlagen, die im Zuge des vom Klima- und Energiefonds geförderten Forschungsprojekts „Kleinwindkraftanlagen - Qualitätssicherung, Netzeinbindung, Geschäftsmodelle und Information“ (FFG-Nummer 829731) im Jahr 2011 initiiert wurde (Warmuth et al. 2014). Seit 2014 wird der Energieforschungspark von einer Arbeitsgruppe bestehend aus der EVN AG, der FH Technikum Wien, der Solvento und der Energiewerkstatt betrieben.



Abbildung 11: Impressionen Energieforschungspark Lichtenegg



Abbildung 12: Impressionen Energieforschungspark Lichtenegg

An diesem Standort herrschen über das Jahr konstante Windverhältnisse mit einer für Österreich überdurchschnittlich hohen mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von über 5 m/s (in 17 m Höhe) sowie einer überdurchschnittlich hohen Turbulenzintensität, wodurch sich der Standort ideal zur Prüfung und Vermessung von Kleinwindkraftanlagen eignet. Deutlich wird dies auch bei Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit sowie der Windrose für den Standort Lichtenegg in Abbildung 13. Während die Windhäufigkeitsteilung zeigt, wie häufig bestimmte

Windgeschwindigkeiten innerhalb des Messzeitraums unabhängig von der Windrichtung auftreten, ist aus der Windrose auch die Windrichtung ersichtlich.

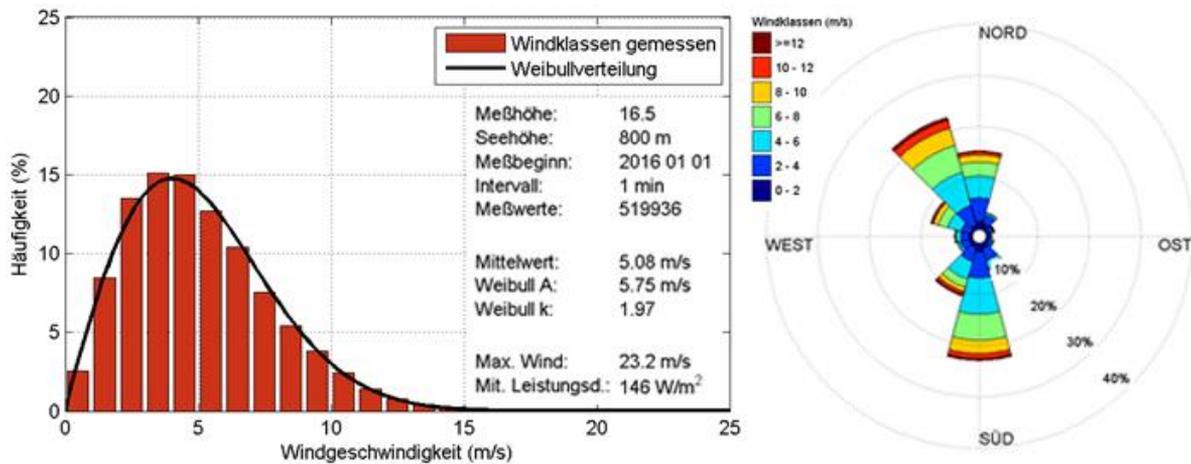


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (rechts) und Windrose (links)

### 5.1.1. Infrastruktur

In den letzten Jahren wurde im Energieforschungspark Lichtenegg eine Mess- und Prüfinfrastruktur zur neutralen, herstellerunabhängigen Prüfung und Vermessung von KWEA geschaffen. Zehn Prüfstände, teilweise mit Mastsystemen, stehen für diverse Messungen und Prüfungen (z. B. Langzeitevaluierung, Vibrations- und Schwingungsmessung, Power Quality) zur Verfügung. Weiters bietet ein eigener Leistungskennlinienmast in unmittelbarer Nähe des Windmessmasts sowie ein Schallmessmast (etwa 600 m östlich des Energieforschungsparks) die Möglichkeit Leistungskennlinien- und Schallmessungen in Anlehnung an die jeweilige Norm durchzuführen. Neben den angebotenen Mess- und Prüfdienstleistungen werden im Energieforschungspark Lichtenegg darüber hinaus regelmäßig kostenlose, öffentliche Führungen veranstaltet, um der interessierten Öffentlichkeit einen Einblick in das Thema Kleinwindkraft zu ermöglichen.

### 5.1.2. Mess- und Prüfdienstleistungen

Im Energieforschungspark Lichtenegg werden aktuell folgende Mess- und Prüfdienstleistungen angeboten:

- **Langzeitevaluierung:** Um Qualität, Betriebssicherheit und Funktionsbereitschaft einer Anlage zu überprüfen, werden Kleinwindkraftanlagen im Energieforschungspark Lichtenegg im Zuge der Langzeitevaluierung über mehrere Monate betrieben. Parallel dazu werden Wind- und Ertragsdaten aufgezeichnet, was einen direkten Vergleich mit den Sollerträgen laut Hersteller sowie mit anderen Kleinwindkraftanlagen im Energieforschungspark ermöglicht.
- **Leistungskennlinienvermessung:** Bei der Leistungskennlinienvermessung wird die aus dem Wind umgewandelte elektrische Energie in Abhängigkeit der gemessenen Windgeschwindigkeit gemessen und in Form einer Leistungskurve tabellarisch bzw. grafisch dargestellt. Die Messung erfolgt dabei in Anlehnung an die gültige Norm IEC 61400-12.

- Power Quality: Bei der Netzqualitätsmessung (Power Quality) werden verschiedene Größen zur Beurteilung der Stromqualität der zu evaluierenden Kleinwindkraftanlage (z. B. kurzzeitige Spannungseinbrüche, Kurz- und Langzeitflicker) gemessen.
- Schallemissionsmessung: Bei der Vermessung der Schallemission werden die Schallemissionen einer KWEA in Abhängigkeit der gemessenen Windwerte gemessen, auf den Emissionspunkt zurückgerechnet und in Form eines Schallemissionsgutachten dargestellt. Die Messung erfolgt dabei in Anlehnung an die gültige Norm IEC 61400-11.
- Schwingungs- und Vibrationsmessung: Im Betrieb von KWEA können Massenunwuchten und unsymmetrische Rotorblattanströmungen, sowie Böen unweigerlich zu Schwingungen der gesamten Anlage führen. Speziell bei gebäudemontierten KWEA sind Schwingungen und Vibrationen kritisch zu betrachten, weil diese auf das Gebäude übertragen werden können. Die Messung gibt Aufschluss über das Schwingungs- und Vibrationsverhalten der jeweiligen Anlagen und kann in einem weiteren Schritt als Grundlage für die Entwicklung entsprechender Maßnahmen zur Reduktion von Vibrationen und Schwingungen herangezogen werden.

## 5.2. Erweiterung der Messinfrastruktur zur Untersuchung von gebäudemontierten Klein- und Mikrowindanlagen

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden im Energieforschungspark Lichtenegg zwei Gebäudenachbauten mit Flach- bzw. Giebeldach errichtet. Abbildung 14 zeigt diese weltweit einzigartigen Mess- und Prüfinfrastruktur (Stand Sommer 2018). Während sich bisher durchgeführte Untersuchungen auf Simulationen bzw. Modellmessungen im Windkanal beschränken, bietet diese Infrastruktur die Möglichkeit, KWEA unter realen Umgebungsbedingungen direkt auf einem Gebäude zu vermessen und die Auswirkung gebäudemontierter KWEA messtechnisch zu erfassen.



Abbildung 14: Installation Vertikon M und SuperWind 1250 auf Giebel- und Flachdach

Die Messinfrastruktur besteht aus vier Messpunkten, welche in einer Messachse nahe der Hauptwindrichtung ( $315^\circ$  - siehe Windrose) angeordnet wurden. Am ersten Messpunkt werden mittels Ultraschallanemometer in 3,5 m, 7 m (Nabenhöhe der Kleinwindkraftanlagen) und 10,5 m Windgeschwindigkeit (horizontal, vertikal), Turbulenzintensität und Windrichtung gemessen.

Die Infrastruktur wurde schrittweise erweitert. Bei Messpunkt 2 und 6 waren zu Beginn keine Gebäude installiert. Somit konnte zuerst das Freifeld und anschließend die (veränderte) Strömung über Gebäuden (Flachdach und Giebeldach) vermessen werden.

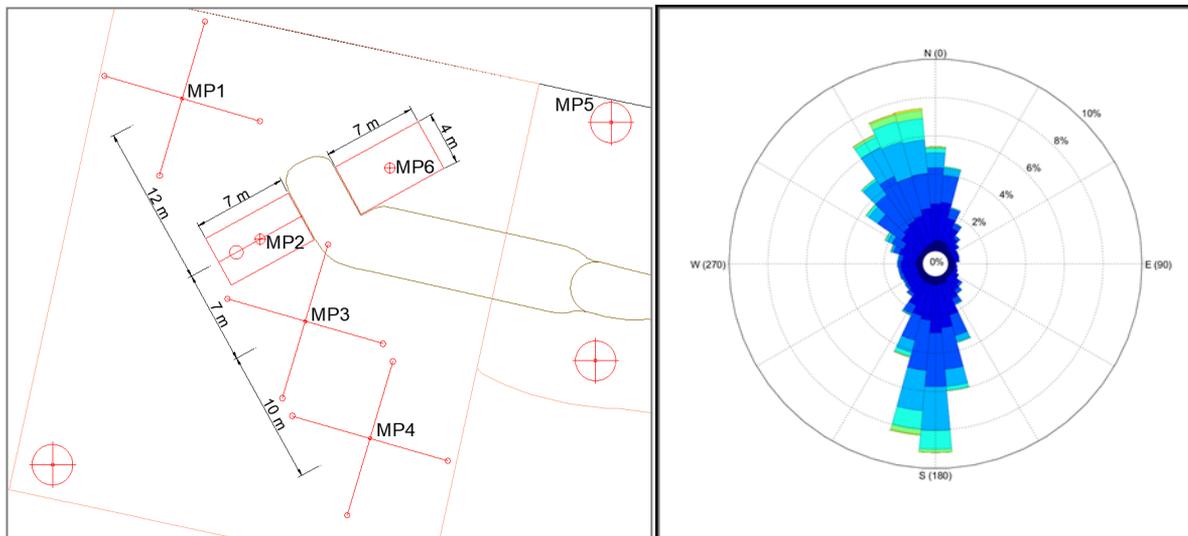


Abbildung 15: Grundriss Infrastruktur (links) und Windrose (rechts) im Energieforschungspark Lichtenegg

### 5.2.1. Infrastruktur freies Messfeld

Vor der Installation der Gebäude wurde das freie Messfeld auf seine Strömungseigenschaften untersucht, indem die Messungen ohne Gebäude durchgeführt wurden. Die Messmasten sind in einer Linie aufgebaut mit der Messachse Richtung  $315^\circ$  (Hauptwindrichtung). Zusätzlich wurde der freie Mast, MP5 auf seine Windbedingungen vermessen und kalibriert. Die Datenerfassung erfolgte mit zwei Datenloggern von Ammonit. Die Vermessung startete im Juni 2017 und endete Ende September 2017.



Abbildung 16: Messung freies Feld und Datenlogger

### 5.2.2. Errichtung Flachdach

Nach Abschluss der Messungen wurde das Gebäude mit Flachdach errichtet. MP2 wurde in der Folge am Gebäude aufgestellt, dabei veränderten sich die Messpunkte auf 5 m, 7 m und 10,5 m. Die Windmessung erfolgte von März 2017 bis April 2018.



Abbildung 17: Messung Flachdachgarage und Giebeldachgarage

### 5.2.3. Errichtung Giebeldach

Um auch die Strömung am Giebeldach ermitteln zu können, wurde der Messmast in einen Dachstuhl, welcher um 1,5 m höher ist als das Flachdachgebäude, integriert. Der Dachstuhl besteht aus einer Holzbalkenkonstruktion mit Tonschindeln. Die Messhöhen blieben gleich, jedoch änderte sich aufgrund des Giebels die Höhe des untersten Sensors auf 6 m. Die Messung erfolgte von April 2018 bis Juli 2018.

### 5.2.4. Vorbereitungen Wirkungsmonitoring KWEA

Vorbereitend für die Leistungs- und Ertragsmessung der Anlagen mussten die Verkabelung zu den Masten verlegt und die Leistungswandler installiert und in die Messinfrastruktur integriert werden.



Abbildung 18: Installation Kleinwindkraftanlage und Leistungsmessung

# 6 Modellierung, Simulation und messtechnische Erfassung der Strömung

## 6.1. Strömungsmodellierung und -simulation

Im gegenständlichen Projekt wurden stationäre Simulationen mit den Modellen MISKAM und OpenFOAM durchgeführt. Die Strömungssimulationen wurden für die drei Hauptwindrichtungen (330°, 360° und 180°) für die zwei Gebäudekonfigurationen (siehe Abbildung 19). Bei MISKAM wurde mit einer horizontalen Auflösung von 1 m x 1 m gerechnet. Das vertikale Gitter ist in 30 Schichten aufgeteilt, wobei die untersten Schichten (bis 20 m) eine feinere Auflösung (0,5 m) haben. Es wurde eine Windgeschwindigkeit von 10m/s in 100 m über Grund und eine neutrale Schichtung angenommen. Das k-Profil wird daraus im Modell errechnet. Die Darstellung von Gebäuden (inklusive Dachkonstruktionen) erfolgt bei diesem Modell in Form von Quadern entsprechend der Gitterauflösung. Daher ist die Darstellung des Giebeldaches (Szenario 2) nur eingeschränkt möglich.

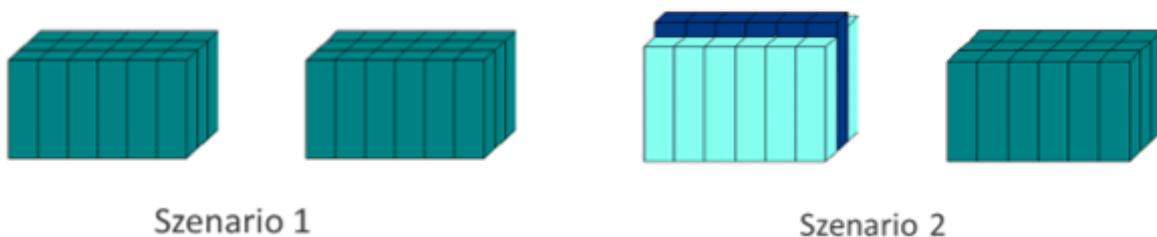


Abbildung 19: Konfiguration der Gebäude, Szenario 1: beide Garagen mit Flachdach (links). Szenario 2: Garage links mit Giebeldach, Garage rechts mit Flachdach (rechts).

Das horizontale Strömungsfeld in 3,0 bis 3,5 m Höhe über Grund bei Windrichtung 360° für Szenario 1 ist in Abbildung 20 (links) dargestellt.

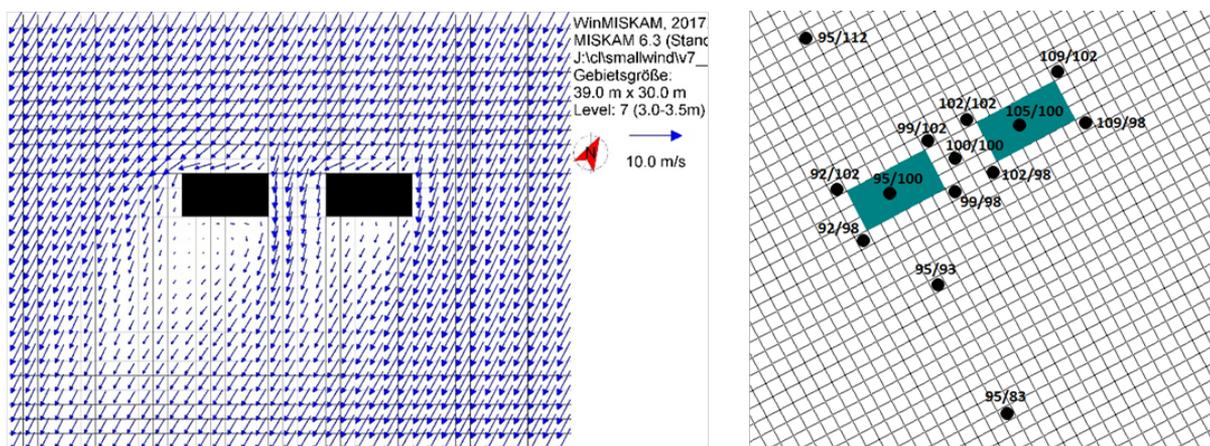


Abbildung 20: Windfeld für die Höhenschicht 3,0 bis 3,5 m bei Windrichtung 360. Szenario 1: beide Garagen mit Flachdach (links) und ausgewählte Modellgitterpunkte in MISKAM für die detaillierte Ergebnisauswertung (rechts)

Die Ablenkung der Strömung durch die Garagen in dieser Schicht sowie die Reduzierung der Windgeschwindigkeit im Lee der Gebäude sind deutlich zu erkennen. Unterschiede aufgrund der anderen Dachform einer Garage sind in dieser Darstellung jedoch nicht auszumachen. Bereits in 6,5 m bis 7,0 m über Grund sind in beiden Fällen keine Änderungen der Strömung aufgrund der Gebäude zu sehen. Es wurden zwei unterschiedliche Strömungsmodellansätze verwendet, um die Auswirkungen von zwei kleinen Modellgebäuden mit zwei unterschiedlichen Dachformen (Szenario 1 Flachdach und Szenario 2 Giebeldach) zu simulieren. Die berechneten dreidimensionalen Windfelder wurden mit Windmessungen an zahlreichen Messpunkten um die beiden Gebäude verglichen.

Neben der visuellen Ergebnisaufbereitung in Form von Horizontal- und Vertikalschnitten werden die Simulationsergebnisse an ausgewählten Punkten (siehe Abbildung 20 rechts) quantitativ ausgewertet und, soweit möglich, mit Messdaten verglichen.

Mit dem Modell OpenFOAM wurde eine analoge Vorgehensweise durchgeführt. Die Konfiguration für die beiden Gebäudeszenarien wurde deutlich feiner erstellt und erste entsprechende Simulationen durchgeführt. Zwischen beiden Modellen haben sich aus programmtechnischen Gründen Unterschiede hinsichtlich der Rahmenbedingungen, des Gitteraufbaus, der Gitterauflösung und der Gebäudedarstellung ergeben, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Besonders herausfordernd hat sich die Erstellung der dreidimensionalen Eingangsdaten für OpenFOAM herausgestellt.

Als meteorologische Eingangsdaten für die Simulationen wurden aus den vorliegenden Messungen am freien Mast idealisierte Windprofile ohne Beeinflussung durch die Verbauung für den Modelleinströmrand abgeleitet. Gerechnet wurde bei den beiden Modellen mit einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s in 100 m Höhe.

### **6.1.1. Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen**

#### **Vergleich mit den Messungen bei Szenario 1 (Flachdach)**

Windrichtung 360°: Mittlere Windgeschwindigkeiten (über einen bestimmten Messzeitraum) an den verschiedenen Punkten aus den Messungen bei Windrichtung 360° (Nordwind) und Modellergebnissen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 5,8 m/s in 10 m über Grund sind aus Abbildung 21 ersichtlich. Die beste Übereinstimmung ist beim Messpunkt (MP) 1 zu erwarten, weil dort die Strömung nicht von den Garagen beeinflusst wird. Die Ergebnisse der beiden Modelle stimmen hier sehr gut überein. Im Vergleich zu den Messungen überschätzen beide Modelle die Messungen jedoch in nahezu allen Messhöhen, teilweise bis 1 m/s. Die modellierten Windgeschwindigkeiten an dem Punkt MP2 (KWEA) stimmen mit den Messungen sehr gut überein. Teilweise kann die Abweichung zwischen Modell und Messungen z. B. bei MP3 durch Datenfehler und Messausfälle bedingt sein. Zusätzlich sind die Messungen bei einer Anströmung aus 360° von der Geländekante stark beeinflusst. Bei Nord-Anströmung verursacht die Geländekante einen Windschatten, und diese Geländeeigenschaft kann nicht in den Modellen abgebildet werden.

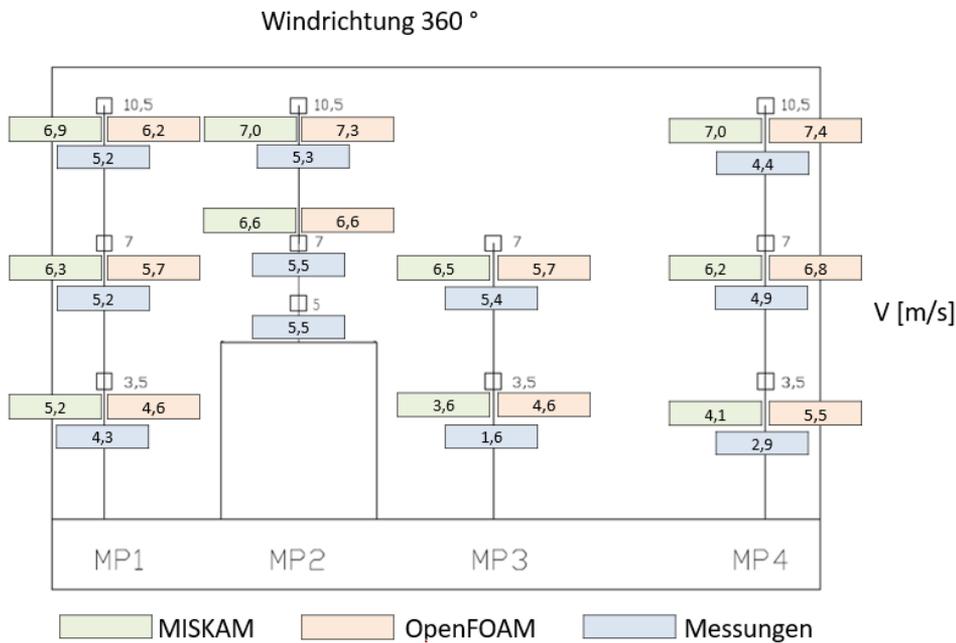


Abbildung 21: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei Windrichtung 360° bei Szenario 1, Flachdach, für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018.

Windrichtung 330°: In Abbildung 22 sind die Modellergebnisse und die Messungen bei Windrichtung 330° dargestellt. Hier stimmen die Modelle mit den Messungen sehr gut überein, wobei die meisten Modellergebnisse weniger als 1 m/s Differenz zum Mittelwert der gemessenen Windgeschwindigkeiten aufweisen. Vor allem am Punkt MP2 (KWEA) in 7 m Höhe liegen die Modelle sehr nahe an den Messungen.

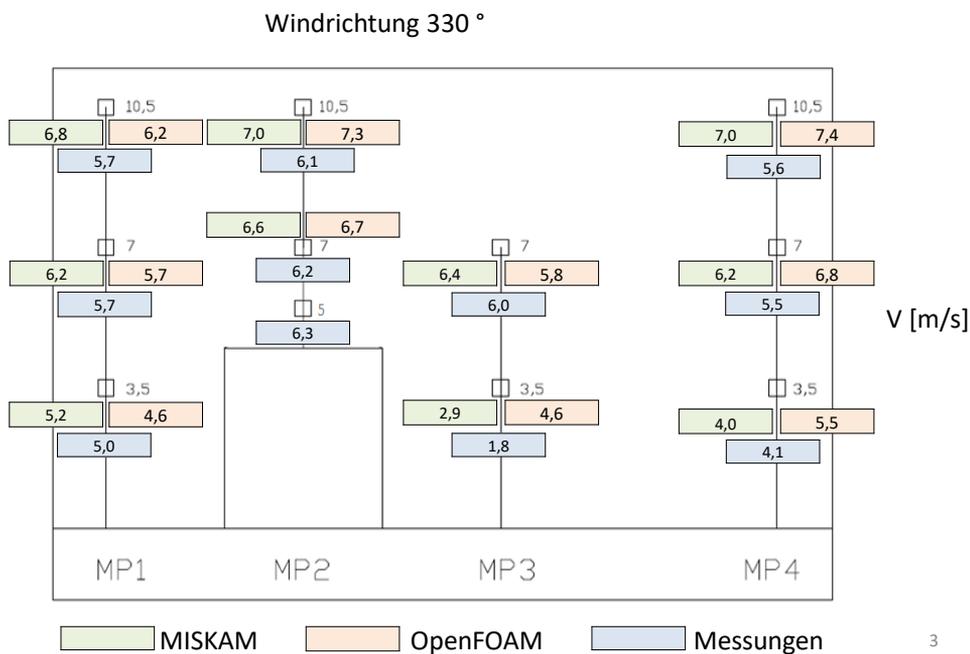


Abbildung 22: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 330° Windrichtung bei Szenario 1, Flachdach, für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018

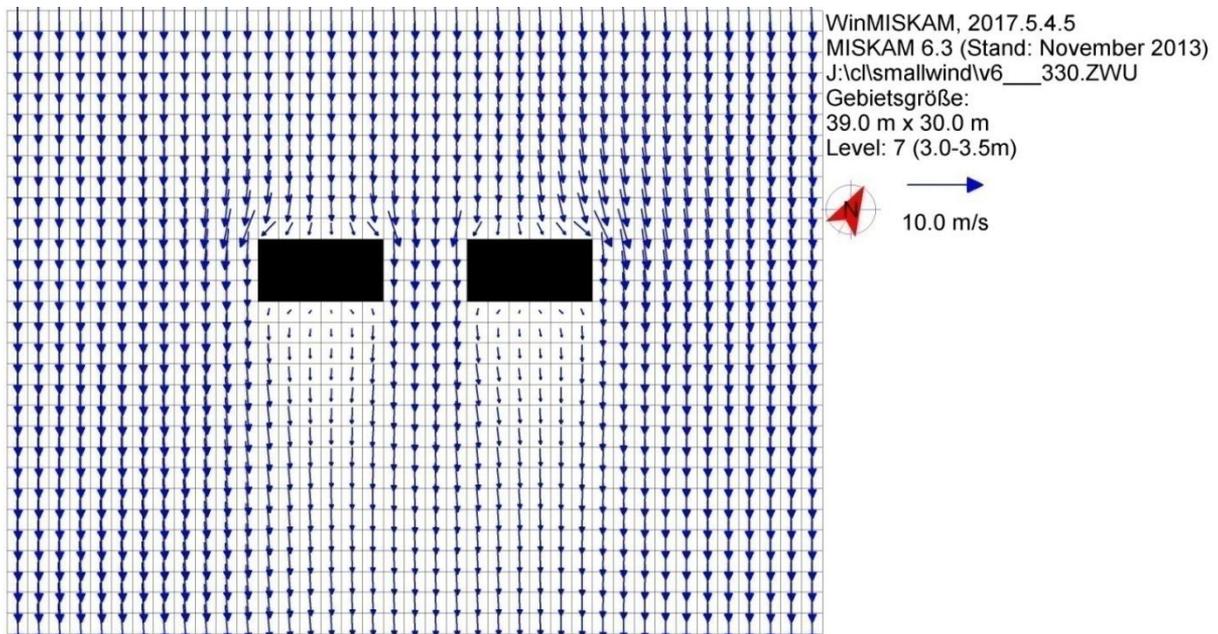


Abbildung 23: Windfeld in der untersten Modellschicht 3 bis 3,5 m über Grund modelliert mit MISKAM

Die Ablenkung der Strömung sowie die Reduktion der Windgeschwindigkeit im Luv und Lee der Garagen sind in Abbildung 24 deutlich zu erkennen. Die Teilung der Rezirkulationszone im Lee der Gebäude (in Gelb) ist gut zu erkennen. Diese entspricht auch den Messergebnissen.

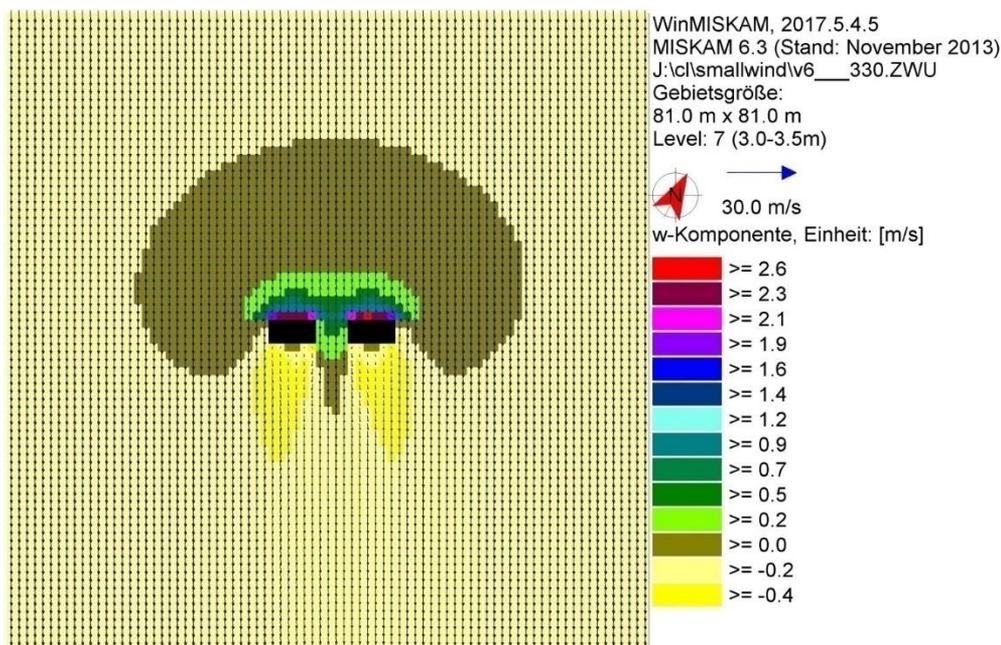


Abbildung 24: Vertikale Windkomponente in der untersten Modellschicht in 3 bis 3,5 m über Grund, modelliert mit MISKAM.

In Abbildung 25 ist die W-Komponente in der mittleren Modellschicht 6,5 bis 7,0 m, modelliert mit MISKAM, dargestellt. Speziell hier ist der Nachlauf sehr ähnlich den Messergebnissen. Knapp hinter den Gebäuden wurde auch ein aufwärts gerichteter Wirbel gemessen und weiter hinten ein nach unten gerichteter Wirbel.

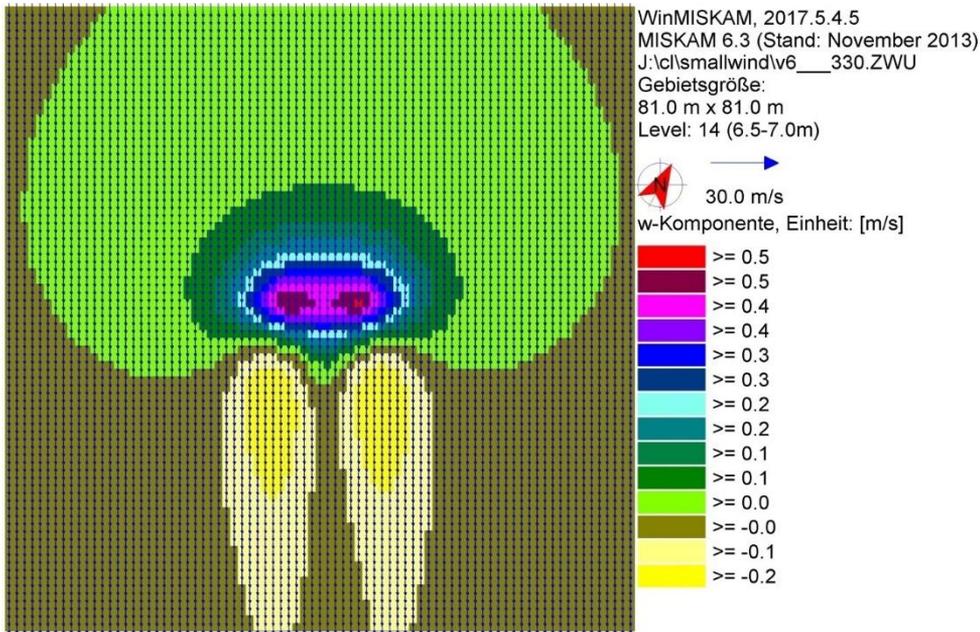


Abbildung 25: W-Komponente in der mittleren Modellschicht 6,5 bis 7,0 m, modelliert mit MISKAM

Windrichtung 180°: Bei dem Vergleich bei Windrichtung 180° (Abbildung 26) stimmen die mit MISKAM und OpenFOAM simulierten Windgeschwindigkeiten und die gemessenen Werte sehr gut überein. Abweichungen über 1 ms<sup>-1</sup> gibt es nur am MP 4. Wiederum überschätzen beide Modelle die Messdaten, allerdings deutlich geringer als in den bisher diskutierten Fällen.

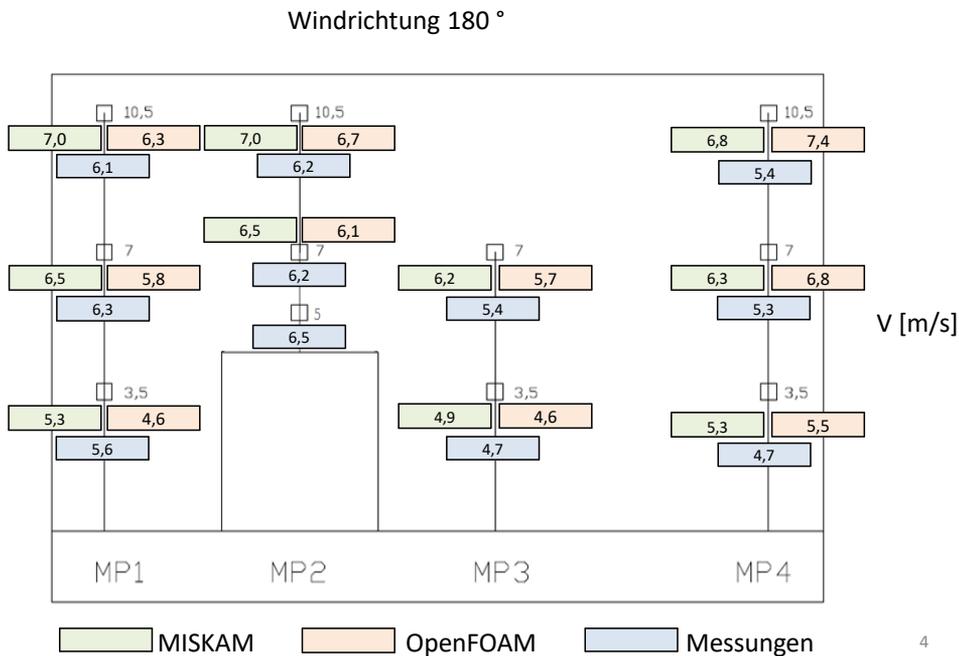


Abbildung 26: Vergleich der modellierten und der mittleren gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 180° Windrichtung bei Szenario 1, Flachdach für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018

**Vergleich mit den Messungen bei Szenario 2 (Giebeldach)**

Windrichtung: 360°: Es fällt auf, dass bei diesem Strömungsszenario wesentlich größere Unterschiede zwischen den Modellergebnissen und den Messungen zu sehen sind (Abbildung 27), d.h. die Modelle

überschätzen die Windgeschwindigkeit deutlich. Ein Grund dafür sind die modellinternen Einschränkungen bei MISKAM bei der 3D Darstellung des Giebeldachs. Hier sieht man wiederum, dass bei 360°, also einer schrägen Anströmung (Abbildung 28 links), das Giebeldach einen Einfluss auf die Strömung hat.

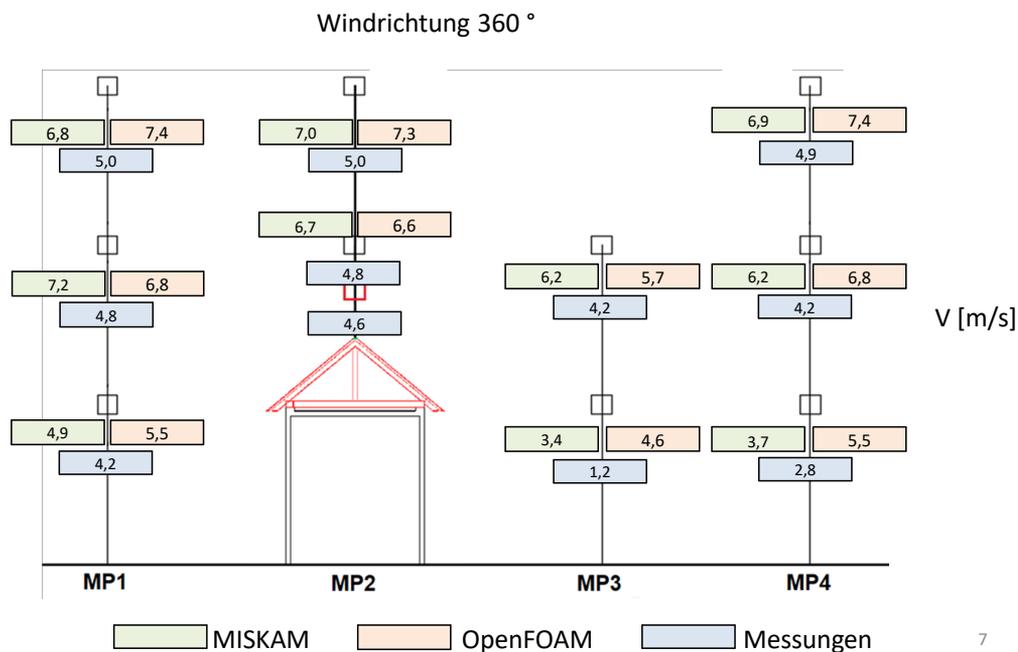


Abbildung 27: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 360° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.

Anhand der Aufnahme bei Schneelage am Untersuchungsstandort (Abbildung 28 rechts) wurde dokumentiert, dass die Geländekante bei Nordwind einen Windschatten verursacht, welcher in dieser Situation zu Schneeverwehungen geführt hat.

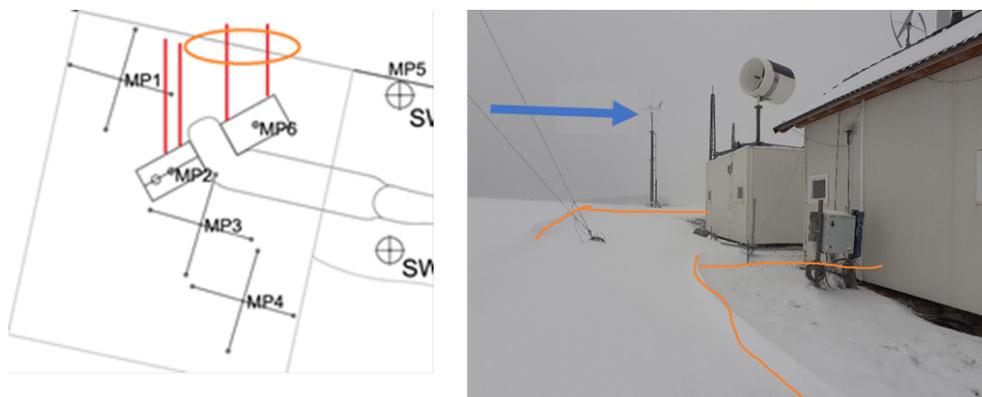
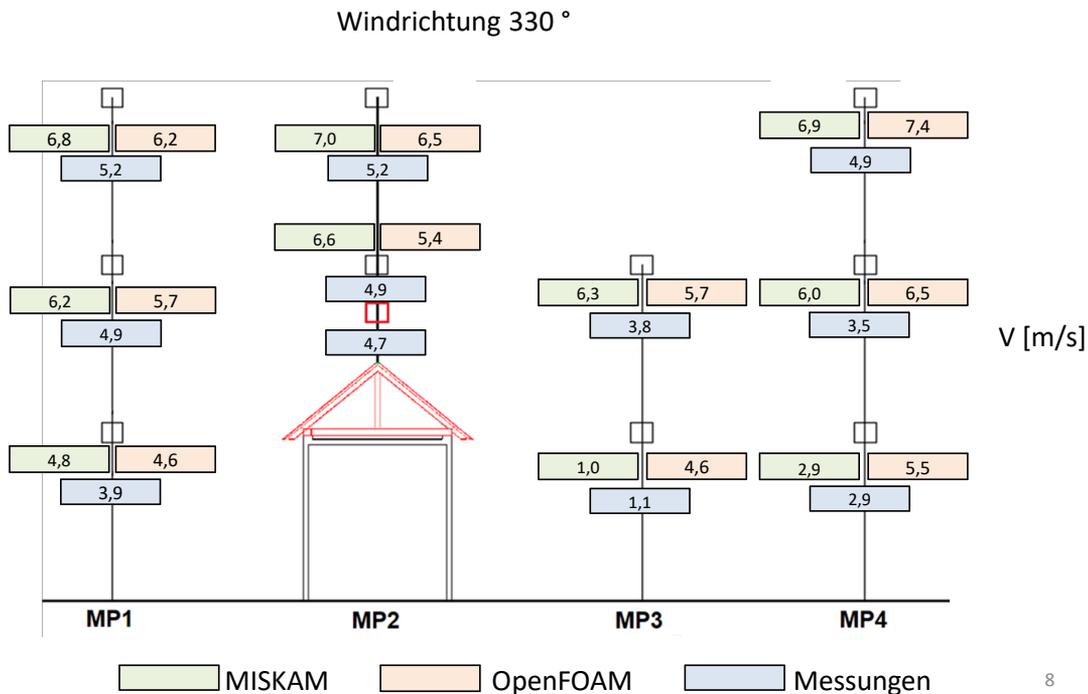


Abbildung 28: Grundriss Infrastruktur (links): Die roten Striche hier zeigen die Windrichtung aus 360°. Der orange Kreis zeigt die Geländekante; Aufnahme vom Untersuchungsstandort mit Schneeverwehungen (rechts): der rote Pfeil bezeichnet die Anströmrichtung am Aufnahmetag, die orangefarbene Linien verdeutlichen die Kanten der Schneeweichten

Das könnte der Grund sein, dass diese Geländeeigenschaft im Modell nicht so gut abgebildet werden konnte. Die orangefarbene Linien zeigen die Kante der Stauzone, sichtbar an der Schneeweichte. Die

gemessenen Windrichtungen an diesem Tag lagen im Durchschnitt bei 330°. Bei direkter Nordanströmung müsste sich die Geländekante noch stärker auswirken.

Windrichtung 330°: In Abbildung 29 sind die Modellergebnisse und die Messungen für die Windrichtung 330° bei Szenario 2 zu sehen. Die Ergebnisse beider Modelle stimmen meistens gut überein. Die Messungen werden meistens deutlich überschätzt.



8

Abbildung 29: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 330° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach, für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.

Die Ablenkung der Strömung, sowie die Reduktion der Windgeschwindigkeit im Luv und Lee der Garagen sind in Abbildung 30, in welcher hier exemplarisch ein Querschnitt durch das Strömungsfeld parallel zur Anströmrichtung gezeigt wird, deutlich zu erkennen.

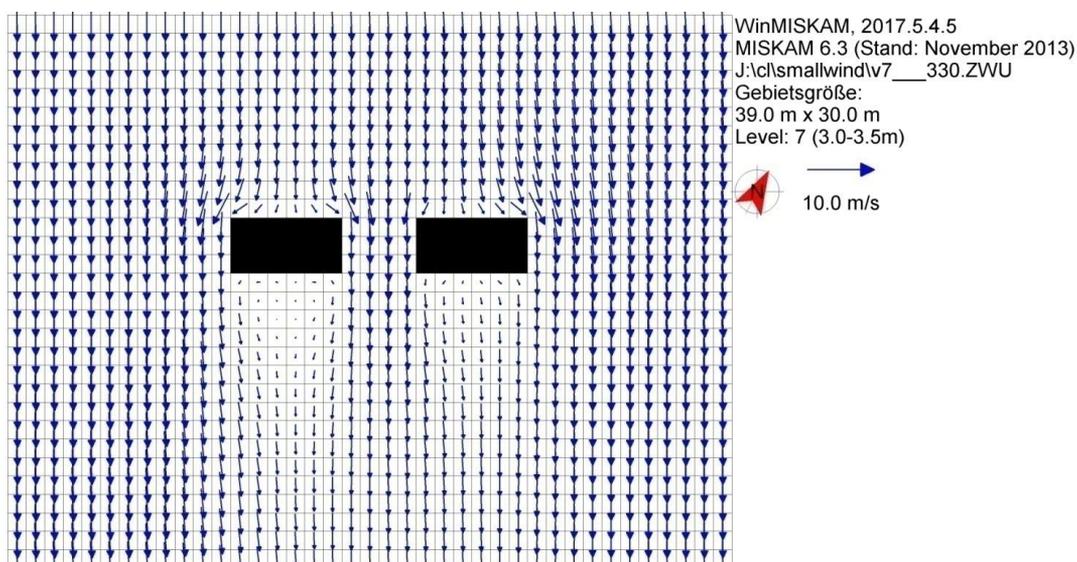


Abbildung 30: Windfeld in den untersten Modellschichten 3 bis 3,5 m in MISKAM bei Szenario 2

Windrichtung 180°: Der Vergleich zwischen den modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 180° Windrichtung sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Modelle stimmen hier bei MP1 und MP2 gut überein, gehen bei MP3 und MP4 jedoch deutlich auseinander, d.h. OpenFOAM unterschätzt hier die Werte deutlich. Im Vergleich zu den Messungen am MP2 überschätzen beide Modelle die Messungen um ca. 1 m s<sup>-1</sup>., während die Übereinstimmung am MP1 gut ist. An den Messpunkten 3 und 4 liegen die Messwerte zwischen den Modellergebnissen.

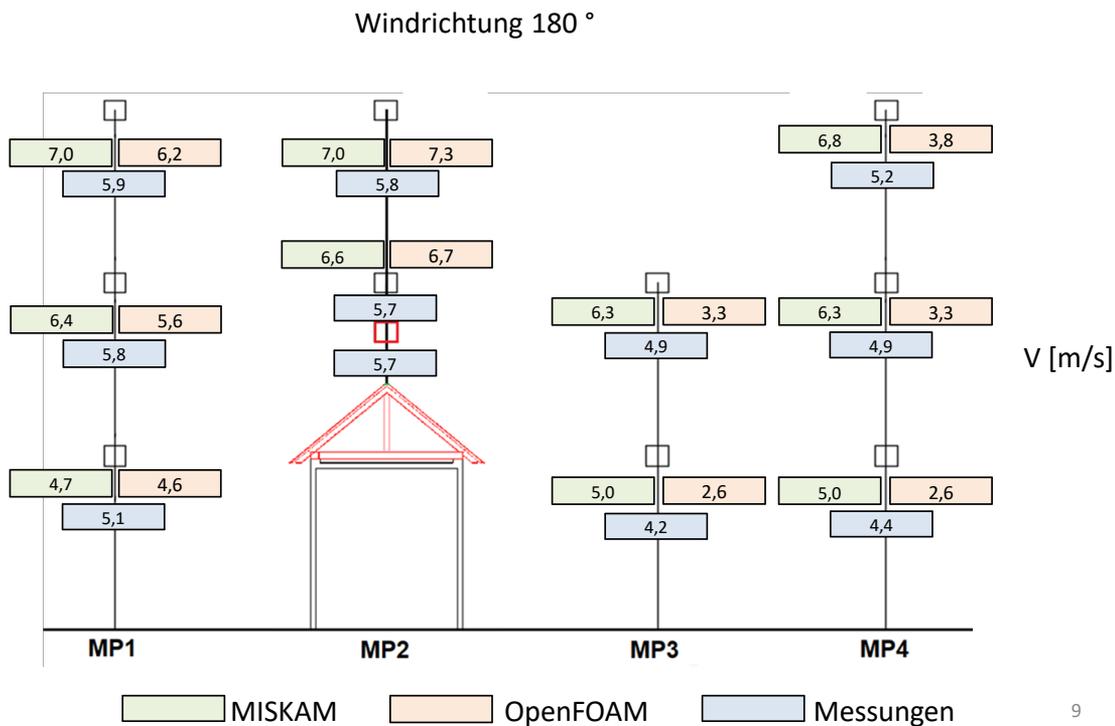


Abbildung 31: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 180° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach, für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.

### 6.1.2. Vergleich der gemessenen Windverhältnisse über Giebeldach und Flachdach

Bei dem Vergleich zwischen den Strömungsergebnissen für Giebeldach und Flachdach aus den Messungen ist zu berücksichtigen, dass die Messungen für die beiden Szenarien in unterschiedlichen Zeiträumen stattgefunden haben, dementsprechend unter unterschiedlichen Wetterbedingungen und mittleren Windgeschwindigkeitsverhältnissen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Mittlere Windgeschwindigkeiten in den Messmonaten mit Zuordnung zur jeweils vor Ort befindlichen Dachkonfiguration

	Flachdach 330°	Giebeldach 330°
Jänner	4,79 m/s	
Februar	4,52 m/s	
März	5,00 m/s	
April	7,46 m/s	4,42 m/s
Mai		4,06 m/s
Juni		5,16 m/s
Juli		
August		
September		
Oktober	6,25 m/s	
November	5,03 m/s	
Dezember	6,13 m/s	

Flachdach-Messungen wurden von 03.10.2017 bis 11.04.2018 durchgeführt bzw. im Bericht ausgewertet. Der Zeitraum umfasst die Herbst- und Winter-Monate, wo generell höhere Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind und auch beobachtet wurden als im Sommer. Giebeldach-Messungen wurden von 12.04.2018 - 27.06.2018 durchgeführt bzw. im Bericht ausgewertet.

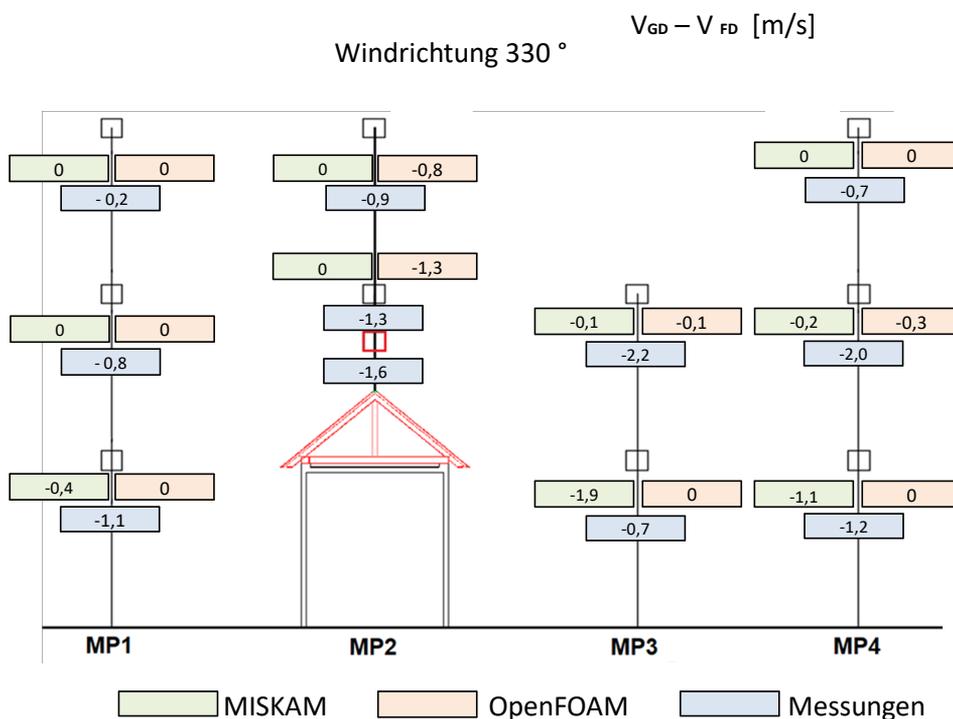


Abbildung 32: Vergleich zwischen Messungen und Modellergebnissen: Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Giebeldach und Flachdach bei 330° Windrichtung.

Aus dem Modellvergleich wird ersichtlich, dass es, wie erwartet, zu keiner Erhöhung der horizontalen Windgeschwindigkeit über dem Giebeldach kommt. Bei den meisten Punkten sind in den Modellergebnissen kaum Unterschiede zwischen Giebel- und Flachdach zu erkennen. Ein Grund dafür

sind die modellinternen Annahmen bei der Darstellung der unterschiedlichen Dachformen bzw. die Größe der Garagen ist zu klein, um große Auswirkungen auf die Strömungsbedingungen in die Umgebung zu erzeugen. Die Ablenkung der Strömung sowie die Reduktion der Windgeschwindigkeit im Lee der Garagen sind jedoch in den Modellergebnissen gut zu erkennen.

Zahlreiche Studien (Abohela 2013) belegen, dass die Windgeschwindigkeiten bei Giebeldächern um rund 1 m/s höher sind als bei Flachdächern. OpenFOAM gibt dieses Geschwindigkeitsverhältnis aufgrund der höheren Gitterauflösung und der realistischeren Darstellung der Dachformen im Modell sehr gut wieder, während es mit MISKAM nicht möglich ist, diese unterschiedliche Strömungsbeeinflussung durch die beiden Dachformen bei der gegebenen Konfiguration zu simulieren.

MISKAM simuliert bei Giebeldach im Lee der Garagen höhere Windgeschwindigkeiten als bei Flachdach. Dieses Ergebnis ist den gemessenen Verhältnissen ähnlicher als jenes von OpenFOAM, das im Lee im untersten Niveau (im Bereich der Rezirkulationszone) keinen Einfluss der Dachformen zeigt.

### 6.1.3. Modell-Modell-Vergleich

Bei den Modell-Modell-Vergleichen wurden exemplarisch die Ergebnisse für den Vergleich am Punkt MP2 der KWEA herangezogen.

Szenario 1 (Flachdach): Am wichtigsten für die gegenständliche Fragestellung ist der Vergleich der Modellergebnisse am Standort der über Dach montierten KWEA (Messpunkt M2). Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die mit den Modellen MISKAM und OpenFOAM berechneten Windgeschwindigkeitsprofile über Flachdach (Szenario 1) bei den drei Hauptwindrichtungen.

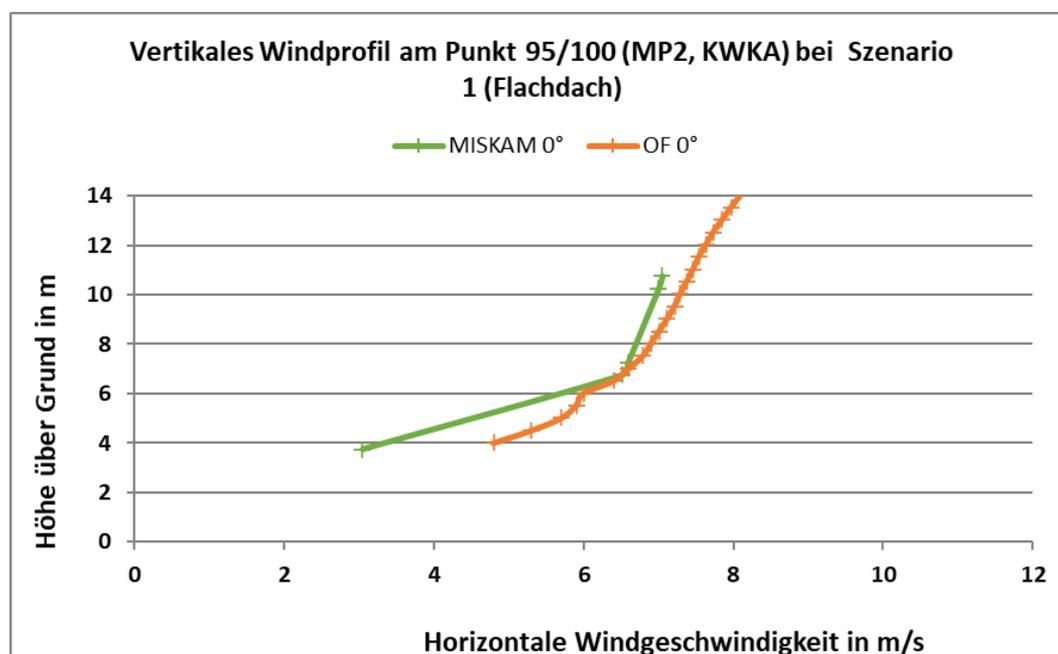


Abbildung 33: Vergleich der Modellergebnisse für 360° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).

MISKAM liefert unmittelbar in Dachniveau deutlich geringere Windgeschwindigkeiten als OpenFOAM, was durch eine unterschiedliche Grenzschichtmodellierung an Oberflächen (Einfluss der Rauigkeit auf

die angrenzende Strömung) und die sehr unterschiedliche räumliche Auflösung der beiden Modellgitter zu erklären ist. Diese Unterschiede sind für die Begutachtung des KWEA-Standortes jedoch nicht entscheidend. In etwa 7 m über Grund (3 m über Dach) sind die Modellergebnisse an diesem Punkt sehr ähnlich.

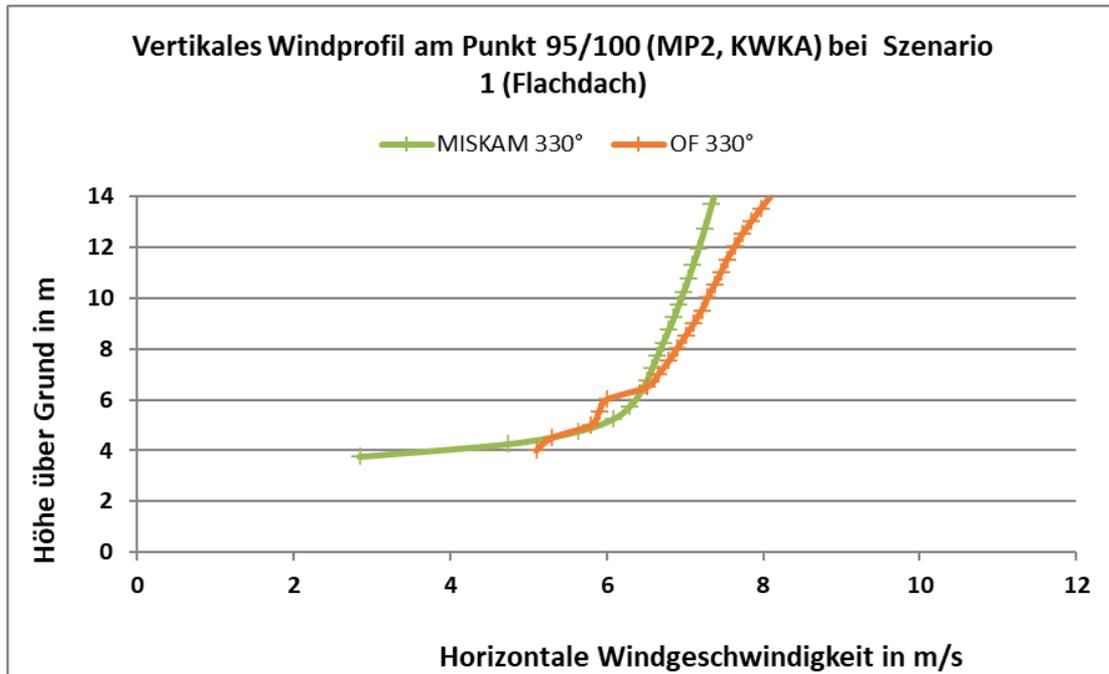


Abbildung 34: Vergleich der Modellergebnisse bei 330° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).

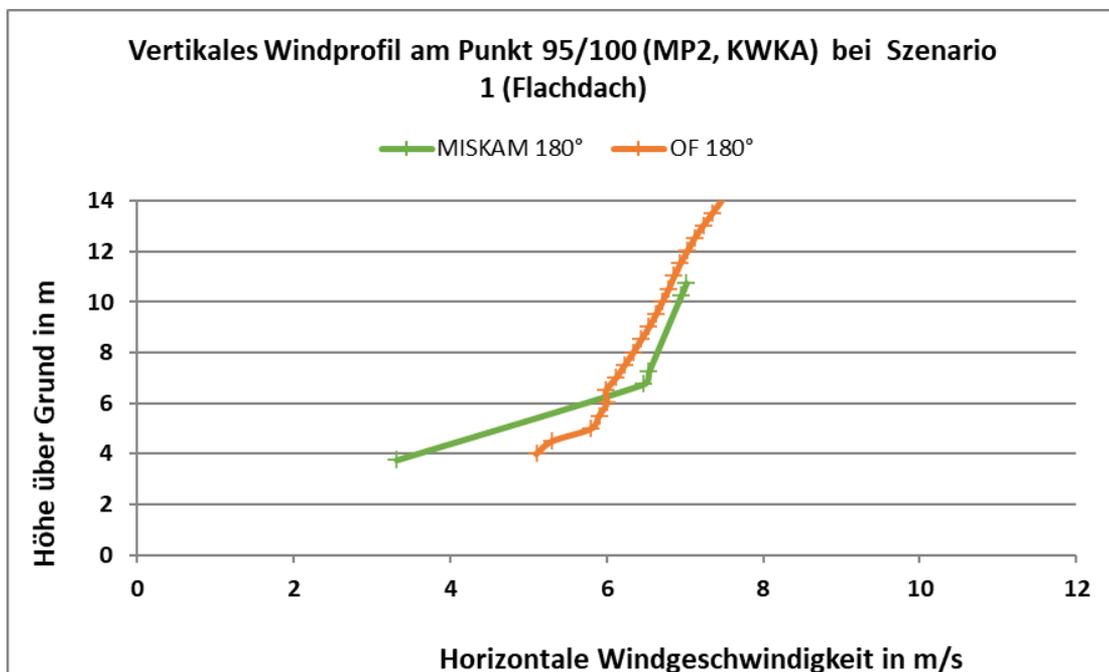


Abbildung 35: Vergleich der Modellergebnisse bei 180° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).

Szenario 2 (Giebeldach): Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die Modellergebnisse bei den drei Hauptwindrichtungen über Giebeldach am Messpunkt M2, KWEA Standort. In diesem Fall sind die MISKAM-Windgeschwindigkeiten auch direkt am Giebel sehr ähnlich den Ergebnissen von OpenFOAM.

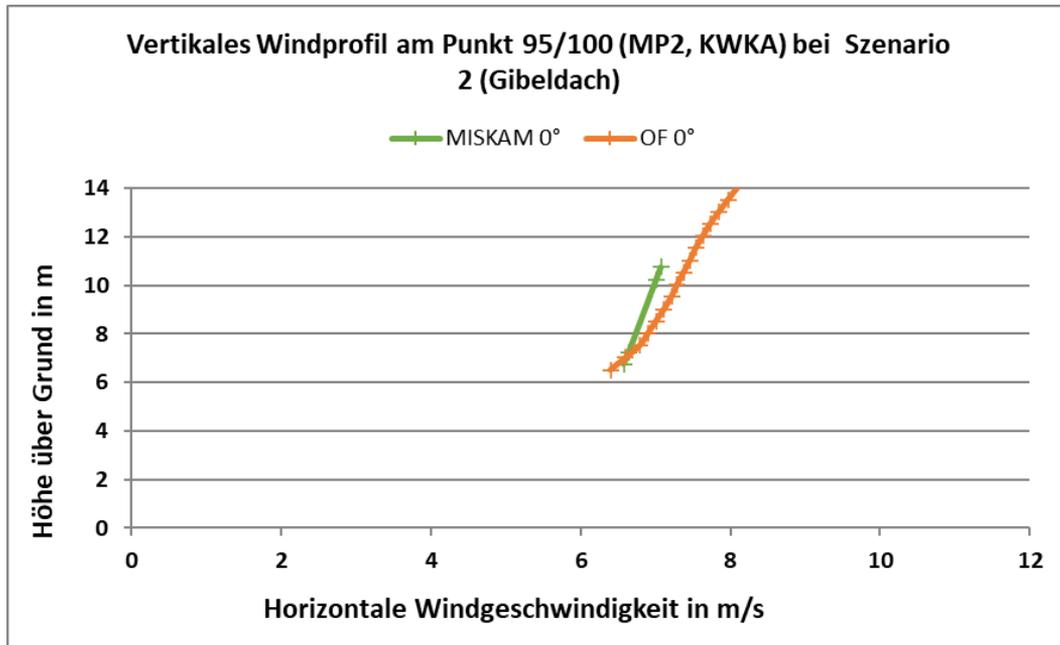


Abbildung 36: Vergleich der Modellergebnisse bei 360° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).

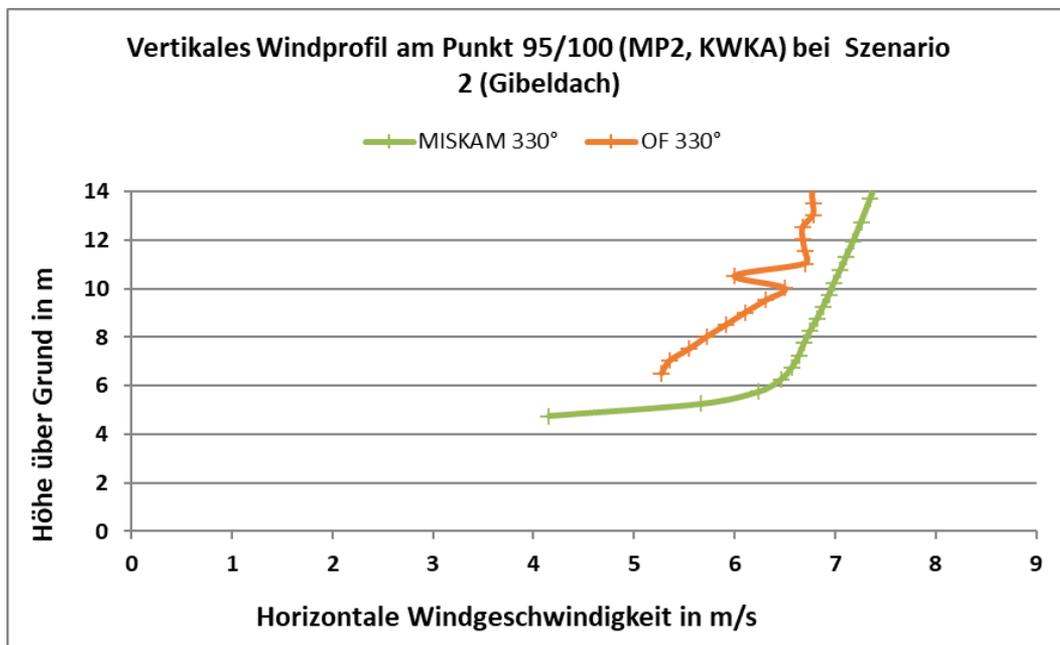


Abbildung 37: Vergleich der Modellergebnisse bei 330° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).

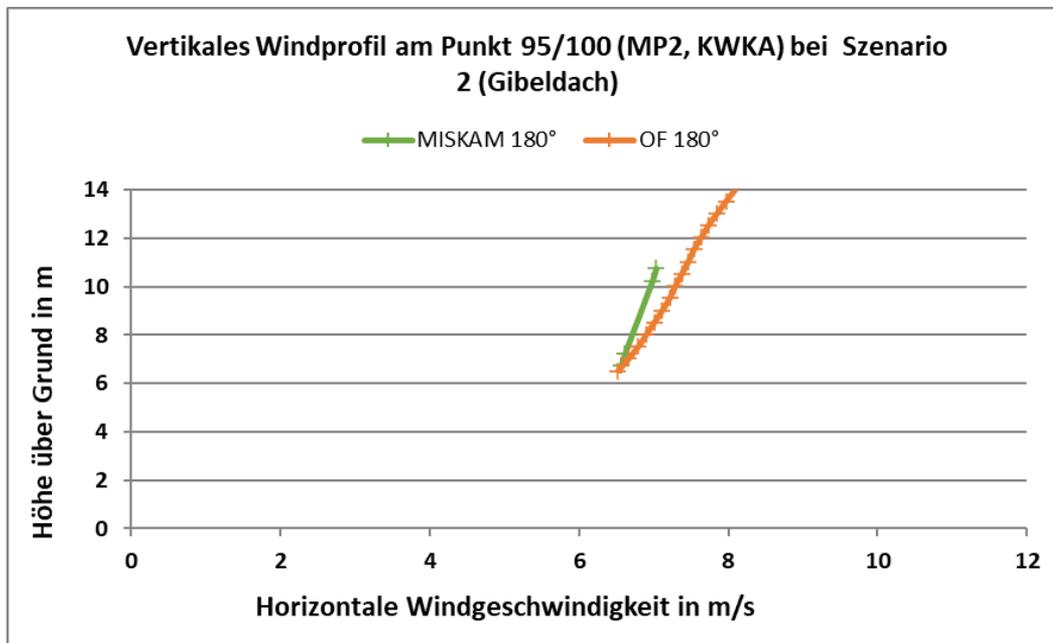


Abbildung 38: Vergleich der Modellergebnisse bei 180° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).

## 6.2. Messtechnische Erfassung

Die Strömungseigenschaften des Testfelds wurde zuerst ohne Gebäude untersucht, um eine Standortkalibrierung zu erstellen. Anschließend wurden die Strömungsmuster an und um zwei Gebäude (Flach- und Satteldach) mit auf Messmasten installierten Ultraschall-Anemometern gemessen, welche die horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung messen. Die Sensoren wurden in 3,5 m, 7 m und 10,5 m vor und hinter dem Gebäude sowie auf dem Gebäude in 7 und 10,5 m positioniert, um Wirbel und Turbulenzen untersuchen zu können. Es wurden nur Messwerte senkrecht zum Giebel des Gebäudes (Windrichtung 315°) untersucht. Die Werte wurden mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet und in 1-Minuten-Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung umgerechnet. Als Referenz für die Windgeschwindigkeit über dem Gebäude diente der Messmast vor dem Gebäude, der der freien Strömung ohne hindernisbedingte Störung ausgesetzt war.

Alle Werte wurden mit einer Abtastrate von 1 Hz im Datenlogger Ammonit Meteo 40 M gemessen. Diese wurden anschließend als 1-Minuten-Mittelwert, Maximum, Minimum und Standardabweichung ausgewertet. Die Messung von Temperatur, Feuchte und Umgebungsdruck, die für die Erstellung einer standardisierten Leistungskurve unerlässlich ist, wurde im gleichen Zeitintervall am Messpunkt MP1 in 5 m Höhe über dem Boden aufgezeichnet.

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob unterschiedliche Dachformen einen positiven oder negativen Einfluss auf die Leistungsabgabe einer dachmontierten Kleinwindkraftanlage haben, wurde der Einfluss des Daches auf die Anströmung anhand der Messdaten analysiert. Dazu wurden nur Messwerte der Windrichtung 315° (einschließlich der Werte  $\pm 20^\circ$  der Hauptrichtung) verwendet, die die Analyse von Nachlaufeffekten hinter den Gebäuden mit den Werten des Messpunktes MP4 ermöglichen. Um Strömungsmuster des Geländes auszuschließen, wurden die Messwerte von MP2 und MP4 mit Gebäuden mit den Werten ohne Gebäude verglichen (Geländekalibrierung). Die

Klassifizierung der Werte erfolgte mit dem in der Norm IEC 61400-12 beschriebenen BIN-Verfahren und in einer Schrittweite von 0,5 m/s. Es wurden nur Werte der entsprechenden Höhe und des entsprechenden Messpunktes verglichen, z.B. wurden Werte vom MP2 7 m Flachdach mit MP2 7 m Werten aus der Standortkalibrierung verglichen. Zusätzlich wurde der Winkel der vertikalen Winde für MP2 und MP4 ausgewertet.

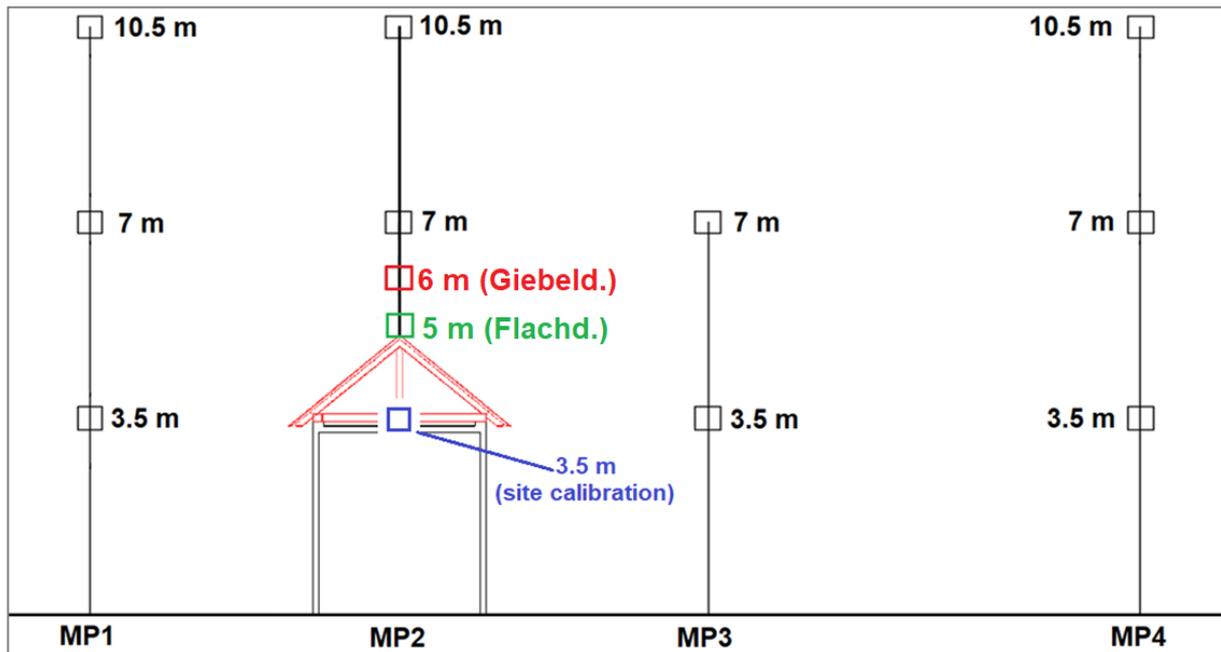


Abbildung 39: Anordnung der Windsensoren im Energieforschungspark Lichtenegg

Abbildung 40 zeigt die Varianz der Windgeschwindigkeit an MP2 für das Giebeldach (a) und das Flachdach (b) in 10,5 m, 7 m. In Dachnähe weicht die Höhe des dritten Messpunktes auf 6 m für das Giebeldach und 5 m für das Flachdach ab. Der Windgeschwindigkeitsverlauf am MP2 in Abbildung 40 (a), der sich auf das Giebeldach bezieht, zeigt in 10,5 m Höhe keine Zunahme der Windgeschwindigkeit im Vergleich zum Freifeld (Standortkalibrierung). Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss eines Hindernisses auf die Grenzschichten in der doppelten Höhe weniger als 0,1 m/s beträgt. In 7 m (Nabenhöhe) kommt es zu einer leichten Erhöhung der Windgeschwindigkeit von durchschnittlich +0,2 m/s oder +4%. Im Gegensatz dazu steigt die Windgeschwindigkeit in 6 m (1,15 m über dem Dachgiebel) von 10 m/s auf 12 m/s im Vergleich zum Freifeld, was +20% Windgeschwindigkeitszunahme ergibt.

Das Flachdach in Abbildung 40 (b) hingegen zeigt einen noch höheren Anstieg der Windgeschwindigkeit. Die Zunahme der Windgeschwindigkeit über dem Flachdach an der oberen Grenzschicht in 10,5 m liegt zwischen +0,2 und +0,4 m/s in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 5 m/s und 10 m/s. Die Zunahme in 7 m Höhe ist noch höher und liegt zwischen +0,4 m/s und +0,9 m/s im gleichen Windgeschwindigkeitsbereich. Im Durchschnitt steigt die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe (7 m) um +8 %. In 5 m Höhe bzw. 1,65 m über dem Flachdach beträgt die Zunahme bis zu +23 %. Beide Dachformen zeigen eine Zunahme der Windgeschwindigkeit in jeder Höhe, jedoch weist das Flachdach die höchste Zunahme auf. Dies ist wahrscheinlich auf eine größere Stauung vor dem Gebäude zurückzuführen, was zu einem verstärkten Düseneffekt über dem Gebäude in Nabenhöhe führt.

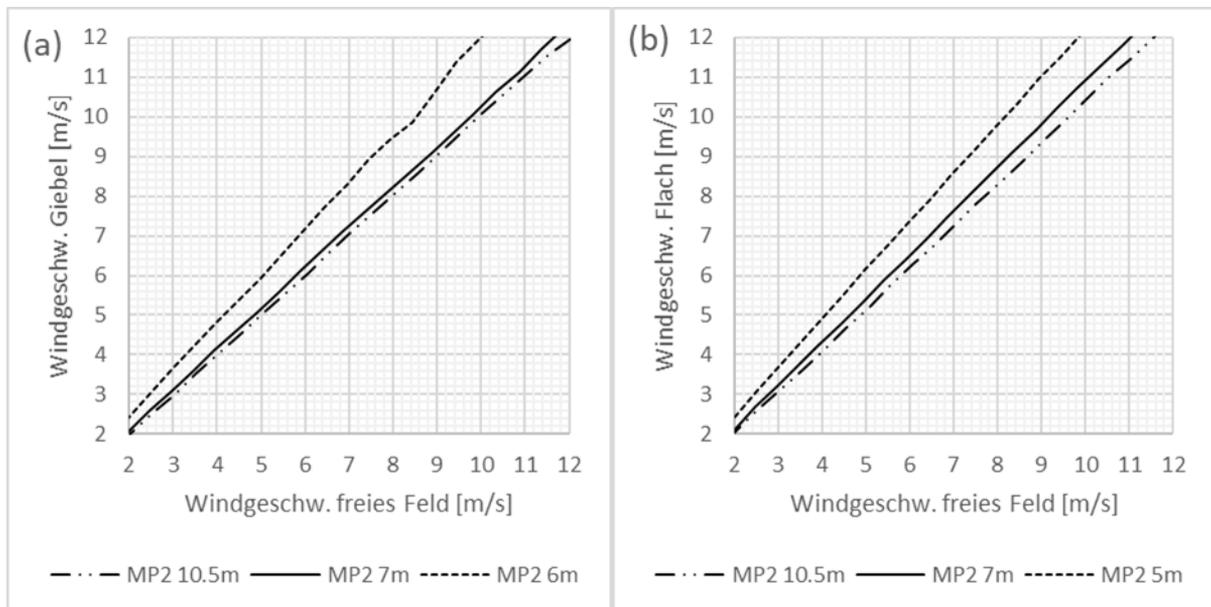


Abbildung 40: Windgeschwindigkeit MP2 über Giebel-(a) und Flachdach-(b) in Bezug zum freien Feld (site calibration)

Abbildung 41 bezieht sich auf die Nachlaufeffekte 17 m hinter der Mitte der Gebäude. In Abbildung 41 (a) ist die Wirkung des Giebeldaches hinter dem Gebäude in Strömungsrichtung in den Höhen 10,5 m, 7 m und 3,5 m dargestellt. Es zeigt sich, dass in 10,5 m/s kein Einfluss feststellbar ist, was darauf hinweist, dass ein Hindernis wie ein Giebeldachgebäude einen lokalen Wirkungsbereich in der Nachlaufströmung von weniger als der doppelten Höhe des Hindernisses hat. Im Gegensatz dazu verringert sich die mittlere Windgeschwindigkeit in 7 m in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 5 m/s bis 10 m/s um  $-0,8\text{ m/s}$  bis  $-2\text{ m/s}$ . Ein ähnlicher Verlauf ist in 3,5 m Höhe hinter dem Giebeldach zu erkennen. Außerdem kann das Windgeschwindigkeitsprofil weit hinter dem Gebäude in der turbulenten Blase als relativ homogen in Höhe und Windgeschwindigkeit beschrieben werden, da die gestrichelte Linie (3,5 m) und die durchgezogene Linie (7 m) in Abbildung 41 (a) kongruent sind.

Im Vergleich zum Giebeldach weist die Strömung in der Nähe des Flachdaches ein wesentlich ungestörteres Windprofil auf. In 10,5 und 7 m zeigt sich eine leichte Beschleunigung von  $+0,2$  bis  $+0,5\text{ m/s}$ , die auf einen Einfluss des Düseneffekts über dem Flachdach hinweist. In 3,5 m Höhe ist kein Beschleunigungseffekt messbar, da keine Änderung der Windgeschwindigkeit zum freien, ungestörten Feld gemessen wurde.

Die Turbulenzintensität über den Gebäuden an MP2 ist in Abbildung 42 (a) und (b) dargestellt und zeigt für jede Gebäudeform unterschiedliche Ausprägungen. Über dem Giebeldach (siehe Abbildung 42 (a)) schwankt die Turbulenzintensität in Abhängigkeit von der Höhe und der aktuellen Windgeschwindigkeit. Generell ist zu erkennen, dass ein größerer Abstand über dem Gebäude zu einer geringeren Turbulenzintensität führt. In 10,5 m über dem Boden (5,65 m über dem Giebeldach) schwankt die Turbulenzintensität zwischen 0,12 und 0,15, während sie in 7 m über dem Boden (2,15 m über dem Gebäude) im Mittel um 0,01 zunimmt. Die höchsten Durchschnittswerte werden in 6 m (1,15 m über dem Giebel) mit Werten zwischen 0,14 und 0,17 gemessen. Im Gegensatz dazu zeigen die Messpunkte am MP2 über dem Flachdach (Abbildung 42 (b)) keine Ähnlichkeiten zum Giebeldach. In 10,5 m, 7 m und 5 m über dem Boden haben die Turbulenzintensitäten einen nahezu deckungsgleichen Verlauf in einem Windgeschwindigkeitsbereich von 2 bis 12 m/s. In diesem Fall nimmt die Turbulenzintensität ab 0,12/0,13 stetig zu und erreicht ihr Maximum bei 0,15. Der

Unterschied zwischen den mittleren Turbulenzintensitäten auf beiden Dachformen ist jedenfalls als gering einzustufen.

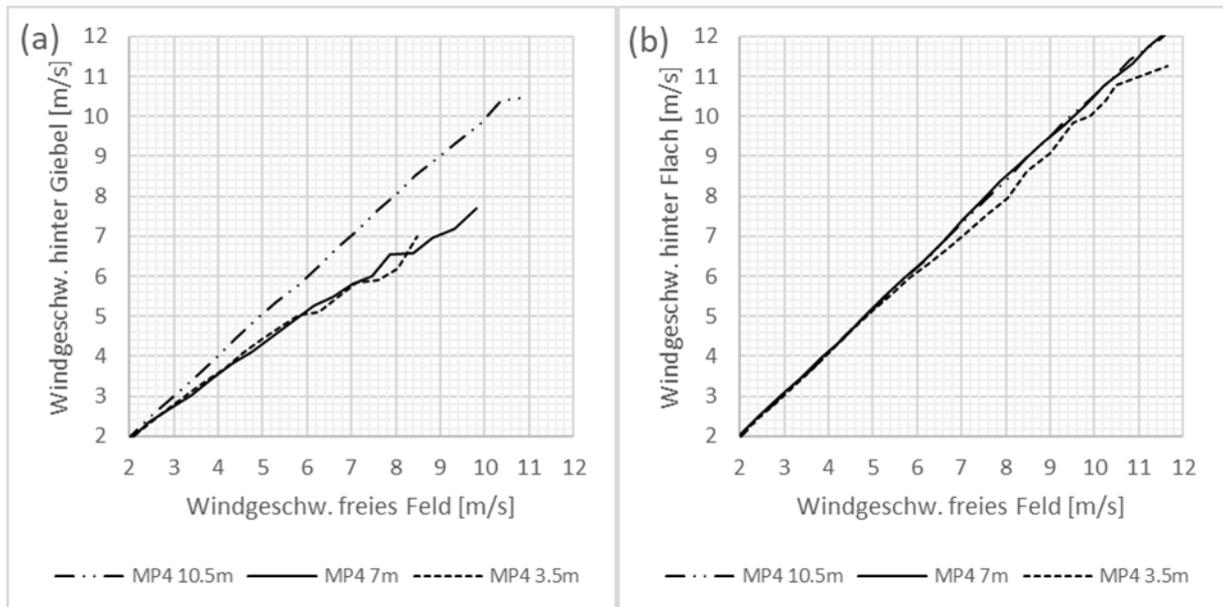


Abbildung 41: Windgeschwindigkeit MP4 hinter Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zum freien Feld (site calibration)

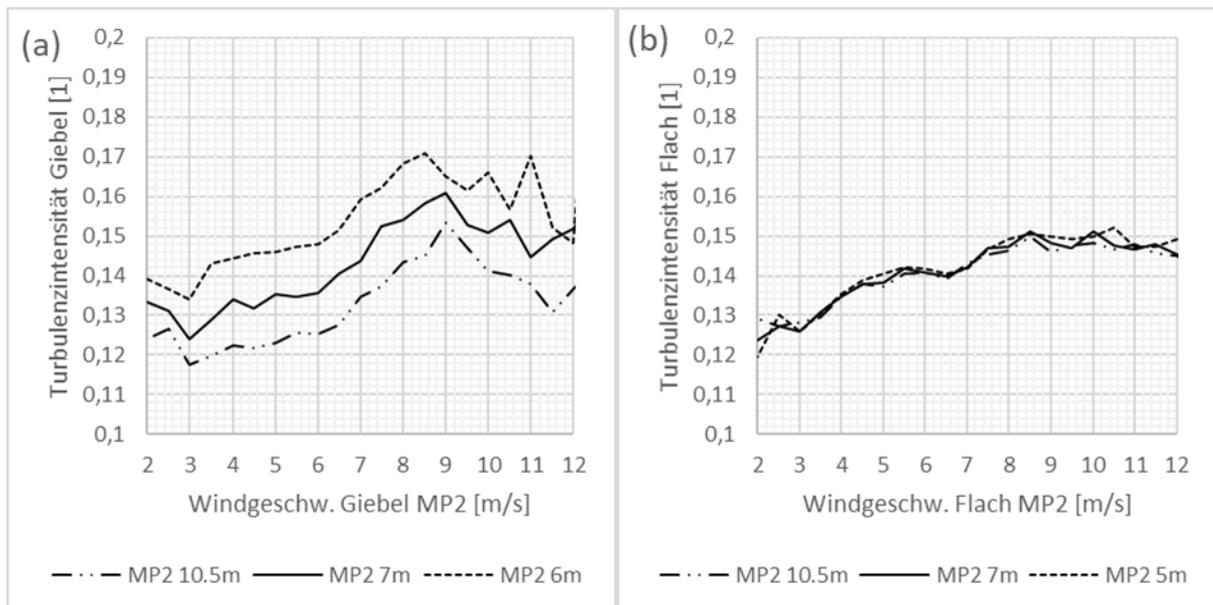


Abbildung 42: Turbulenzintensität MP2 über Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zur Windgeschwindigkeit MP2

In 17 m hinter der Gebäudemitte steigt die Turbulenzintensität aufgrund von Nachlaufeffekten und Wirbeln, die durch die Gebäude selbst verursacht werden. Abbildung 43 (a) zeigt z. B. die Turbulenzintensität an MP4 für das Giebeldach. In 10,5 m ist bei MP4 kein signifikanter Unterschied zu MP2 (siehe Abbildung 43 (a) gestrichelte Linie) zu erkennen, aber in 7 m gibt es einen Anstieg der Turbulenzintensität zwischen 0,2 und 0,25 mit einem deutlichen Abfall bei 5 m/s, der wahrscheinlich durch eine Veränderung der Wirbelablösungen verursacht wird. In Abbildung 43 (b) ist der Verlauf der

Turbulenzintensität an MP4 hinter dem Flachdach homogen mit einer geringeren Turbulenzintensität in allen Höhen.

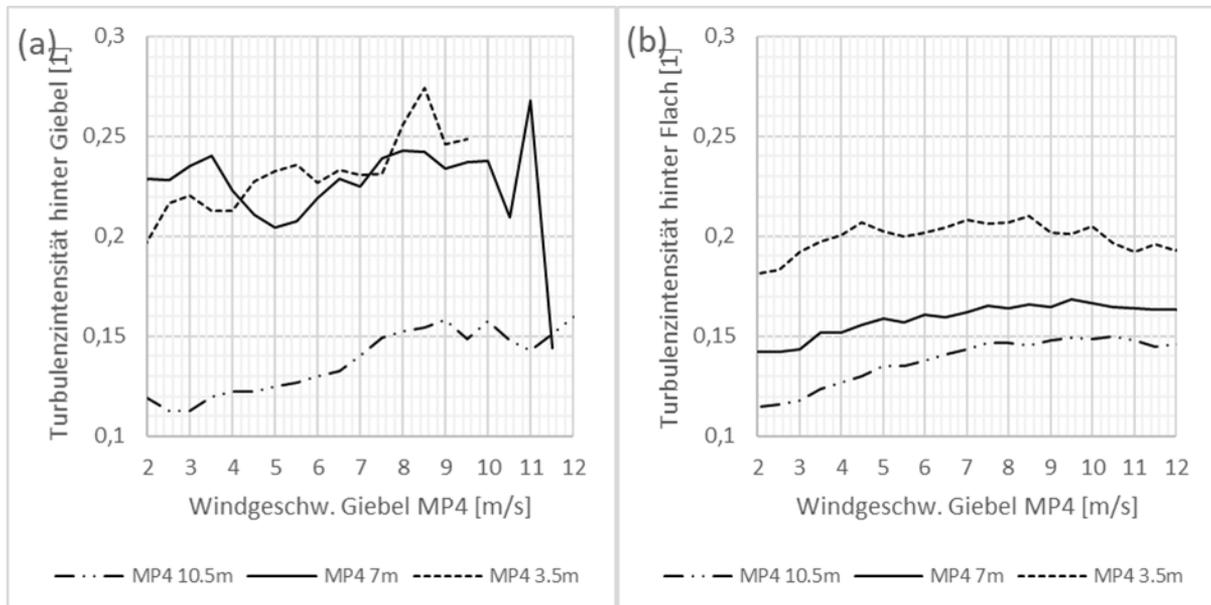


Abbildung 43: Turbulenzintensität MP4 hinter Giebel(a) und Flachdach(b) in Bezug zur Windgeschwindigkeit MP4

Die Turbulenzintensität in 10,5 ist ähnlich wie die gemessenen Werte an MP2 für das Flachdach (siehe Abbildung 42 (b)). In 7 m ist die Turbulenzintensität leicht erhöht und liegt zwischen 0,14 und 0,17. Wirbel, die durch das Gebäude verursacht werden, zeigen eine geringere Ausdehnung in Höhe und Länge als hinter dem Giebeldachgebäude, was durch niedrige Turbulenzwerte in 10,5 m und 7 m angezeigt wird.

Um die beiden Gebäudeaufbauten zu vergleichen, wurde der geometrische Mittelwert für die Windgeschwindigkeit und die Turbulenzintensität an jedem Messpunkt berechnet, begrenzt auf einen Windgeschwindigkeitsbereich von 1 m/s bis 10 m/s wegen der nicht ausreichenden Datenmenge über 10 m/s. Der durchschnittliche Vertikalwindwinkel (Schrägströmung) wurde als arithmetisches Mittel für den gleichen Windgeschwindigkeitsbereich berechnet. Tabelle 2 zeigt die gemittelten Werte für die Windgeschwindigkeit, die Turbulenzintensität und der Schrägströmung. Zusätzlich sind die Werte mit Pfeilen am Schema des Messaufbaus visualisiert. Rote Pfeile zeigen eine Zunahme der Windgeschwindigkeit an, graue Pfeile keine Zunahme und blaue Pfeile eine Abnahme. Der Winkel der Pfeile zeigt dabei den Winkel des vertikalen Windes an.

Betrachtet man das Giebeldach, so ist zu erkennen, dass in 10,5 m im Mittel kein Einfluss des Daches auf die Windgeschwindigkeit besteht, lediglich die Strömung wird um  $+1^\circ$  nach oben abgelenkt. Im Gegensatz dazu ist in Nabenhöhe (7 m) eine Zunahme der Turbulenzintensität (14%) und der Windgeschwindigkeit (+0,2 m/s) sowie des Strömungswinkels ( $+5,4^\circ$ ) sichtbar, die durch die Dachneigung verursacht wird. 7 m hinter dem Gebäude, bei MP3 in Strömungsrichtung, zeigen die Strömungsparameter hohe turbulente Wirbel mit einem entgegengesetzten Strömungswinkel. In 3,5 m Höhe verringert sich die Windgeschwindigkeit im Mittel um -3,0 m/s und die Turbulenzintensität steigt auf 53%. Eine Sogwirkung lenkt die Strömung vermutlich um  $+2,2^\circ$  nach oben ab. Ein zweiter Wirbel entsteht in 7 m bei MP3 mit einem nach unten gerichteten Strömungswinkel von  $-5,8^\circ$  und einer um -0,4 m/s reduzierten mittleren Windgeschwindigkeit. Am MP4 in 17 m hinter dem Giebeldach

scheinen sich die beiden Wirbel aufgrund ähnlicher Abnahmen der mittleren Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten in 3,5 und 7 m angeglichen zu haben.

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit Farb- und Pfeilkodierungen je Messpunkt. Dabei wird keine Geschwindigkeitszunahme in Grau, hohe Geschwindigkeitszunahme in Rot und eine Abnahme in Blau markiert. Die Pfeilrichtung, zeigt die Ablenkung in eine bestimmte Richtung an, wobei negative Werte eine Ablenkung nach unten und positive Werte eine Ablenkung nach oben bedeuten. Des Weiteren ist eine Tabelle mit den Hauptergebnissen pro Messpunkt an die Grafiken angehängt. In m/s ist die Abnahme oder Zunahme der Windgeschwindigkeit im Mittel durch die Gebäudestruktur angeben, sowie die mittlere Turbulenzintensität und der vertikale Winkel der Windströmung in Grad.

Über und hinter dem Flachdach zeigt das Strömungsbild eine andere Charakteristik als beim Giebeldach. In Tabelle 2 nimmt am MP2 die mittlere Windgeschwindigkeit in 10,5 m um +0,2 m/s, in 7 m um +0,4 m/s und in 5 m um +1,1 m/s zu, was eine höhere Zunahme der Windgeschwindigkeit darstellt als über dem Giebeldach. Die Turbulenzintensität liegt im Bereich des Giebeldaches, jedoch der Winkel des vertikalen Windes liegt unterhalb des Giebeldaches. Er liegt zwischen -0,2° in 10,5 m und +3,2° in 5 m. Die Auswirkung auf die Nachlaufströmung führt zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit bei MP3 und MP4 in 7 m, wo die Windgeschwindigkeit um +0,5 m/s und +0,2 m/s erhöht ist. Diese Grenzschicht in 7 m wird leicht nach unten gezogen, wahrscheinlich durch eine Sogwirkung eines Wirbels am MP3 in 3,5 m Höhe. Die Ausdehnung dieses Wirbels ist kleiner als bei dem hinter dem Giebeldach beobachteten Wirbel, so dass der Düseneffekt über dem Flachdach sowohl bei MP3 und MP4 in 7 m als auch bei MP4 in 10,5 m höher zum Tragen kommt.

Tabelle 2: Zu- und Abnahme der Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität, Schrägströmung über Giebel- und Flachdach

	MP1	MP2	MP3	MP4		MP1	MP2	MP3	MP4
<b>10.5 m</b>	0 m/s 13% -	+0.0 m/s 13% +1°	-	+0.0 m/s 13%	<b>10.5 m</b>	0 m/s 14% -	+0.2 m/s 14% -0.2°	-	+0.1 m/s 13%
<b>7 m</b>	0 m/s 14% +0,7°	+0.2 m/s 14% +5.4°	-0.4 m/s 24% -5.8°	-0.6 m/s 23% -4.8°	<b>7 m</b>	0 m/s 15% -0.9°	+0.4 m/s 14% +1.8°	+0.5 m/s 14% -5.0°	+0.2 m/s 16% -4.5°
<b>6/ 3.5 m</b>	0 m/s 17% -	+0.9 m/s 15% +11.7°	-3.0 m/s 53% +2.2°	-0.7 m/s 22%	<b>5/ 3.5 m</b>	0 m/s 15% -	+1.1 m/s 14% +3.2°	-2.1 m/s 44% -4.3°	+0.0 m/s 20%
	<b>MP1</b>	<b>MP2</b>	<b>MP3</b>	<b>MP4</b>		<b>MP1</b>	<b>MP2</b>	<b>MP3</b>	<b>MP4</b>

### 6.3. Verifikation der Simulationsergebnisse

Für die Evaluierung eines Modells wird eine Referenz benötigt. Als Referenz dienen meist Messungen, wobei die Repräsentativität dieser Vergleichsdaten zu berücksichtigen ist. Der Vergleich von Modell- und Messdaten wird für die den Messungen nächstgelegenen Gitterpunkten durchgeführt. Die Lage dieser Punkte sowie der Standorte der verfügbaren Messungen für das Modell MISKAM sind in Abbildung 44 zu sehen. Die Modell-Koordinaten der untersuchten Punkte für das Modell OpenFOAM sind in Abbildung 20 dargestellt.

Im Projektverlauf wurden die Simulationsergebnisse untereinander und mit den Messungen verglichen. Es wurden zwei unterschiedliche Strömungsmodellansätze verwendet, um die Auswirkungen von zwei kleinen Modellgebäuden mit zwei unterschiedlichen Dachformen (Flachdach und Giebeldach) zu simulieren. Die berechneten dreidimensionalen Windfelder wurden mit Windmessungen an zahlreichen Messpunkten um die beiden Gebäude verglichen. Weiteres wurden auf Basis der Modellergebnisse Erträge für KWEA berechnet und mit entsprechenden gemessenen Erträgen für unterschiedliche KWEA-Typen verglichen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die beiden Strömungsmodelle MISKAM und OPENFOAM etwas unterschiedliche Eingangsdaten benötigen und sich bereits dadurch Unterschiede in den Ergebnissen ergeben können. Das Modell MISKAM berücksichtigt keine Topographie im Vergleich zu OpenFOAM, wo das Gelände inkludiert ist. Die Strömungsmodellierung in MISKAM und OpenFOAM beruht auf der stationären Lösung der vollständigen dreidimensionalen Bewegungsgleichungen, wobei die Implementierung in den beiden Modellen unterschiedlich ist.



Abbildung 44: Schematische Darstellung des Untersuchungsgebiets und der Messpunkte Punkte MP1 bis MP6, an welchen Vergleiche zwischen Messungen und Modellergebnissen durchgeführt wurden.

Beim Vergleich von Modellergebnissen und Messungen sind die unterschiedlichen Bewuchs-Situationen auf den benachbarten Flächen im Laufe des Jahres zu berücksichtigen, die ebenfalls zu einer Beeinflussung der Strömung führen. Beispielsweise befand sich im Sommer und Herbst 2019 ein Maisfeld nördlich der Garagen, durch welches aufgrund der hohen Wuchshöhe eine Erhöhung der Bodenrauigkeit und eine entsprechende Abbremsung der bodennahen Strömung verursacht wurden. Eine Berücksichtigung derartiger Effekte würde eine Verfeinerung der Modelleingangsdaten erfordern (saisonal variable Rauigkeitslängen), für welche aber die Datengrundlage nur durch regelmäßigen Lokalaugenschein erfassbar wäre.

Anhand der Messungen und Modellberechnungen für zwei Gebäudeformen in Lichtenegg (Szenario 1 Flachdach und Szenario 2 Giebeldach) können die folgenden Schlussfolgerungen über die Windsituation an derartigen Standorten bzw. über die Möglichkeiten geeigneter Methoden zur Standortbewertung für verschiedene Typen von KWEA getroffen werden:

Szenario 1 Flachdach: Die Ergebnisse der beiden verwendeten Strömungsmodelle MISKAM und OpenFOAM stimmen bei dieser Dachform gut überein. Im Vergleich zu den Windmessungen tendieren beide Modelle zu einer leichten Überschätzung der Windgeschwindigkeit. Je nach Windrichtung überschätzen die Modelle die gemessenen Windgeschwindigkeiten nahezu in allen Messhöhen, teilweise um 1 bis maximal 2 m/s. Die beste Übereinstimmung zwischen Modellergebnis und Messung ist an diesem Standort bei Südwind gegeben. Die Modellergebnisse sind jedoch skalierbar und bei entsprechend optimierten Eingangsdaten (Windprofil, Rauigkeitslänge, Gelände, Bewuchs usw.), können diese Unterschiede deutlich reduziert werden.

Szenario 2 Giebeldach: Die Ergebnisse der beiden Strömungsmodelle stimmen im Fall des Gebäudes mit Giebeldach weniger gut überein als bei jenem mit Flachdach. Hauptgrund dafür sind im vorliegenden Fall die modellinternen Vereinfachungen bei der Darstellung der Dachgeometrie im Modellgitter. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die Größe der im Messprogramm verwendeten Gebäude (Einzelgaragen) zu klein ist, um im realen Windfeld ebenso wie in den modellierten Strömungsfeldern große Auswirkungen auf die Strömungsbedingungen im Dachbereich der Gebäude zu erzeugen. Die Ablenkung der Strömung durch das Gebäude sowie die Reduktion der Windgeschwindigkeit im Lee der Garagen sind jedoch sowohl in den Modellergebnissen als auch in den Messungen gut zu erkennen.

Die Variation der Geländehöhe im Bereich des Energieforschungsparks Lichtenegg ist nur in den Modellrechnungen mit OpenFOAM berücksichtigt. Der einfachere Modellansatz des CFD-Modells MISKAM bietet diese Möglichkeit nicht. Der Einfluss des Geländes ist in den Windsimulationen für Südwind deutlich zu sehen. In den Modellergebnissen sind daher die Verwirbelung der Strömung im Lee der Garage und die Veränderung der Strömung durch das Giebeldach unterschiedlich wiedergegeben. Da Giebeldächer grundsätzlich eine stärkere Beeinflussung der Strömung hervorrufen, wie auch die Messungen zeigen, sind in diesem Fall auch die Unterschiede zwischen den Modellergebnissen, sowie zwischen Modell- und Messergebnissen deutlicher zu erkennen.

Die Überschätzungen der Windgeschwindigkeit durch die Modelle könnten auch in diesem Fall durch Optimierung der Modelleingangsdaten deutlich reduziert werden. Zudem müsste für eine optimale Simulation des Strömungseinflusses dieser Dachform die Konfiguration des Rechengitters, insbesondere hinsichtlich der räumlichen Auflösung in Nähe des Dachbereichs deutlich erhöht werden. Bei dem Modell MISKAM stößt man hier jedoch aus modellphysikalischen Gründen auf Grenzen, die eine feine Gitterauflösung (unter einem Gitterabstand von 1 m) nicht erlauben. Aufwändigere Strömungsmodelle, wie das Modell OpenFOAM, ermöglichen eine derartige Optimierung, jedoch auf Kosten der erforderlichen Rechenressourcen. Gegenwärtig erscheint ein derartiger zusätzlicher Modelleinsatz für eine Standortbegutachtung nicht praxistauglich. Dies wäre Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

Die Testanwendungen haben gezeigt, dass das Modell OpenFOAM für die praktische Anwendung zur Standortbegutachtung von KWEA weniger gut geeignet ist. Der Aufwand bei der Konfiguration des Modells, vor allem bei der Vorbereitung von der 3D Geländedaten ist sehr groß. Auch die Auswertung der Modellergebnisse ist sehr aufwändig und infolge der Komplexität des Modells mit zahlreichen

Fehlermöglichkeiten behaftet. Ein Vorteil des Modells OpenFOAM gegenüber MISKAM ist jedoch, dass der Einfluss des Geländes auf die Strömung berücksichtigt werden kann und dass Dachkonfiguration, die von der Form eines Flachdachs abweichen und schräge Flächen aufweisen, in der Modellgitterdarstellung von OpenFOAM feiner aufgelöst werden können.

Bei dem Modell MISKAM ist die Gitterzellengröße mit 1 m limitiert, wodurch Giebeldächer und andere schräge Flächen nur sehr vereinfacht durch Zellenblöcke angenähert dargestellt werden können. Die Vergleiche der Modellergebnisse mit den Messungen ergeben dennoch, dass das Modell MISKAM gutes Potenzial hat, für die Prognose der mittleren Windgeschwindigkeit an einem potenziellen KWEA-Standort eingesetzt zu werden. Die Vorbereitung der Modelleingangsdaten sowie die Ergebnisaufbereitung sind aufgrund der verfügbaren Benutzeroberfläche deutlich einfacher durchzuführen und daher mit weniger Fehlermöglichkeiten behaftet.

Anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse konnte erwiesen werden, dass den Einsatz beider Modelle MISKAM und OpenFOAM zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes grundsätzlich möglich ist und vor allem bei Gebäuden mit Flachdach eine vergleichbar gute Ertragsprognose ermöglicht wie die Durchführung einer zeitlich und räumlich repräsentativen Windmessung vor Ort. Es wurden Möglichkeiten der weiteren Optimierung der Modellanwendungen beziehungsweise der Standortbewertung aufgezeigt.

# 7 Evaluierung des Betriebsverhaltens

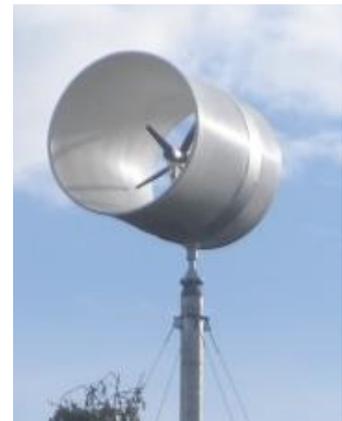
Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt vier KWEA an drei verschiedenen Standorten (Flachdach, Giebeldach und freistehend) getestet und vermessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

## 7.1. Kleinwindkraftanlagen im Test

### 7.1.1. BluePower BlueOne

Tabelle 3: Daten der KWEA BluePower Blue One

Firma	Blue Power GmbH	
Name	BlueOne	
Läufer/Achslage	Luv / Horizontal Mantelturbine	
Drehzahl	k.A.	U/min
Rotordurchmesser	1,08	m
Rotorfläche	0,91	m <sup>2</sup>
Rotorblätter	5	-
Ein-/ Ausschaltgeschwindigkeit	3 / 13,5	m/s
Gewicht	175	kg
Generator	k.A.	



### 7.1.2. Venturicon 3.Zero Windturbine

Tabelle 4: Daten der KWEA Venturicon 3.Zero Windturbine

Firma	Venturicon	
Name	3.Zero Windturbine	
Läufer/Achslage	Lee/Horizontal Mantelturbine	
Drehzahl	0 bis 1090	U/min
Rotordurchmesser	1,353	m
Rotorfläche	1,44	m <sup>2</sup>
Rotorblätter	4	-
Ein-/ Ausschaltgeschwindigkeit	3 / 18	m/s
Gewicht	80	kg



Generator	Permanentmagnet	
-----------	-----------------	--

### 7.1.3. Vertikon M

Tabelle 5: Daten der KWEA Vertikon M

Firma	DeTecVision	
Name	Vertikon M/Basis	
Läufer/Achslage	Darriues-Helix / Vertikal	
Drehzahl	0 bis 300	U/min
Rotordurchmesser	2,4 x 2,48	m
Rotorfläche	5,9	m <sup>2</sup>
Rotorblätter	3	-
Ein-/ Ausschaltgeschwindigkeit	4 / 16	m/s
Gewicht	150	kg
Generator	Permanentmagnet	



### 7.1.4. SuperWind 1250

Tabelle 6: Daten der KWEA SuperWind 1250

Firma	SuperWind GmbH	
Name	SuperWind 1250	
Läufer/Achslage	Luv / Horizontal	
Drehzahl	0 bis 600	U/min
Rotordurchmesser	2,4	m
Rotorfläche	4,5	m <sup>2</sup>
Rotorblätter	3	-
Ein-/ Ausschaltgeschwindigkeit	3 / 16	m/s
Gewicht	45	kg
Generator	Permanentmagnet	



## 7.2. Messzeiträume und Windmessdaten

Tabelle 7 zeigt die Messzeiträume für die Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeiten sowie die Ertragsmessung der untersuchten KWEA im Energieforschungspark Lichtenegg. Die Windmessungen in Lichtenegg an MP1 und am LK-Mast werden zur Abschätzung der möglichen Jahresenergieerträge

verwendet. Messzeiträume, in denen sowohl Wind als auch Ertrag gemessen wurden, werden unter anderem für die LK-Ermittlung sowie für Soll-Ist-Vergleiche herangezogen. Die Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 45 dargestellt.

Tabelle 7: mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum der KWEA

Montageform	KWEA	Mittlere Windgeschwindigkeit im Messzeitraum [m/s]	Messzeitraum KWEA
Flachdach	Vertikon M	4,6	09.04.2019 – 09.08.2019
Giebeldach	Vertikon M	5,2	26.01.2019 – 09.04.2019
Freistehend (LK)	Vertikon M	4,9	01.04.2018 – 01.08.2018
Freistehender Mast	Vertikon M	4,4	22.04.2020 – 02.09.2020
Flachdach	BlueOne	5	13.08.2019 – 06.12.2019
Giebeldach	BlueOne	5,3	18.12.2019 – 21.01.2020
Freistehend (LK)	BlueOne	5,6	14.06.2019 – 06.12.2019
Freistehender Mast	BlueOne	5,1	07.10.2020 – 23.10.2020
Flachdach	Superwind	4,0	19.11.2020 – 01.12.2020
Giebeldach	Superwind	4,8	10.04.2019 – 06.12.2019
Freistehend (LK)	Superwind	5,4	01.12.2019 – 30.04.2020-
Freistehender Mast	Superwind	4,0	09.12.2020 – 10.01.2021
Flachdach	Venturicon	8,6	01.09.2020 – 01.09.2020
Giebeldach	Venturicon	4,6	03.09.2020 – 24.11.2020
Freistehend (LK)	Venturicon	-	-
Freistehender Mast	Venturicon	-	-

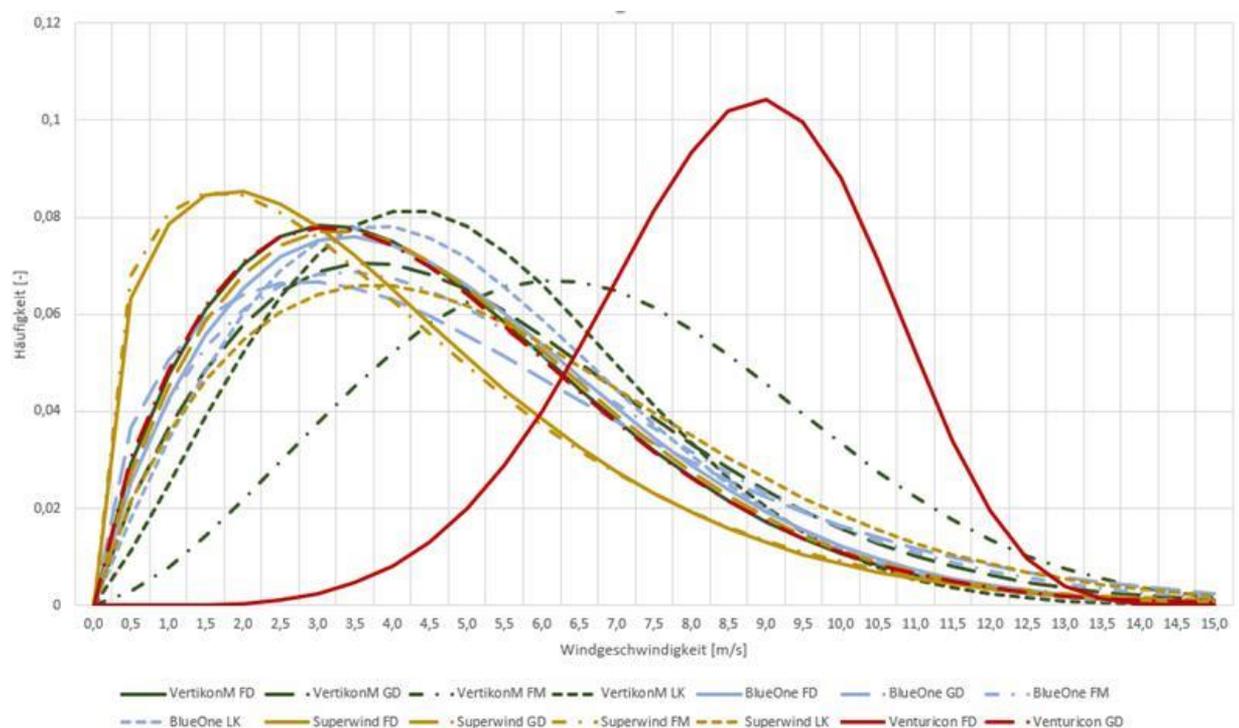


Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung an MP1 während der Messungen der KWEA (Messzeiträume siehe Tabelle 7)

Abbildung 45 zeigt die Häufigkeitsverteilungen in den Messzeiträumen, in denen sowohl Wind als auch Ertrag gemessen wurden. Der Großteil der Messzeiträume weist ähnliche Häufigkeitsverteilungen auf. Lediglich bei sehr kurzen Zeiträumen (wie z. B. bei der Venturicon oder der Superwind jeweils am Flachdach) weisen die Häufigkeitsverteilungen stärker ab.

### 7.3. Monitoring des Betriebsverhaltens und Ertragsmessung

Um Qualität und Leistungsvermögen der Anlagen beurteilen zu können, wurden über den gesamten Messzeitraum hinweg unter anderem Wind- und Ertragsdaten aufgezeichnet sowie sämtliche Aktivitäten und Zwischenfälle (Umbauten, Defekte, ...) in Form eines Logbuches dokumentiert.

#### 7.3.1. BlueOne

Wie in Tabelle 8 ersichtlich, verlief die Vermessung der KWEA BlueOne ohne größere Zwischenfälle.

Tabelle 8: Anlagenlogbuch Bluepower BlueOne

Zeitraum	Ereignis
<b>Giebeldach</b>	
2019-12-18	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-09-02	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Flachdach</b>	
2019-08-13	Montage Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-12-05	Demontage Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Freier Mast</b>	
2020-09-03	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-11-03	Demontage Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Leistungskennlinienmast</b>	
2019-06-14	Montage Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-08-12	Stromausfall
2019-08-13	Netzbetrieb wieder aufrecht
2019-12-05	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Schallmessmast</b>	
2019-12-05	Montage
2020-03-27	Schallmessung
2020-04-22	Demontage



Abbildung 46: Installationspunkte BlueOne

Abbildung 47 zeigt den gemessenen Ist- sowie den berechneten Soll-Ertrag im Messzeitraum für die BlueOne am Flach- und Giebeldach sowie am freistehenden Mast. Während der Ist-Ertrag jeweils gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

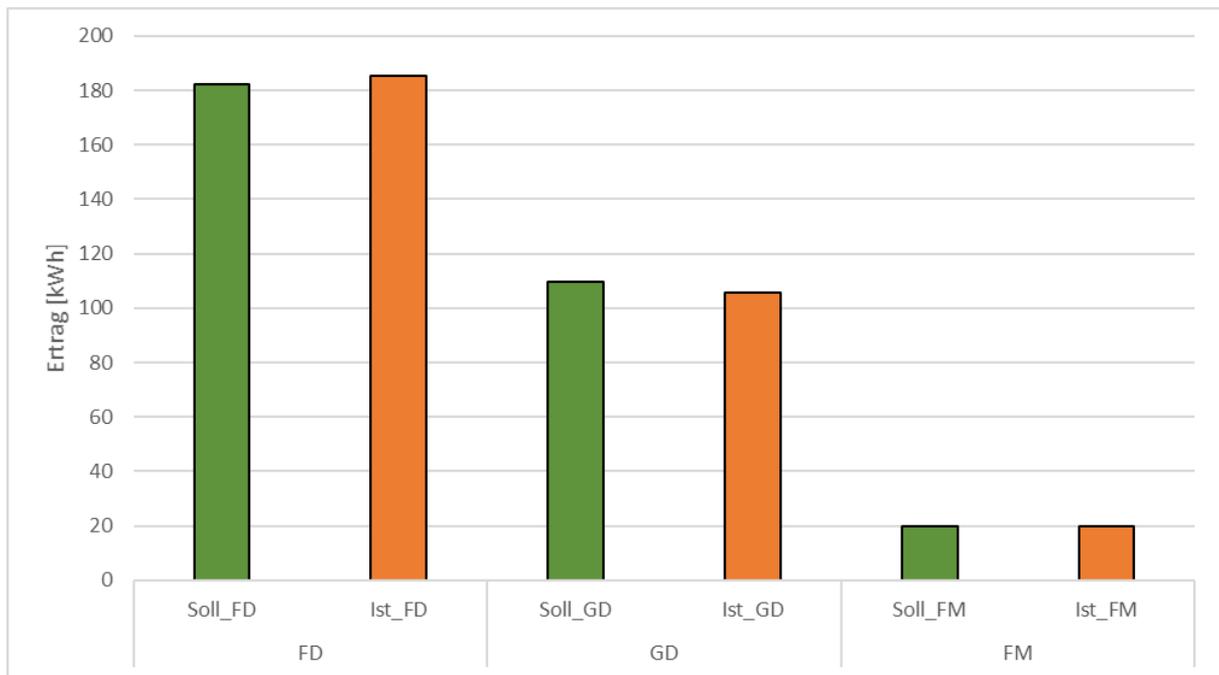


Abbildung 47: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der BlueOne

Tabelle 9 zeigt, dass die auf Basis der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) berechneten Erträge mehr oder minder exakt dem gemessenen Ertrag entsprechen – aufgrund der identen Datenbasis ein zu erwartendes Ergebnis. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse auf einen mehr oder minder optimalen Betrieb der BlueOne im Messzeitraum schließen, da sonst der gemessene Ertrag im Vergleich zum berechneten Ertrag geringer ausgefallen wäre. Während des Betriebs konnte vereinzelt beobachtet werden, dass sich die Anlage bei niedrigen Windgeschwindigkeiten zeitweise um die eigene Achse drehte und somit in diesen Zeiträumen keine Energie produzieren konnte.

Tabelle 9: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der BlueOne

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag standortspezifische LK	
		kWh	kWh	Abweichung
BlueOne	Flachdach	185,2	182,3	1,59%
	Giebeldach	105,5	109,6	-3,74%
	Freistehender Mast	19,6	19,6	-0,05%

### 7.3.2. Vertikon M

Die KWEA Vertikon M wurde 2018 in das Projekt eingebracht und zuerst am Giebeldach installiert. Schäden an den Rotorblättern führten zu mehreren Unterbrechungen der Messungen. Somit konnten die Messungen am Giebeldach mit neuem Rotordesign erst nach mehreren Monaten abgeschlossen werden. Am Flachdach konnte ohne Zwischenfälle gemessen werden. Am freistehenden Mast führten Probleme bei der Leistungsmessung zum Verlust von Daten. Die Leistungskennlinienmessung in Anlehnung an die Norm konnte dennoch erfolgreich abgeschlossen werden. Eine Schallmessung konnte aufgrund von Ausfällen der Steuereinheit und des Bremsmoduls nicht durchgeführt werden.

Tabelle 10: Anlagenlogbuch Vertikon M

Zeitraum	Ereignis
<b>Giebeldach</b>	
2018-07-18	Montage
2018-07-18	Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2018-07-25	Schaden Rotorblatt
2018-08-06	Reparatur Rotorblatt
2018-11-07	Schaden
2018-08-06	Reparatur
2019-09-01	Ausfall Datenlogger
2019-09-01	Reparatur Datenlogger
2019-01-26	Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-04-09	Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-04-09	Demontage
<b>Flachdach</b>	
2019-04-09	Montage
2019-04-10	Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-08-08	Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-04-09	Demontage
<b>Freier Mast</b>	
2020-04-22	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-04-23	Probleme Leistungsproduktion
2020-08-18	Normale Leistungsproduktion
2020-08-24	Probleme Leistungsproduktion
2020-09-01	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Leistungskennlinienmast</b>	
2018-04-12	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2018-07-18	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Schallmessmast</b>	

2020-11-19	Installation Schallmessmast
2020-12-09	Schaden Bremsmodul
2021-01-13	Problem Steuerungseinheit / Abbruch Schallmessung



Abbildung 48: Installationspunkte Vertikon M

Abbildung 49 zeigt den gemessenen Ist- sowie den berechneten Soll-Ertrag im Messzeitraum für die Vertikon M am Flach- und Giebeldach sowie am freistehenden Mast. Während der Ist-Ertrag jeweils gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

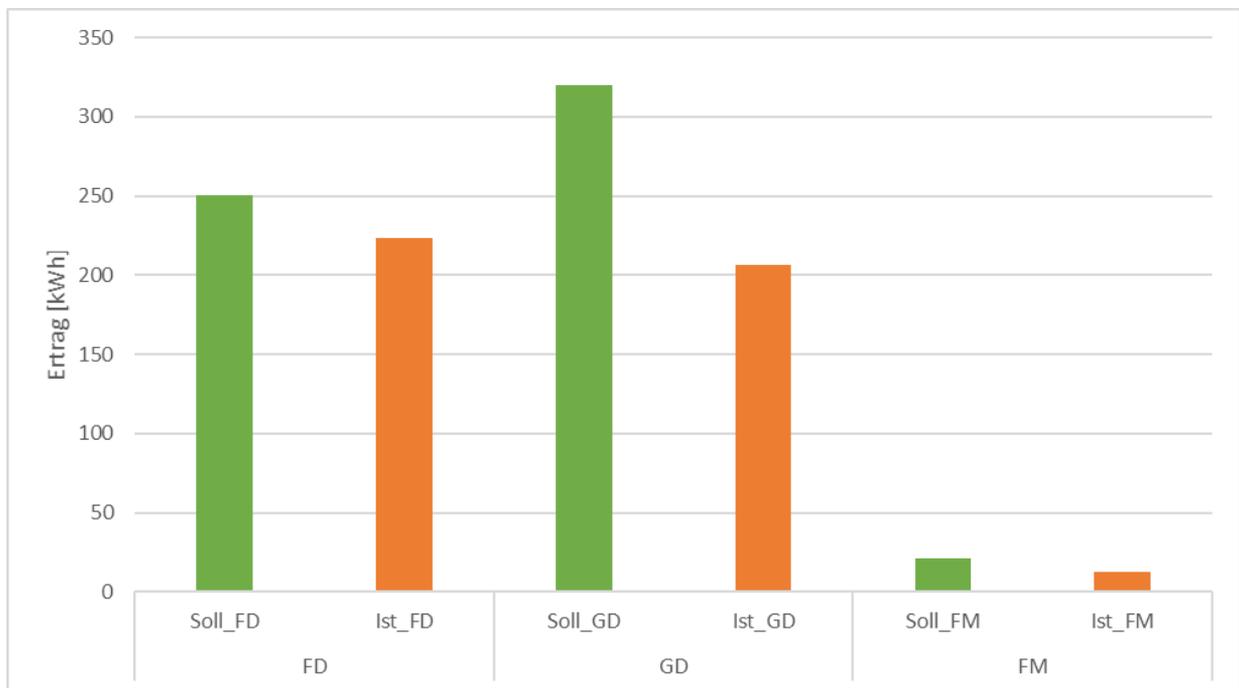


Abbildung 49: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Vertikon M

Tabelle 11 zeigt, dass die auf Basis der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) berechneten Erträge deutlich über den gemessenen Erträgen liegen. Im Vergleich zur BlueOne fällt der Unterschied teilweise deutlicher aus (bis > 40 %), was auf einen nicht optimalen Betrieb der Vertikon M im Messzeitraum schließen lässt, da bei der Erstellung der LK Messzeiträume, in denen keine oder

deutlich verminderte Erträge gemessen wurden, begründet ausgeschlossen werden können und somit nicht in der ermittelten LK aufscheinen. Bei der Ermittlung des Ist-Ertrages scheinen diese aber natürlich auf, was zu einem verminderten Ist-Ertrag führt.

Tabelle 11: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Vertikon M

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag standortspezifische LK	
		kWh	kWh	Abweichung
Vertikon	Flachdach	223,3	250,7	-10,93%
	Giebeldach	206,4	319,9	-35,48%
	Freistehender Mast	12,5	21,5	-41,86%

### 7.3.3. Superwind 1250

Die KWEA Superwind wurde 2018 zuerst am Flachdach vermessen. Probleme mit der Wechselrichtersteuerung führten zu verfälschten Leistungsmessdaten. Eine zweite Messung nach einem Update durch den Hersteller führte zu belastbaren Messdaten. Die Messung am Giebeldach verlief bis auf einen Netzausfall und damit verbunden einen teilweisen Datenverlust ohne Zwischenfälle. Am freistehenden Mast konnten die benötigten Daten ohne Zwischenfälle aufgezeichnet werden. Ein Zwischenfall bei der Demontage am Flachdach führte zum Bruch der Rotorblätter, weshalb sich die Messung am Leistungskennlinienmast verzögerte. Nach der Montage des Generators konnte zwei Wochen später die Messung mit neuen Rotorblättern fortgesetzt werden. Eine erste Schallmessung im Jahr 2018 führte ebenfalls aufgrund von Softwareproblemen beim Wechselrichter zu keinen belastbaren Ergebnissen, daher wurde diese Messung im Jahr 2020 wiederholt

Tabelle 12: Anlagenlogbuch Superwind 1250

Zeitraum	Ereignis
<b>Giebeldach</b>	
2019-04-10	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-08-12	Stromausfall
2019-08-13	Netzbetrieb wieder aufrecht
2019-12-05	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Flachdach</b>	
2018-07-18	Montage
2018-11-30	Problem Wechselrichter (Abbau WR)
2019-05-02	Einbau Wechselrichter und Start Messung
2019-08-09	Abbau wegen Problem Leistung
2019-11-19	Montage Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-12-01	Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-12-09	Demontage
<b>Freier Mast</b>	
2020-12-09	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-01-11	Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-01-14	Demontage
<b>Leistungskennlinienmast</b>	
2019-12-05	Montage

2019-12-18	Reparatur Rotor und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-04-22	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Schallmessmast</b>	
2018-06-20	Montage
2018-07-18	Demontage - Betriebsprobleme
2020-04-22	Installation Schallmessmast
2020-09-17	Schallmessung
2020-11-19	Demontage



Abbildung 50: Installationspunkte Superwind 1250

Abbildung 51 zeigt den gemessenen Ist- sowie den berechneten Soll-Ertrag im Messzeitraum für die Superwind am Flach- und Giebeldach sowie am freistehenden Mast. Während der Ist-Ertrag jeweils gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

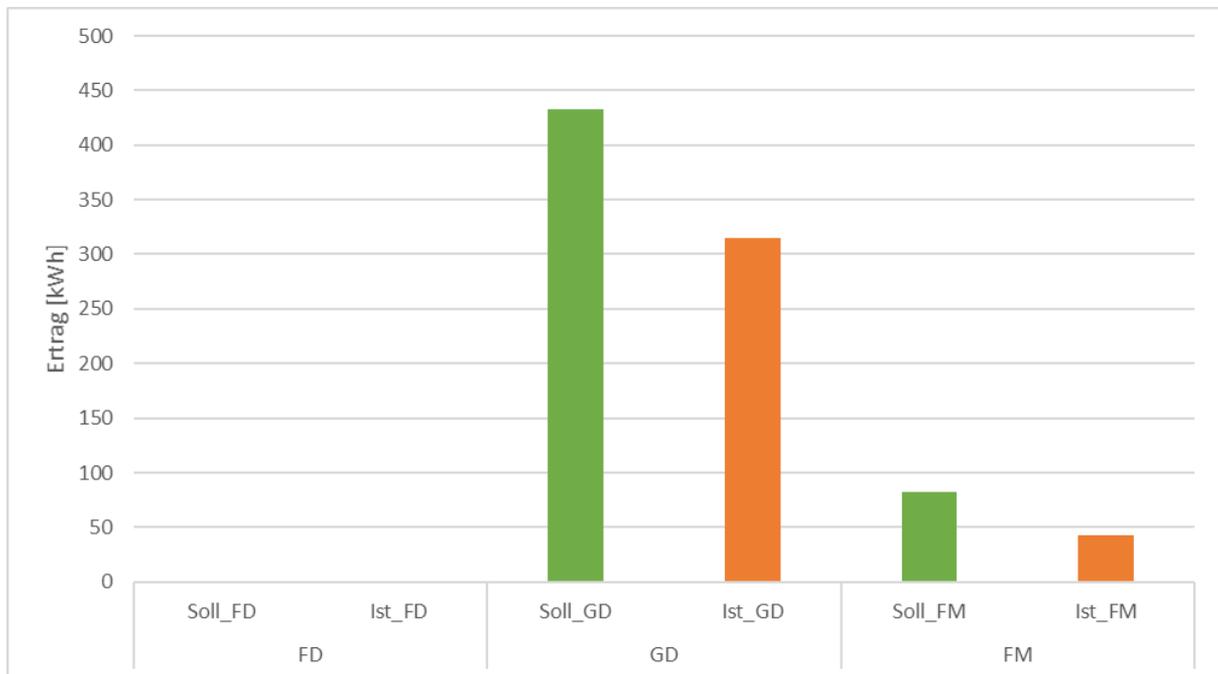


Abbildung 51: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Superwind

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, zeigt sich auch bei der Superwind ein deutlicher Unterschied zwischen den auf Basis der montagespezifischen LK berechneten und der gemessenen Erträge. Dies lässt auch bei der Superwind auf einen nicht optimalen Betrieb der Superwind im Messzeitraum schließen. Darüber hinaus lässt der kurze Messzeitraum am Flachdach keine sinnvolle Auswertung zu.

Tabelle 13: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Superwind

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag standortspezifische LK	
		kWh	kWh	Abweichung
Superwind	Flachdach	0,5	0,5	-3,92%
	Giebeldach	314,3	432,7	-27,35%
	Freistehender Mast	43,1	82,1	-47,46%

#### 7.3.4. Venturicon

Die KWEA Venturicon wurde zuerst am Schallmessmast installiert. Anfängliche Probleme bei der Ansteuerung des Wechselrichters konnten durch Softwareupdates behoben werden. Die Messung am Flachdach konnte ohne Zwischenfälle durchgeführt werden, ebenso am Giebeldach. Am freien Mast führte ein Ausfall eines Datenloggers zum Verlust der Messdaten. Aufgrund von Wechselrichterproblemen konnte keine Messung der Leistungskennlinie durchgeführt werden.

Tabelle 14: Anlagenlogbuch Venturicon

Zeitraum	Ereignis
<b>Giebeldach</b>	
2020-09-03	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-09-23	Demontage und Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Flachdach</b>	
2019-07-13	Montage Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2019-09-01	Demontage Ende Leistungs-/ & Ertragsmessung
<b>Freier Mast</b>	
2020-09-23	Montage und Start Leistungs-/ & Ertragsmessung
2020-11-19	Probleme Datenlogger – Datenverlust & Demontage
<b>Leistungskennlinienmast</b>	
2019-11-19	Montage + Problem Wechselrichter
<b>Schallmessmast</b>	
2018-08-06	Montage
2019-04-16	Schallmessung (Problem Wechselrichter)
2019-08-09	Tausch Anlage
2019-11-26	Schallmessung
2019-12-05	Demontage



Abbildung 52: Installationspunkte Venturicon

Abbildung 53 zeigt den gemessenen Ist- sowie den berechneten Soll-Ertrag im Messzeitraum für die Venturicon am Flach- und Giebeldach sowie am freistehenden Mast. Während der Ist-Ertrag jeweils gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der montagespezifischen LK (Soll\_FD/Soll\_GD/Soll\_FM) und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

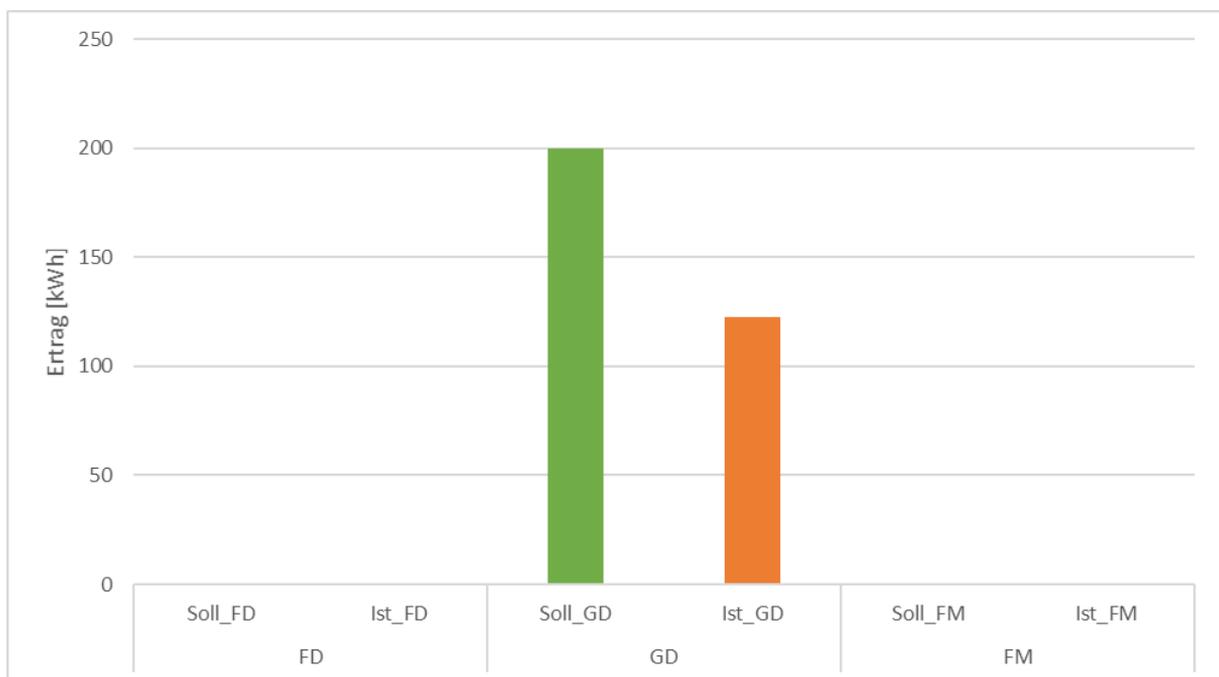


Abbildung 53: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Venturicon

Während der kurze Messzeitraum am Flachdach keine sinnvolle Auswertung zulässt, zeigt Tabelle 15 am Giebeldach eine deutliche Abweichung zwischen Soll- und Ist-Ertrag. Dies lässt ebenfalls auf einen nicht optimalen Betrieb der Venturicon im Messzeitraum am GD schließen.

Tabelle 15: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Venturicon

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag standortspezifische LK	
		kWh	kWh	Abweichung
Venturicon	Flachdach	0,8	0,8	-2,56%
	Giebeldach	122,8	200,0	-38,62%
	Freistehender Mast	-	-	-

### 7.3.5. Zusammenfassung

Wie in Tabelle 16 ersichtlich, konnte mit Ausnahme der BlueOne keine der untersuchten KWEA die auf Basis der montagespezifischen LK errechnete Soll-Erträge auch erreichen. Dies lässt – wie bereits erwähnt – auf einen nicht optimalen Betrieb der Anlagen im Messzeitraum schließen. Einzig am Flachdach konnten die Superwind- sowie die Venturicon-Anlage die Soll-Erträge erreichen, wobei der kurze Messzeitraum hier keine belastbare Auswertung zulässt.

Tabelle 16: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum für die KWEA BlueOne, Vertikon M, Superwind und Venturicon

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag standortspezifische LK	
		kWh	kWh	Abweichung
BlueOne	Flachdach	185,2	182,3	1,59%
	Giebeldach	105,5	109,6	-3,74%
	Freistehender Mast	19,6	19,6	-0,05%
Vertikon	Flachdach	223,3	250,7	-10,93%
	Giebeldach	206,4	319,9	-35,48%
	Freistehender Mast	12,5	21,5	-41,86%
Superwind	Flachdach	0,5	0,5	-3,92%
	Giebeldach	314,3	432,7	-27,35%
	Freistehender Mast	43,1	82,1	-47,46%
Venturicon	Flachdach	0,8	0,8	-2,56%
	Giebeldach	122,8	200,0	-38,62%
	Freistehender Mast	-	-	-

Da im Projekt ausschließlich marktreife KWEA eingesetzt wurden, ist die Tatsache, dass nur eine von vier Anlagen die Erwartungen erfüllen konnte, nicht zufriedenstellend. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass drei von vier am Markt erhältlichen KWEA die vom Hersteller angegebenen Erträge (über die LK) im Realbetrieb nicht erreichen.

## 7.4. Vermessung der Leistungskennlinie

Ein Schwerpunkt in der gegenständlichen Studie war die Leistungskennlinienvermessung von unterschiedlichen Bauarten von KWEA an Aufstellungsorten auf Gebäudeteilen. Zielsetzung war es dabei, das Betriebsverhalten solcher Anlagen an Aufstellungsorten auf Gebäudeteilen zu bewerten. Für diese Zwecke wurden Gebäudeteile in der Form von Containern mit unterschiedlichen, aufgesetzten Dächern (Giebeldach oder Flachdach) simuliert. Die Aufstellung der KWEA erfolgte dabei auf mittig über den Containern montierten Masten. Als Referenz wurden die KWEA auch unter freien Anströmungsbedingungen auf einem 19 m hohen Masten betrieben.

### 7.4.1. Methode

Die Vermessung von Leistungskennlinien von Windkraftanlagen ist in der internationalen Norm IEC 61400-12-1:2017 geregelt. Die Besonderheiten bei der Vermessung von KWEA (im Gegensatz zu Großwindkraftanlagen) sind im Anhang H der IEC 61400-12-1 getrennt geregelt. Die Vorgaben dieser Norm wurden in der Vermessung und Auswertung, soweit für die Betriebsituation auf Gebäudeteilen anwendbar, berücksichtigt.

Ziel einer Leistungsvermessung ist die Messung der produzierten Leistung einer Windkraftanlage in Bezug auf eine bekannte Windgeschwindigkeit. Die Messung der Windgeschwindigkeit am eigentlichen Ort des Anlagenbetriebs ist jedoch nicht möglich, da durch die Aufstellung und den Betrieb der Anlage der lokale Wind beeinflusst wird, nicht zuletzt, weil dem Wind durch die Wirkung der Windkraftanlage Energie entzogen, d.h. der Wind abgebremst wird. Aus diesem Grund werden für die Leistungsvermessung von Windkraftanlagen Windmessungen in einigem Abstand von dem Aufstellungsort herangezogen. Im konkreten Fall wurden drei vor und hinter den Gebäudeteilen befindliche Messmasten, als MP1, MP3 und MP4 bezeichnet, verwendet. Ein erschwerender Faktor in der Festlegung geeigneter Bezugsmessungen waren die relativ komplexe Windbedingungen im Energieforschungspark Lichtenegg. Ein Vergleich der Messpunkte hat schlussendlich ergeben, dass unabhängig von der Windrichtung, die Windmessung am Messpunkt MP1 in 10,5 m Höhe die beste Approximation für die Bedingungen am Aufstellungsort der KWEA über dem simulierten Gebäudeteil ist.

Die Auswertung der Leistungskurven erfolgte jeweils für zwei unterschiedliche Windrichtungsbereiche: (1) für einen festgelegten Messsektor mit möglichst freier Anströmung und (2) unter Berücksichtigung aller Windrichtungen. Die Motivation für die Auswertungen für alle Windrichtungen ist, dass über den simulierten Gebäudeteilen in unterschiedliche Windrichtungen stark unterschiedliche Strömungsbedingungen herrschen können. Eine realistische Bewertung des Anlagenbetriebs sollte daher alle Windrichtungen miteinschließen.

Alle Leistungskurven wurden anhand der Luftdruck- und Feuchtemessung auf eine Standardluftdichte von  $1,225 \text{ kg/m}^3$  korrigiert.

Fehlende Kalibrierung: Aufgrund der fehlenden Kalibrierung zwischen MP1 und MP2 können die am FD bzw. GD gemessene LK nur unter bestimmten Voraussetzungen zur Ertragsabschätzung verwendet werden: Ist die für die Ertragsabschätzung verwendete Windmessung auf einem freistehenden Mast erfolgt, kann theoretisch der Ertrag für eine Gebäudemontage abgeschätzt werden. Erfolgte die Windmessung jedoch auf einem Gebäude, ist eine Ertragsabschätzung auf Basis der am FD bzw. GD

gemessenen LK nicht ratsam, da der Einfluss der Montageform doppelt berücksichtigt werden würde. Da im vorliegenden Fall die Windmessung auf einem freistehenden Mast erfolgte, kann theoretisch der Ertrag für eine Gebäudemontage abgeschätzt werden. Umgekehrt bedeutet das natürlich auch, dass auf Basis der am LK-Mast normgerecht ermittelten LK und den an MP1 gemessenen Winddaten eine Ertragsabschätzung für Anlagen auf Flach- bzw. Giebeldach nur bedingt möglich ist, da der Einfluss der Montageform dabei nicht berücksichtigt wird. Hierfür wiederum ist eine Windmessung auf einem Gebäude (z. B. MP2) erforderlich. Mehr dazu ist in Abschnitt 9.2 zu finden.

## 7.4.2. Ergebnisse

### BlueOne

Abbildung 54 zeigt die in Anlehnung an die Norm erstellten Leistungskennlinien für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK) für die KWEA BlueOne. Im Vergleich der LK zeigt sich auch bei dieser KWEA der Einfluss der Montageart. Wie bei der Vertikon M weist auch hier die am Giebeldach gemessene LK bis zu einer Windgeschwindigkeit von ca. 9 m/s die höchsten Leistungen auf, fällt dann jedoch bei höheren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur am Flachdach bzw. am LK-Mast gemessenen Kennlinie ab. An Standorten mit geringen Windgeschwindigkeiten wäre daher eine Montage auf einem Giebeldach zu empfehlen, während an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten dem Flachdach der Vorzug zu geben ist.

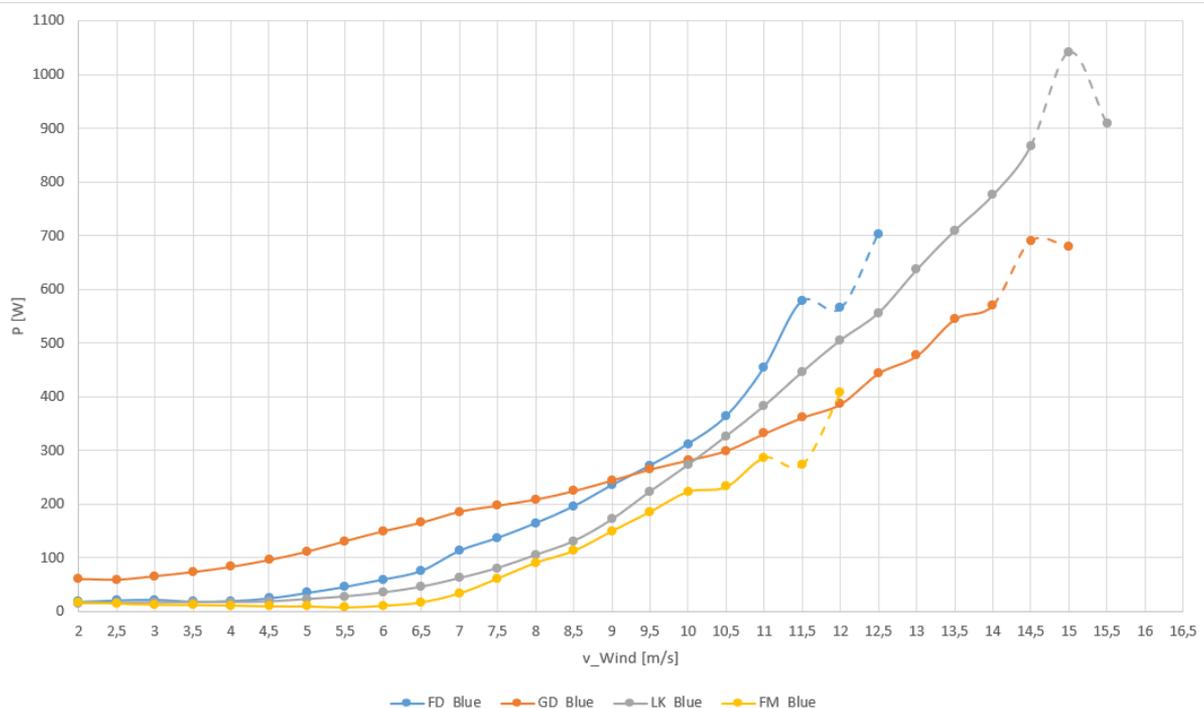


Abbildung 54: Leistungskennlinien BlueOne

Die am LK-Mast sowie die am freistehenden Mast gemessenen LK liegen erwartungsgemäß eng beisammen. Erst bei Windgeschwindigkeiten ab 9 m/s unterscheiden sich diese stärker. Als möglicher Grund dafür kann auch hier die geringe Datenbasis am freistehenden Mast bei höheren Windgeschwindigkeiten genannt werden.

Die vom Hersteller genannte Nennleistung von 1.000 Watt bei 13 m/s konnte bei keiner Montagart erreicht werden. Mit einer Leistung von ca. 700 bis 800 Watt liegt selbst die erzielte Leistung am Flachdach deutlich darunter.

Abbildung 54 zeigt den Verlauf des  $c_p$ -Wertes der KWEA BlueOne für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK). Die erzielten Wirkungsgrade im Bereich von 20 bis 25 % am Flachdach, am LK-Mast sowie am freistehenden Mast entsprechen in etwa den Literaturangaben. Auch hier ist im Kennliniendiagramm der  $c_p$ -Werte erkennbar, dass im Windgeschwindigkeitsbereich bis 3 m/s unrealistisch hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Als Grund dafür ist auch bei der BlueOne die Massenträgheit zu nennen.

Die hohen  $c_p$ -Werte am Giebeldach bis 6 m/s sind damit jedoch nicht zu erklären. Abbildung 54 zeigt deutlich, dass am Giebeldach erst ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 6 m/s das theoretische Maximum laut Betz (16/27) unterschritten wird. Hier ist eine fehlerhafte Messung nicht auszuschließen, die Daten sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Es ist anzunehmen, dass die am GD gemessene LK nicht das realistische Leistungsvermögen der Anlage zeigt.

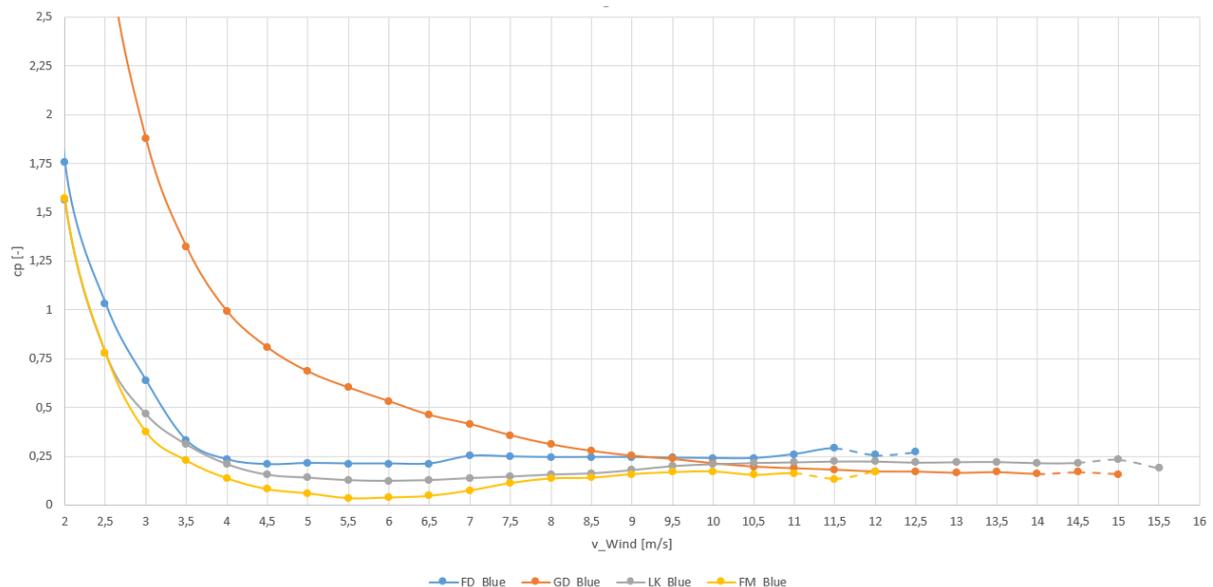


Abbildung 55:  $c_p$ -Kennlinien BlueOne

## Vertikon M

Abbildung 56 zeigt die in Anlehnung an die Norm erstellten Leistungskennlinien für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK) für die KWEA Vertikon M. Im Vergleich der LK zeigt sich der Einfluss der Montageart. Dieser verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Während die freistehend montierte KWEA bei einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s eine Leistung von ca. 350 W liefert, produziert dieselbe KWEA am Giebeldach ca. 800 W. Mit einer Leistung von ca. 600 W bei 10 m/s liegen die Messungen am Flachdach bzw. am Leistungskennlinienmast dazwischen.

Aufgrund der geringen Datenbasis am freistehenden Mast (18.06. bis 23.06.2020) ist jedoch fraglich, inwiefern diese Leistungskennlinie das reale Leistungsvermögen der KWEA abbildet – auch wenn die Datenbasis laut Norm ausreichend ist. Ein Blick auf die weiteren im Projekt untersuchten KWEA

verdeutlicht diesen Umstand, da die Leistungskennlinien am freistehenden Mast bzw. am LK-Mast in der Regel eng beisammen liegen.

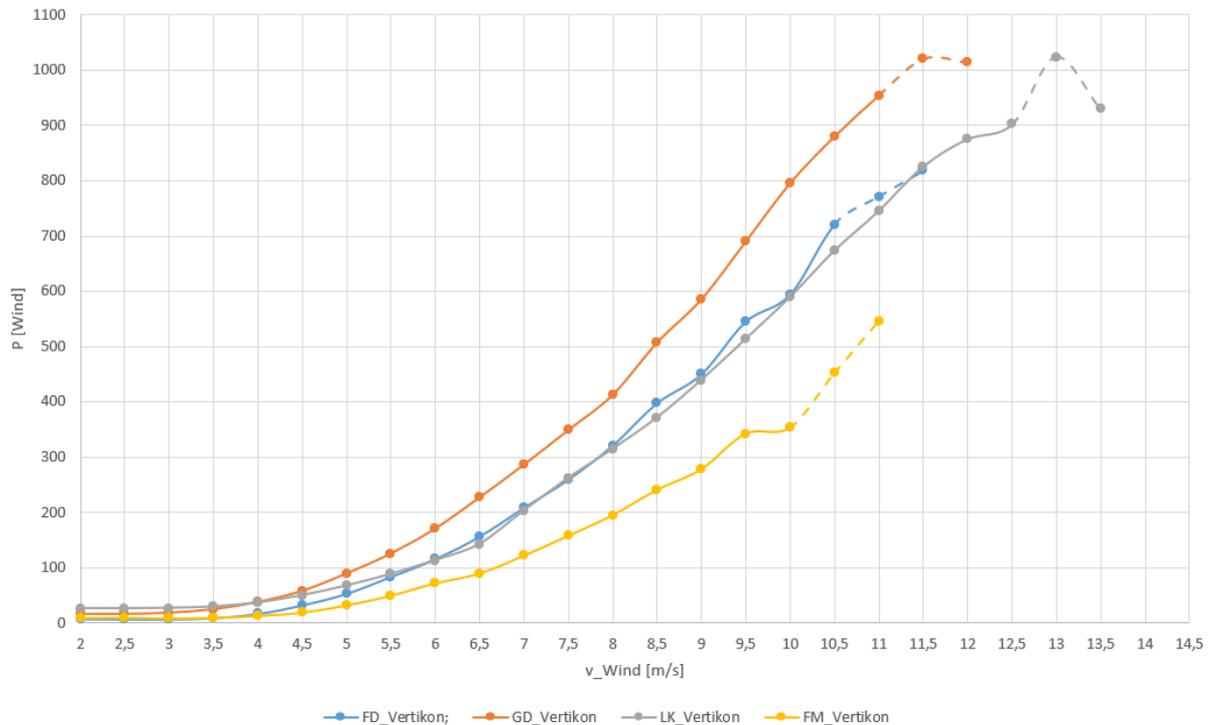


Abbildung 56: Leistungskennlinien Vertikon M

Ein Grund für die gute Performance der KWEA am Giebeldach könnte die Schrägströmung sein, die durch das Giebeldach verursacht wird. Hier führt das Giebeldach zu einer steileren Ablenkung des Windes, wobei die Turbulenzintensität im Nabenbereich dabei nur geringfügig höher ist als am Flachdach. Der Vergleich mit der Mantelturbine BlueOne verstärkt diese Vermutung, da die BlueOne aufgrund des Mantels Schräganströmung nicht bzw. nur bedingt nutzen kann. Der Einfluss des Giebeldachs bei der BlueOne ist folglich deutlich geringer als bei der Vertikon M.

Die Leistungskennlinie der Anlage am Flachdach gleicht im Wesentlichen der am LK-Mast gemessenen Kennlinie. Hier liegt der Schluss nahe, dass es aufgrund der Höhe des Masts zu keiner positiven oder negativen Beeinflussung der KWEA kommt.

Die vom Hersteller genannte Nennleistung von 950 Watt bei 11 m/s konnte nur am Giebeldach erreicht werden. Bei allen anderen Montageart liegt die erzielte Leistung bei 11 m/s deutlich darunter.

Im Zuge der Messungen wurde festgestellt, dass die KWEA häufig bereits ab 12 m/s abschaltet, obwohl die Abschaltgeschwindigkeit laut Hersteller bei 16 m/s liegt. Dies lässt auf ein zu frühes, wahrscheinlich unbeabsichtigtes Auslösen der Sicherungseinheit schließen, wodurch die Anlage oftmals unnötig gebremst bzw. abgeschaltet wird.

Abbildung 57 zeigt den Verlauf des  $c_p$ -Wertes der Anlage Vertikon M für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK). Die erzielten Wirkungsgrade im Bereich von 10 bis 25 % entsprechen in etwa den Literaturangaben.

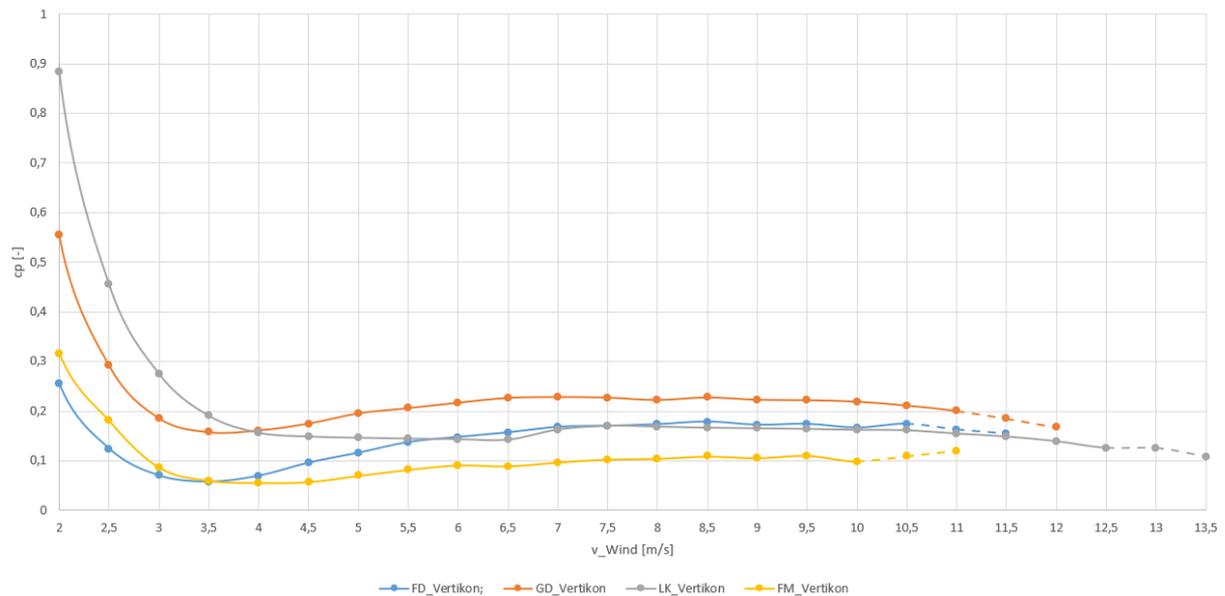


Abbildung 57: cp-Kennlinien Vertikon M

Im Kennliniendiagramm der cp-Werte ist erkennbar, dass im Windgeschwindigkeitsbereich bis 3 m/s unrealistisch hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Grund dafür ist die Massenträgheit der Anlage, sprich bei einem Rückgang der Windgeschwindigkeit dreht die KWEA aufgrund der Massenträgheit noch weiter und produziert weiterhin Energie.

### Superwind

Abbildung 58 zeigt die in Anlehnung an die Norm erstellten Leistungskennlinien für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK).

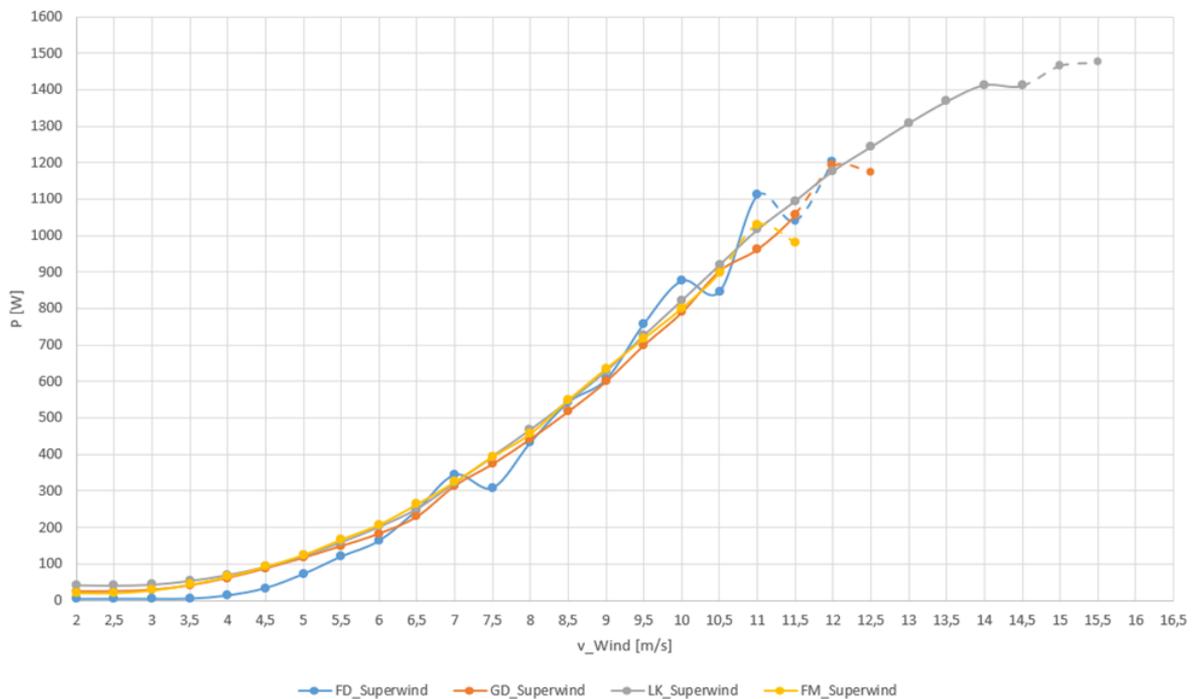


Abbildung 58: Leistungskennlinien Superwind

Anders als bei den KWEA Vertikon M und BlueOne liegen alle LK sehr eng beisammen. Nur bei der am FD gemessenen LK gibt es vereinzelt Abweichungen, die mit dem kurzen Messzeitraum begründet werden können. Die vom Hersteller genannte Nennleistung von 1.250 Watt bei 11,5 m/s konnte zwar bei keiner Montagart erreicht werden, jedoch liegen die gemessenen Leistungsdaten nur knapp darunter (zwischen 1.000 und 1.100 W).

Abbildung 59 zeigt den Verlauf des  $c_p$ -Wertes der KWEA Superwind 1250 für die Montagearten freistehend (FM), Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) sowie am Leistungskennlinienmast (LK). Die erzielten Wirkungsgrade im Bereich von 30 bis 35 % am Flachdach, am LK-Mast sowie am freistehenden Mast entsprechen in etwa den Literaturangaben. Auch hier ist im Kennliniendiagramm der  $c_p$ -Werte erkennbar, dass im Windgeschwindigkeitsbereich bis 4 m/s unrealistisch hohe Wirkungsgrade erzielt werden. Als Grund dafür ist auch hier die Massenträgheit zu nennen.

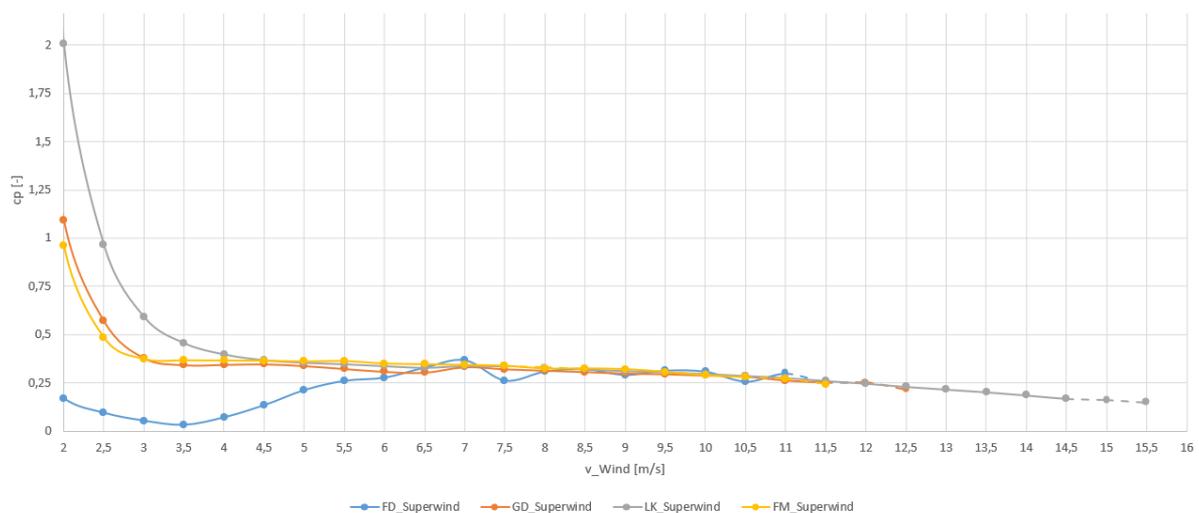


Abbildung 59:  $c_p$ -Kennlinien Superwind

## Venturicon

Abbildung 60 zeigt die in Anlehnung an die Norm erstellten Leistungskennlinien für die Montagearten Flachdach (FD) und Giebeldach (GD) für die KWEA Venturicon. Im Vergleich der LK zeigt sich der Einfluss der Montageart. Bis zu einer Windgeschwindigkeit von ca. 7,5 m/s weist die am Flachdach gemessene LK die höchsten Leistungen auf, fällt dann jedoch bei höheren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur am Giebeldach gemessenen Kennlinie ab. An Standorten mit geringen Windgeschwindigkeiten wäre daher eine Montage auf einem Flachdach zu empfehlen, während an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten dem Giebeldach der Vorzug zu geben ist.

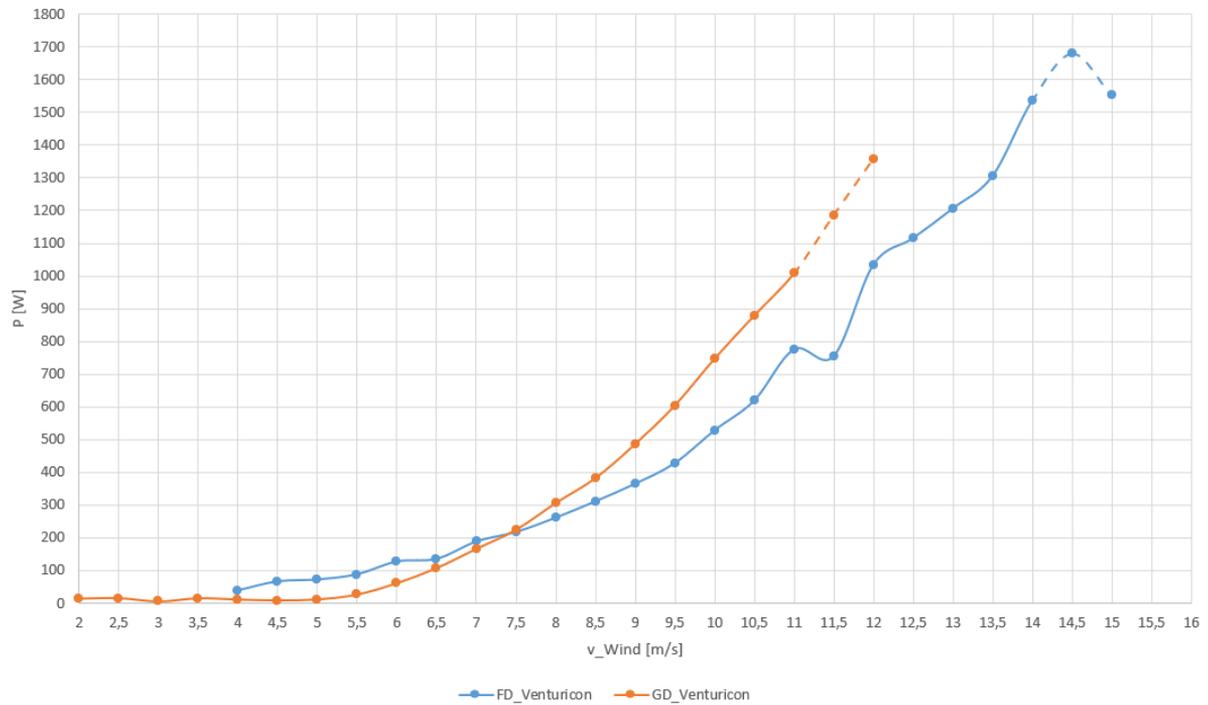


Abbildung 60: Leistungskennlinien Venturicon

Die vom Hersteller genannte Nennleistung von 1.150 Watt konnte am Giebeldach bei 11,5 m/s und am Flachdach bei ca. 13 m/s erreicht werden.

Abbildung 61 zeigt den Verlauf des cp-Wertes der KWEA Venturicon für die Montagearten Flachdach (FD) und Giebeldach (GD). Die erzielten Wirkungsgrade im Bereich von 25 bis 40 % entsprechen in etwa den Literaturangaben.

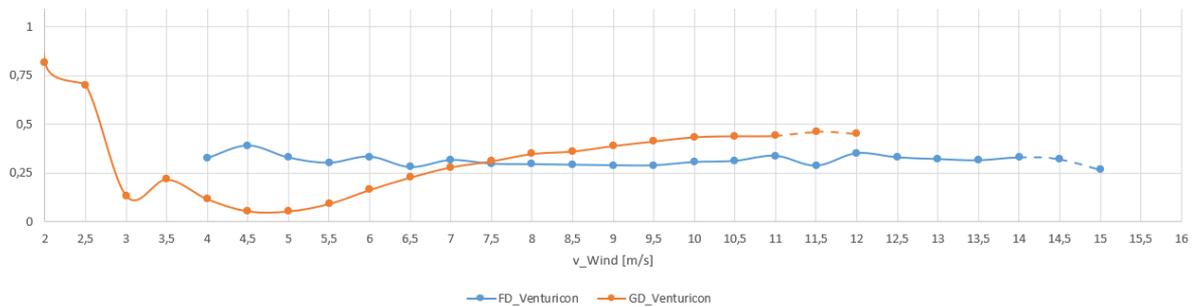


Abbildung 61: cp-Kennlinien Venturicon

## 7.5. Schall- und Infraschallmessung

Werden KWEA in der Umgebung von Wohnbauten aufgestellt, muss nachgewiesen werden, dass die angeführten Grenzwerte nicht überschritten werden. Um die gültigen Immissionsgrenzwerte einzuhalten, sind - je nach KWEA - Abstände zu bewohnten Objekten von 30 bis 100 m erforderlich - Distanzen, die in Wohngebieten oftmals nicht umsetzbar sind. Darüber hinaus zeigen weiterführende Untersuchungen, dass Turbulenzen eine Schwankung des immissionsrelevanten Schallleistungspegels um bis zu 2,2 dB verursachen können. Das bedeutet, dass an einem Standort mit hoher Turbulenzintensität - wie z. B. in der Stadt - der gemessene Schallleistungspegel in einzelnen Windgeschwindigkeitsklassen um bis zu 2,2 dB höher sein kann als an einem Standort mit niedriger Turbulenzintensität (Niederhofer 2016). Auf Basis dieses Ergebnisses ist eine Erweiterung der bestehenden Norm hinsichtlich der Einführung weiterer Kennzahlen wie z. B. turbulenzinduzierte Schallemissionen zur überdenken.

Im Zuge der Untersuchungen im Projekt SmallWindPower@Home wurden die Schallemissionen am freien Feld und Schallimmissionen in Gebäuden messtechnisch ermittelt. Ziel ist es, darüber Aufschluss zu geben, ob Grenzwerte außerhalb und innerhalb von Gebäuden überschritten werden bzw. unter welchen Umständen Installationen auf Gebäuden aus genehmigungstechnischer Sicht durchführbar sind. Die Ergebnisse werden für jede der untersuchten KWEA dargestellt. Im Detail werden folgende Ziele verfolgt:

### Messung am freien Feld:

- Ermittlung der Schallimmissionen am freien Feld, der KWEA
  - o 3.ZERO Windturbine, Vertikon M, Superwind, Bluepower
- Auswertung der Schallemissionen als Schallimmissionskarte
- Bewertung der tonalen Wahrnehmbarkeit

### Messung im Gebäude:

- Messung von Schall- und Infraschallimmissionen im Gebäude, der KWEA
  - o 3.ZERO Windturbine, Vertikon M, Superwind, Bluepower
- Bewertung des Schalldruckpegels (inklusive Infraschall)

### Bewertung:

- Ergebnisvergleich mit Grenzwerten nach ÖNORM S 5021 Teil 1

#### 7.5.1. Methode

Die Vermessung der KWEA am freien Feld erfolgt größtenteils nach den Vorgaben der gültigen Norm EN 61400-11. Hierfür werden zwei vor Messbeginn kalibrierte Mikrophone eingesetzt. Diese werden in den vorgegebenen Abständen installiert und jeweils eine Schalldruckpegelmessung der KWEA und der Fremdgeräusche (abgeschaltete KWEA) durchgeführt. Die Windmessung erfolgt mittels eines Ultraschallanemometer in 11,5 m Höhe. Fremdgeräusche (Autos, Flugzeug, etc.) werden mit Hilfe der Referenzmessung identifiziert und aus der Messung ausgeschlossen. Die Umrechnung des Schalldrucks in den A-bewerteten Schalldruckpegel erfolgt mit der von DEWETRON bereitgestellten Software. Weitere Berechnungen erfolgen nach den Vorgaben der Norm EN 61400-11 mit Hilfe von numerischen

Berechnungsprogrammen. Bei den Freifeldmessungen beschränkt sich der Frequenzbereich auf den hörbaren Bereich zwischen 20 Hz und 20 kHz. Im Gebäude wird unter 20 Hz und bis 20 kHz gemessen mit Hilfe desselben Mikrophons in mind. 1 m Höhe und 1 m Abstand von Resonanzflächen wie Wänden. Da für die Gebäudemessung in Verbindung mit KWEA keine Normen vorhanden sind, ist ein eigenes Messkonzept entwickelt worden. Die Windgeschwindigkeit wird bei den Schallemissionen vor dem Gebäude in Windrichtung gemessen und den von der KWEA induzierten Immissionen zugeordnet.

In beiden Fällen wird mit der Messausrüstung der Firma DEWETRON und zugehöriger Software gearbeitet.

### 7.5.2. Ergebnisse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Kleinwindkraftanlagen ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit den Grenzwert für Wohngebiete in der Nacht von 40 dBA in ländlichen und 45 dBA in städtischen Wohngebieten überschreiten. Der Abstand für den Vergleich der Anlagen ist in Abbildung 62 zu sehen, wobei alle Anlagen auf einen Abstand von 20 m genormt wurden. Es ist zu erkennen, dass alle KWEA bis zu einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s unter dem Schallgrenzwert von 45 dBA liegen. Ab einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s überschreitet die KWEA Venturicon den Grenzwert und ab 8 m/s überschreiten die KWEA Superwind und Bluepower ebenfalls diesen. Insgesamt weist bei höheren Windgeschwindigkeiten die KWEA Superwind den geringsten Schalldruckpegel auf. Die KWEA Vertikon konnte aufgrund eines Ausfalls nicht bewertet werden und ist symbolisch in die Graphik eingebunden.

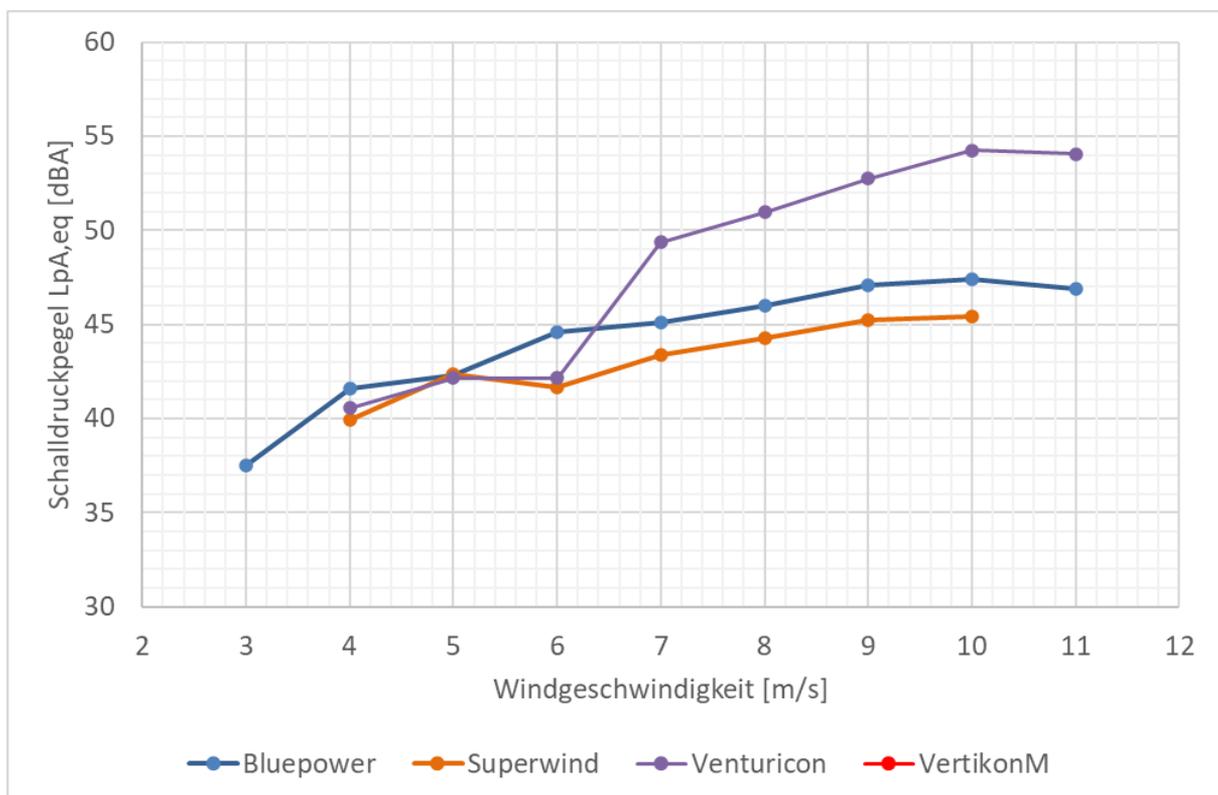


Abbildung 62: Vergleich des Schalldruckpegels bei 20 m Entfernung

In Abbildung 63 wird der energetische Mittelwert der Schallemission in den Gebäuden der verschiedenen KWEA verglichen, dieser teilt sich in Infraschall (unter 20Hz) und für den Menschen

hörbaren akustischen Schall (20 Hz bis 20 kHz) auf. Es ist zu erkennen, dass die KWEA Vertikon M mit 85 dBA den höchsten energetischen Mittelwert aufweist. Der Infraschall macht hierbei 20 % des gesamten energetischen Mittelwertes aus. Die KWEA Superwind besitzt mit 54 dBA und einem Infraschallanteil von 8 % den geringsten energetischen Mittelwert.

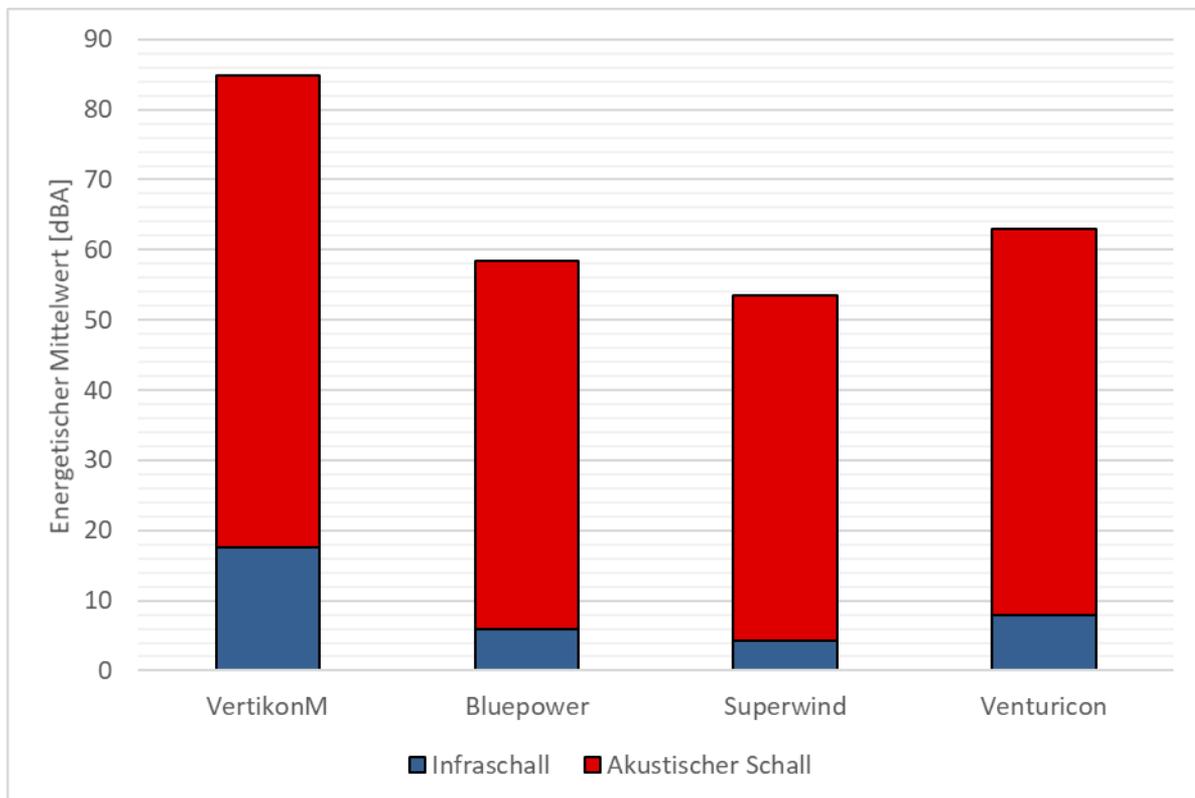


Abbildung 63: Energetischer Mittelwert Infraschall & akustischer Schall in Gebäuden

## 7.6. Vibrations- und Schwingungsmessung

KWEA verursachen im Betrieb Vibrationen und Schwingungen, welche eine erhöhte Belastung für sämtliche Komponenten als auch für das Tragwerk darstellen können. Bei der Auslegung und Genehmigung von KWEA werden diese Auswirkungen von Vibrationen und Schwingungen oft vernachlässigt und keine Maßnahmen zu deren Eindämmung eingefordert. Untersuchungen aus dem Energieforschungspark Lichtenegg der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass Resonanzschwingungen, eine Überlastung der Anlagenkomponenten bzw. des Tragwerks verursachen können. In Extremfällen können diese im Dauerbetrieb zu Materialermüdung, Rissen und Dauerbrüchen im Tragwerk oder dem Gebäude führen, welche neben einem erheblichen Sachschaden auch eine Gefahr darstellen können.

### 7.6.1. Methode

Um ein tiefgehendes Verständnis für die Entstehung von Schwingungen und Vibrationen von KWEA und deren Auswirkungen zu erhalten, wurden im Rahmen des Projekts mehrere KWEA-Typen unter realen Bedingungen im Energieforschungspark Lichtenegg betrieben und dabei Schwingungen und Vibrationen messtechnisch erfasst. Die Anlagen wurden dabei jeweils auf einem freistehenden Mast,

einem Gebäude mit Flachdach und einem Gebäude mit Giebeldach installiert und vermessen. Bei der Gestaltung und Auslegung des Tragwerks als auch der Anbindung an die Gebäude wurden dabei die jeweiligen Anforderungen der Anlagen berücksichtigt. Für die Bewertung des Schwingungsverhaltens der Anlagen auf den jeweiligen Installationen wurden Ordnungsanalysen für jede Konstellation erstellt und gegenübergestellt.

## 7.6.2. Ergebnisse

Anhand der durchgeführten Ordnungsanalysen konnten die Schwingungsanteile ihren jeweiligen Ursachen zugeordnet und so ein tiefgründiges Verständnis für die Entstehung und Auswirkung von Schwingungen gewonnen werden. Anhand der Ordnungsanalyse der KWEA Vertikon M in Abbildung 64 wird im Folgenden beispielhaft die Entstehung von Schwingungen analysiert. Eigenformen des Systems sind dabei in Schwarz dargestellt, Ordnungsschwingungen in Rot.

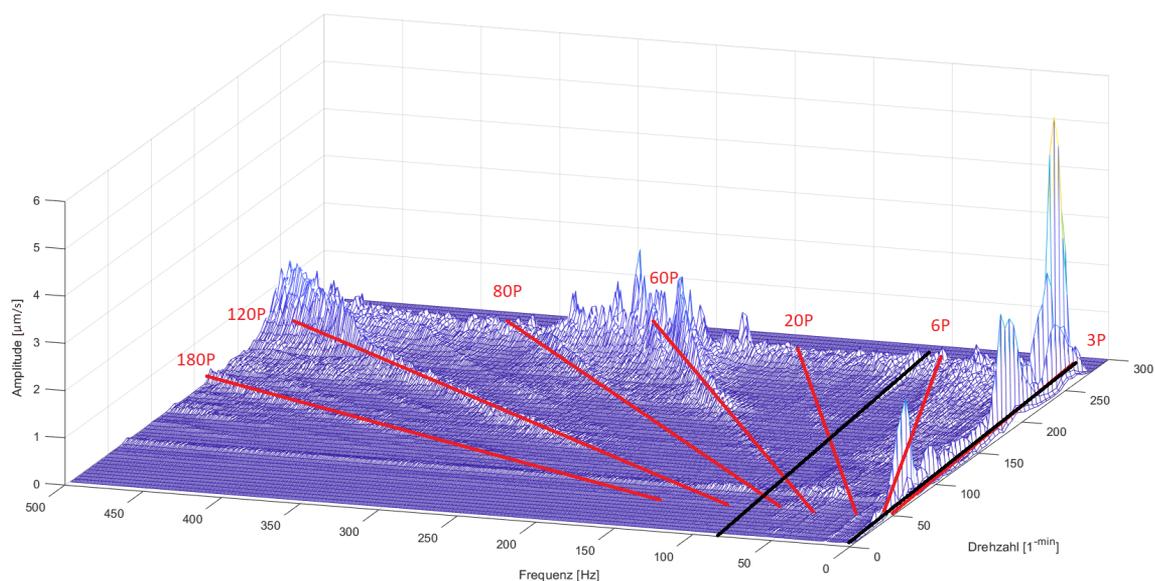


Abbildung 64: Ordnungsanalyse der Vertikon M Basis am Giebeldach

Bei der KWEA Vertikon lassen sich die Ordnungsschwingungen klar unterteilen in mechanisch angeregte Schwingungen und Schwingungen, welche durch elektromechanische Wechselwirkungen des Generators angeregt werden. Anhand des Aufbaus des Generators ergibt sich eine Polpassierfrequenz welche der 20-fachen Rotordrehzahl (20P) entspricht. Da der 3-phasige Generator mit drei Magnetscheiben, welche jeweils zueinander verdreht sind, aufgebaut ist, ergibt sich aus diesem Zusammenhang die 60. Ordnungsschwingung und ganzzahlige Vielfache davon.

Die Schwingungen 1., 3. und 6. Ordnung, lassen sich hingegen auf aerodynamische Effekte im Rotor und mechanische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Flügeln erklären. Die Schwingungen 1. Ordnung lassen sich auf eine Unwucht des Rotors zurückführen. Da die Anlage jedoch einen vergleichsweise niedrigen Drehzahlbereich durchläuft, verursacht die Unwucht des Rotors, trotz der vergleichsweise hohen Masse, keine signifikanten Schwingungsanteile. Die Schwingungen 3. und 6. Ordnung lassen sich auf mechanische Wechselwirkungen zwischen den Rotorflügeln zurückführen, welche durch die Helix-Bauform der Anlage verursacht werden.

Anhand der erfassten Messergebnisse kann zusammenfassend festgestellt werden, dass aerodynamische Effekte und damit auch die Dachform eines Gebäudes eine untergeordnete Rolle bei der Entstehung von Schwingungen spielen. Wesentlich ausschlaggebender für einen schwingungsarmen und sicheren Dauerbetrieb einer KWEA ist die dynamische Auslegung des Tragwerks und die Vermeidung von Resonanzen im oberen Drehzahlbereich. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Ausbreitung von kritischen Schwingungen und Vibrationen ist die Eigendämpfung des Tragwerks bzw. der Einsatz zusätzlicher Dämpfungselemente oder Entkoppler. Treten Resonanzen in einem Tragwerk mit geringer Dämpfung im oberen Drehzahlbereich und bei hohen Windgeschwindigkeiten auf, so kommt es zu überhöhten Schwingungen. Die Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Maßnahmen und mit der Auswahl hochwertiger und schwingungsarmer Anlagen, ein zuverlässiger und störungsfreier Betrieb von gebäudemontierten KWEA möglich ist. Tendenziell kann aus den Messergebnissen abgeleitet werden, dass KWEA mit vertikaler Rotationsachse zu höheren Schwingungen neigen.

Da sich die absoluten Beschleunigungswerte in Abhängigkeit von Größe, Form und Material des jeweiligen Elements stark unterscheiden können, ist es kaum möglich, Grenzwerte für Schwingungen einzuführen. Um den angesprochenen Fehlerursachen entgegenzuwirken, werden drei Gegenmaßnahmen vorgeschlagen, welche beim Design, der Planung und der praktischen Umsetzung von KWEA zu berücksichtigen sind.

1. Es wird vorgeschlagen, einen Mindestwert für die strukturelle Dämpfung des Gesamtsystems, bestehend aus KWEA und Mastsystem, einzuhalten. Dieser sollte sich bestenfalls in einem Bereich zwischen 10 % und 20 % befinden, um das Ausmaß der Schwingungen in Grenzen zu halten. Wird dieser Wert nicht erreicht, so können schwingungsmindernde Dämpfungselemente (z.B. Schwingungsentkoppler) eingesetzt werden, um die Dämpfung des Systems zu erhöhen.
2. Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung von destruktiven Schwingungen von KWEA besteht darin, die Eigenfrequenzen nicht im oberen Drehzahlbereich der Anlage zwischen 70 % und 100 % der Nenndrehzahl anzuregen. Dies wird üblicherweise als über- bzw. unterkritischer Betrieb bezeichnet. Durch diese Maßnahme wird verhindert, dass Resonanzen dann angeregt werden, wenn hohe Windgeschwindigkeiten und damit hohe anregende Kräfte vorherrschen.
3. Ist dies nicht möglich, wird eine aktive Anpassung der Steuerkennlinie vorgeschlagen, sodass kritische Drehzahlbereiche schnell durchlaufen werden und Resonanzen sich nicht aufschwingen können. Dabei ist zu beachten, dass separate Mechanismen bei Beschleunigung und Abbremsen der Anlage zu verwenden sind, um zu verhindern, dass der Rotor in einer gewissen Drehzahl stecken bleibt. Um kritische Drehzahlbereiche und etwaige Resonanzen während der Prüfung der KWEA zu identifizieren, wird ein Campbell-Diagramm der Anlage über den gesamten Betriebsbereich der Anlage erstellt und auf die zuvor erwähnten Kriterien untersucht.

## **7.7. Power Quality Messungen**

Jede Erzeugungsanlage hat während deren Betrieb einen Einfluss auf die Netzqualität, was bezüglich der Endnutzer aber auch im Netz zu Problemen im Betrieb führen kann. Daher gibt es allgemeine genormte Grenzwerte für beispielsweise Oberschwingungen, Flicker und Spannungseinbrüche im Netz. Speziell für Windkraftanlagen gibt die Norm EN 61400-21 Messverfahren vor, mit denen die

charakteristischen Netzparameter bestimmt werden können (EN 61400-21). Öffentliche Netze sind grundsätzlich vor störenden Einwirkungen zu schützen. Windkraftanlagen stellen jedoch aufgrund des variablen Betriebs, Schwankungen bei Leistung sowie Frequenz eine Störquelle für das Stromnetz dar.

Speziell schwankende Windgeschwindigkeiten, können die Leistungsabgabe und damit Schwankungen der eingespeisten Spannung hervorrufen. Da die Netzverträglichkeit der im Projekt SmallWindPower@Home untersuchten Anlagen nicht geklärt ist, soll diese messtechnisch festgestellt werden. Dabei wird im Detail auf Oberschwingungen, Flicker und Spannungsänderungen, verursacht durch die Anlagen eingegangen. Zusammengefasst werden folgende Ziele verfolgt:

- Die Netzverträglichkeit von folgenden Anlagen auf einem Gebäude wird im Betrieb untersucht:
  - o Vertikon M, Superwind, BlueOne, 3.ZERO Windturbine
- Es werden folgende Parameter auf Überschreitung der Grenzwerte untersucht:
  - o Spannungsänderungen
  - o Oberschwingungen
  - o Flicker

### **7.7.1. Methode**

Die Vermessung der Netzverträglichkeit der KWEA (Superwind, BlueOne, Superwind, 3.ZERO Windturbine) erfolgt zwischen Netzanschlusspunkt und Wechselrichter. Für die Ermittlung der erforderlichen Daten wie Spannung U und Strom I auf drei oder einer Phase (anlagenabhängig) wird Messinfrastruktur der Firma DEWETRON genutzt. Des Weiteren werden die Windgeschwindigkeit und Drehzahl der Anlagen, welche auf Gebäuden im Energieforschungspark Lichtenegg installiert sind, gemessen. Für die Spannungsmessung wird über Klemmen parallel zwischen Phase und Neutralleiter direkt über den DEWETRON-Datenlogger die Spannung gemessen. Die Drehzahl wird als Rechtecksignal von einer Phase des Generators gemessen, die Windgeschwindigkeit kann von bereits vorinstallierten Anemometern als Signal gemessen werden.

Die Auswertung spezifischer Kennwerte wie Flicker, Unter- und Überspannung sowie Oberwellen erfolgt in der DEWETRON Messsoftware und in Matlab. Mittels dieser Ergebnisse können Aussagen über den Einfluss von Kleinwindkraftanlagen auf die Netzqualität gemacht werden.

### **7.7.2. Ergebnisse**

Alle untersuchten Kleinwindenergieanlagen (KWEA) weisen eine Nennleistung von weniger als 1,5 kW und haben eine eiphasige Netzeinspeisung. Dabei haben alle vier Anlagen die Netzspannung von 230 V während der Einspeisung angehoben, jedoch nicht den Grenzwert von 3,3% überschritten (siehe Tabelle 17). Gleichermaßen wurde die Netzfrequenz um nicht mehr als 1 Hz gesenkt bzw. angehoben. Somit erfüllen alle Anlagen in Bezug auf Spannung und Frequenz die Vorgaben für einen netzkonformen Betrieb. Unsicherheiten ergeben sich jedoch bei der KWEA Vertikon M, da diese nur bis 50% der Nennleistung betrieben werden konnte.

Tabelle 17: Zusammenfassung maximale Frequenz- und Spannungsabweichung

	<b>Bluepower</b>	<b>Superwind</b>	<b>Venturicon</b>	<b>Vertikon M</b>
Spannung	1,41%	1,33%	2,71%	3,18%
Frequenz	0,07%	0,1%	0,07%	0,08%

Bezogen auf den Kurzzeitflicker überschreitet keine der Anlagen den Grenzwert 1 (siehe Abbildung 65). Die Anlagen Superwind, Bluepower und Vertikon M weisen Flickerwerte von 0,1 oder deutlich darunter in allen WindBINs auf. Die KWEA Venturicon weist erhöhte Werte von 0,4 auf, jedoch noch immer weit vom Grenzwert entfernt. Die Grenzwerte für geradzahlige und ungeradzahlige harmonische Oberschwingungsströme werden von keiner der untersuchten Anlagen überschritten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass alle untersuchten Anlagen als netzverträglich eingestuft werden können.

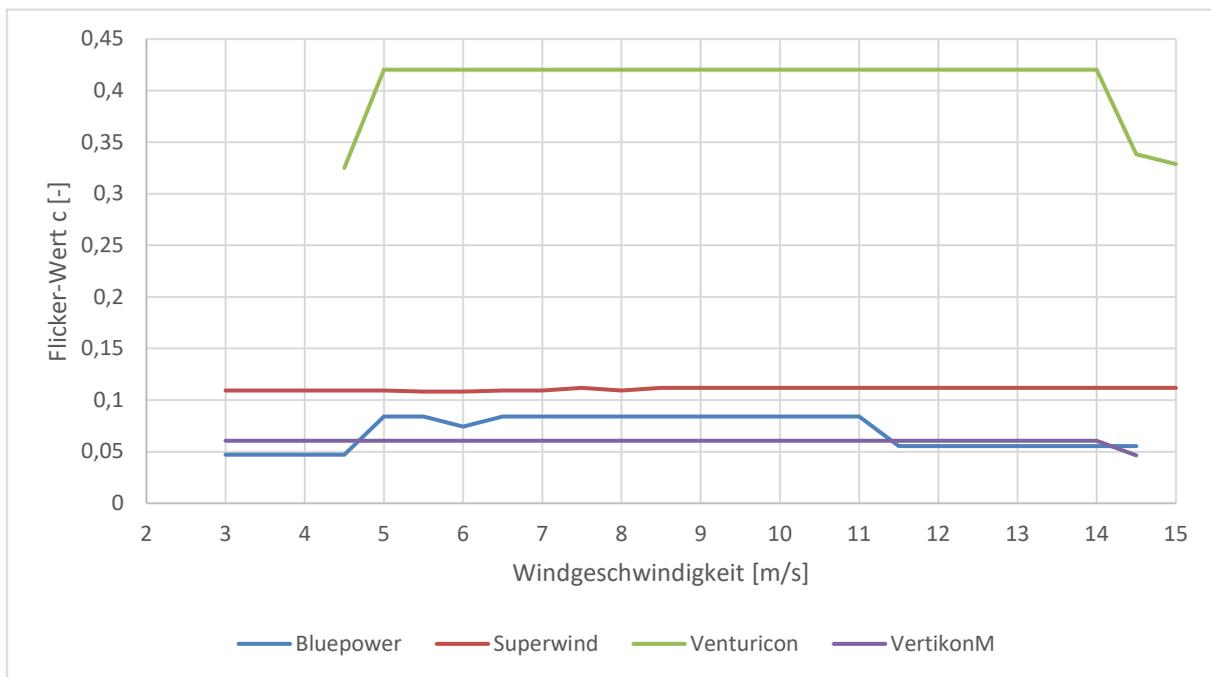


Abbildung 65: Flicker-Werte der untersuchten KWEA

# 8 Umweltwirkungen von KWEA

Das folgende Kapitel führt die Ergebnisse von Klimabilanz und Technikfolgenabschätzung der beschriebenen Anwendungsfälle zusammen.

Das Ziel war es, die Auswirkungen der Kleinwindkraft auf Betroffene und Umwelt aufzuzeigen und auf dieser Basis Empfehlungen zur Vermeidung negativer Auswirkungen zu entwickeln. Dazu waren folgende Schritte notwendig:

- Bewertung der Umweltwirkungen der untersuchten KWEA und deren Montagearten durch
  - Erhebung der Stoff- und Energieströme für die untersuchten KWEA
  - Durchführung einer LCA zur Ermittlung ausgewählter Ökopoteniale (z.B. Klimapotenzial, Flächenverbrauch, Rohstoffeinsatz, Kumulierter Energieaufwand)
- Erhebung zusätzlicher Auswirkungen (z. B. Diskoeffekt) auf die Umwelt bzw. die betroffenen Akteur:innen (z. B. Anrainer:innen, Anlagenbetreiber:innen)
  - Interdisziplinäre Bewertung dieser Auswirkungen
- Grafische Darstellung der Ergebnisse als Basis für Empfehlungen und weitere Untersuchungen

## 8.1. Methoden

Um die Auswirkungen von KWEA unter verschiedenen Rahmenbedingungen besser abschätzen und vergleichen zu können, wurden für vier KWEA mit jeweils drei unterschiedlichen Befestigungssystemen, montiert auf zwei unterschiedlichen Dachformen – Flach- und Giebeldach – sowie auf einem freistehenden Mast, folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Darstellung der Klimabilanz der KWEA und deren Montagarten
- Ermittlung der energetischen Amortisationsdauer
- Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer
- Ermittlung von Kritikalität und Toxizität eingesetzter Stoffe sowie Einsatz von Konfliktrohstoffen
- Umfassende Technikfolgenabschätzung anhand eines Kriterienkatalogs

Bei der Untersuchung folgender Anlagen waren Einschränkungen zu beachten:

KWEA Venturicon: es liegen keine gemessenen Betriebsdaten unter Montage auf dem freistehenden Mast vor. Die Abschätzung der Umweltauswirkung umfasst bei dieser KWEA daher nur den Betrieb auf Flach- und Giebeldachmast.

### 8.1.1. Klimabilanz

Die Methode der Klimabilanz (life cycle assessment, LCA) ermöglicht eine Bewertung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und dessen potenzieller Umweltauswirkungen im Verlauf seines Lebenszyklus.

Nach ISO 14044 (ISO 14044:2006 2018) beinhaltet die Erstellung einer Klimabilanz, dargestellt in Abbildung 66, folgende vier Schritte:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
2. Erstellen der Sachbilanz,
3. Durchführung der Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung und Interpretation.

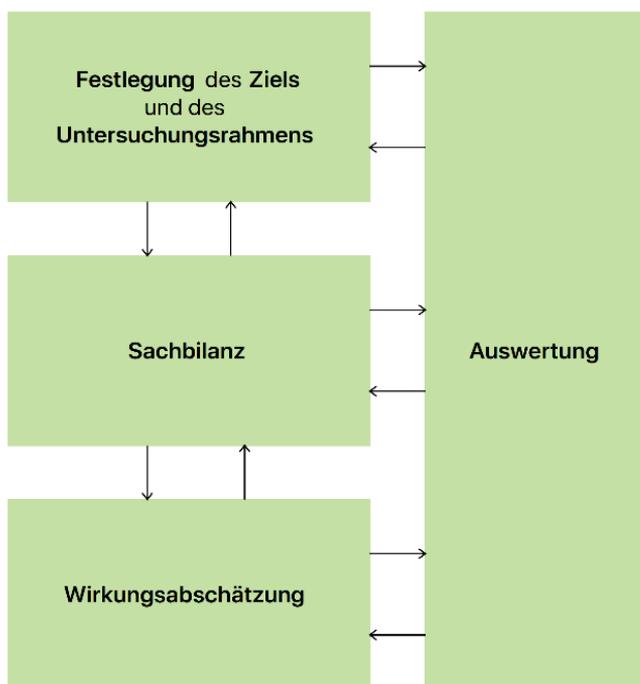


Abbildung 66: Vier Schritte der Klimabilanz nach ISO 14044:2006

#### **Schritt 1: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**

Eine Klimabilanz wird ihrem Ziel entsprechend modelliert. Bei der Definition des Zieles sollen die Fragen nach

- Anwendungsbereich (Was wird untersucht?),
- Erkenntnisinteresse (Warum wird die Klimabilanz durchgeführt?),
- Zielgruppe (Für wen wird die Klimabilanz durchgeführt?),
- Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit (Sind vergleichbare Aussagen vorgesehen?)

beantwortet werden.

Neben der Zieldefinition müssen sowohl das Produktsystem als auch die technischen, geografischen und zeitlichen Systemgrenzen eindeutig beschrieben werden. Zur Beschreibung des Produktsystems

eignet sich die grafische Darstellung in einem Systemfließbild, das eine Beschreibung der einzelnen Prozessmodule und deren Wechselbeziehungen enthält.

Die Festlegung der technischen Systemgrenzen dient zur Abgrenzung derjenigen Stoff- und Energieströme, die in der Sachbilanz berücksichtigt bzw. nicht berücksichtigt werden. Zusammenfassend gilt, dass Stoff- und Energieströme, deren Masse- und Energieanteil weniger als 1 % beträgt, keine Berücksichtigung finden müssen. Um zu verhindern, dass toxische Stoffe oder Emissionen aufgrund ihres geringen Masse- oder Energieanteils vernachlässigt werden, ist die Umweltrelevanz der Stoff- oder Energieströme zu überprüfen. Zur Festlegung der geografischen Systemgrenzen wird die Herkunft der Stoff- und Energieströme herangezogen, die zeitliche Systemgrenze bezieht sich zumeist auf einen Bezugszeitraum zur Datenerhebung.

Bei einer Klimabilanz werden Produktsysteme mit vergleichbarem Nutzen bewertet. Beschrieben wird dieser vergleichbare Nutzen durch eine zu definierende Bezugsgröße, der funktionellen Einheit.

Abschließend werden die für die Klimabilanz anzuwenden Wirkungskategorien festgelegt. Innerhalb einer Wirkungskategorie werden für die Studie relevante Umweltthemen repräsentiert, denen Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können.

Im vorliegenden Projekt wurde folgender Rahmen festgelegt:

**Zieldefinition:** Die Ergebnisse der Klimabilanz richten sich an zukünftige Betreiber:innen von KWEA, hier in erster Linie an Besitzer:innen von Ein- und Mehrfamilienhäusern, aber auch Gewerbetreibende, Bewohner:innen von Gebäuden mit KWEA sowie deren Umgebung, Hersteller:innen, Planer:innen und Errichter:innen, Behörden, öffentliche Förderstellen und Entscheidungsträger:innen.

**Produktsystem:** Für die an den KWEA Superwind 1250 Bluepower BlueOne, Vertikon M/Basis und Venturicon durchgeführten Klimabilanzen wurde eine Analyse beginnend mit dem Rohstoffabbau bis zum Ende der Nutzungsphase (ohne Demontage) durchgeführt (siehe Abbildung 67). Die Wahl dieses Mittelwegs zwischen den beiden Bilanzierungsrahmen ‚cradle to gate‘ (Wiege bis Werkstor) und ‚cradle to grave‘ (Wiege bis zur Bahre) liegt darin begründet, dass Recyclingverfahren und Daten zu Anteilen von recycelbaren Materialien noch nicht etabliert sind.



Abbildung 67: Gewählte Systemgrenze für den Lebenszyklus der KWEA, adaptiert nach Klöpffer und Grahl (2009)

Um die Aktualität der für die Untersuchung verwendeten Daten sicherzustellen, wurden ausschließlich Daten ab dem Jahr 2010 genutzt.

Die Lebensdauer von KWEA schwankt abhängig von Parametern wie Produktqualität, Standort und Wartung zwischen 10 und 20 Jahren (Verbraucherzentrale NRW 2017). Die Lebensdauer der untersuchten KWEA wurde, da seitens des Betriebs durch die ZAMG bzw. die FH Technikum Wien von einer ordnungsgemäßen Wartung ausgegangen werden kann, mit 20 Jahren festgelegt.

Die Herstellung der Bestandteile der untersuchten KWEA erfolgt weltweit. Daraus ergab sich die Betrachtung der weltweiten geografischen Systemgrenze.

Der Nutzen von KWEA entsteht in der Bereitstellung von elektrischer Energie, daher wurde als funktionelle Einheit eine kWh erzeugte elektrische Energie festgelegt.

Die Wirkungsabschätzung erfolgte in der Wirkungskategorie ‚Treibhauseffekt‘ (QWP<sub>100</sub>) unter Ergänzung der Kennzahl ‚Kumulierter Energieverbrauch (KEA)‘.

Tabelle 18 zeigt die für die Klimabilanz festgelegten Rahmenbedingungen.

Tabelle 18: Life Cycle Analysis (LCA) – KWEA

<b>Ziel und Untersuchungsrahmen</b>	Darstellung der energetischen und CO <sub>2</sub> -Amortisation von vier KWEA über deren Lebenszyklus hinweg, Montage auf Flachdach, Giebeldach und freistehendem Mast
<b>Systemgrenzen</b>	Rohstoffabbau bis Ende der Nutzungsphase (ohne Demontage)
<b>Wirkungskategorie</b>	GWP <sub>100</sub> , kumulierter Energieaufwand
<b>Funktionelle Einheit</b>	kWh erzeugte elektrische Energie
<b>Geografische Systemgrenzen</b>	Weltweit
<b>Zeitliche Systemgrenzen</b>	Daten nicht älter als aus dem Jahr 2010 Lebensdauer KWEA: 20Jahre

## **2. Erstellen der Sachbilanz**

Auf Basis des Untersuchungsrahmens werden für die Sachbilanz alle Ressourcenverbräuche (Inputs) und kumulierten Emissionen (Outputs) innerhalb der festgelegten Systemgrenzen erfasst.

Aufbauend auf dem bereits identifizierten Systemfließbild bzw. dessen Prozessmodulen wird hierzu eine oftmals vereinfachte Systemanalyse der relevanten Stoff- und Energieströme erstellt. Für jedes Prozessmodul werden in einem weiteren Schritt Inputs und Outputs genauer spezifiziert. Die Verwendung von Klimabilanzdatenbanken (z. B. ecoinvent) erleichtert die Datenerhebung für das Erstellen der Sachbilanz.

Für die vorliegende Sachbilanz wurden Angaben von Herstellern, eigene Messdaten, fundierte Schätzungen und Daten aus der Datenbank ecoinvent (Version 2.2) verwendet.

### **Schritt 3: Durchführung der Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzung dient dem Erfassen und Beurteilen von potenziellen Umweltwirkungen des Produktsystems. Basis hierzu stellen die in der Sachbilanz identifizierten Ergebnisse als Umwelteinflüsse dar, aus denen die potenziellen Umweltwirkungen abgeleitet werden.

Folgende Bestandteile müssen in der Wirkungsabschätzung enthalten sein:

- Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu ausgewählten Wirkungskategorien
- Berechnung der Wirkungsindikatorwerte.

Für die Wirkungsabschätzung wurde das Ökobilanztool openLCA (Version 1.4.2 und Version 1.10.3) verwendet.

#### **Schritt 4: Auswertung und Interpretation**

In diesem letzten Schritt der Klimabilanz erfolgen Auswertung und Interpretation der Ergebnisse in Übereinstimmung mit der Zieldefinition und mit dem Untersuchungsrahmen.

Signifikante Parameter werden auf Basis der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung identifiziert. Des Weiteren beinhaltet dieser Schritt eine Beurteilung, die Sensitivitäts-, Vollständigkeits- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt.

Ziele der Auswertung und Interpretation sind das Ziehen von Schlussfolgerungen, das Identifizieren von Einschränkungen sowie das Ableiten von Empfehlungen für die angesprochene Zielgruppe.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Klimabilanz erfolgte die Ermittlung der energetischen Amortisation sowie der CO<sub>2</sub>-Amortisation, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

- **Energetische Amortisation:** Die energetische Amortisation wird von einer Anlage dann erreicht, wenn die energetische Amortisationszeit innerhalb der Lebensdauer der Anlage liegt. Als energetische Amortisationszeit (engl. payback-time) wird diejenige Zeit bezeichnet, die ein System benötigt, um die Energie selbst zu erzeugen, die für dessen Herstellung notwendig war (Heier 2009). Die Berechnung erfolgt über die Division des kumulierten Energieaufwandes durch die monatlich oder jährlich abgegebene Energie des Systems. Der Energieaufwand wird in Form von konventioneller Primärenergie angegeben.
- **CO<sub>2</sub>-Amortisation:** Die CO<sub>2</sub>-Amortisation wird von einer Anlage erreicht, wenn die CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer innerhalb der Lebensdauer der Anlage liegt. Die CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer beschreibt, wie lange eine erneuerbare Energieerzeugungsanlage betrieben werden muss, um die in der Herstellung erzeugten CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen durch die Nutzung auszugleichen (Kals 2010).

## **8.2. Kritikalität**

Die Kritikalität zeigt die Verfügbarkeit von Rohstoffen an. Sie setzt sich aus der wirtschaftlichen Relevanz (Economic Importance – EI) und dem Versorgungsrisiko (Supply Risk – SR) zusammen. Die jeweiligen Grenzwerte werden von der EU-Kommission festgelegt (Europäische Kommission 2020). Die Kalkulation der Parameter erfolgt durch Verwendung von Durchschnittswerten der letzten fünf Jahre, sofern vorhanden.

Economic Importance (EI): Das Ziel der EI ist es, die Wichtigkeit eines Materials für die europäische Wirtschaft in Bezug auf die Endnutzungsanwendung und die Wertschöpfung darzustellen (Europäische Kommission 2020). Für die Berechnung berücksichtigt werden hier auch Substitutionsmöglichkeiten.

Supply Risk (SR): SR betrachtet das Risiko einer Unterbrechung der EU-Materialversorgung (Europäische Kommission 2020). Es berücksichtigt Importrate und Importabhängigkeit und Handelsparameter und politische Rahmenbedingungen, Recycling und einen Substitutionsfaktor.

Beidinger (2018) berechnete die Entwicklung der Kritikalität von Rohstoffen, die in der Energiewende eine Rolle spielen bis 2030. Basis der Berechnungen waren die nationalen Energiepläne der Mitgliedsstaaten der EU. Es zeigt sich, dass selbst unter der Annahme, dass ausschließlich der Verbrauch des Energiesektors steigt, die Verfügbarkeit einiger Rohstoffe in den kritischen Bereich gelangt (siehe Abbildung 68).

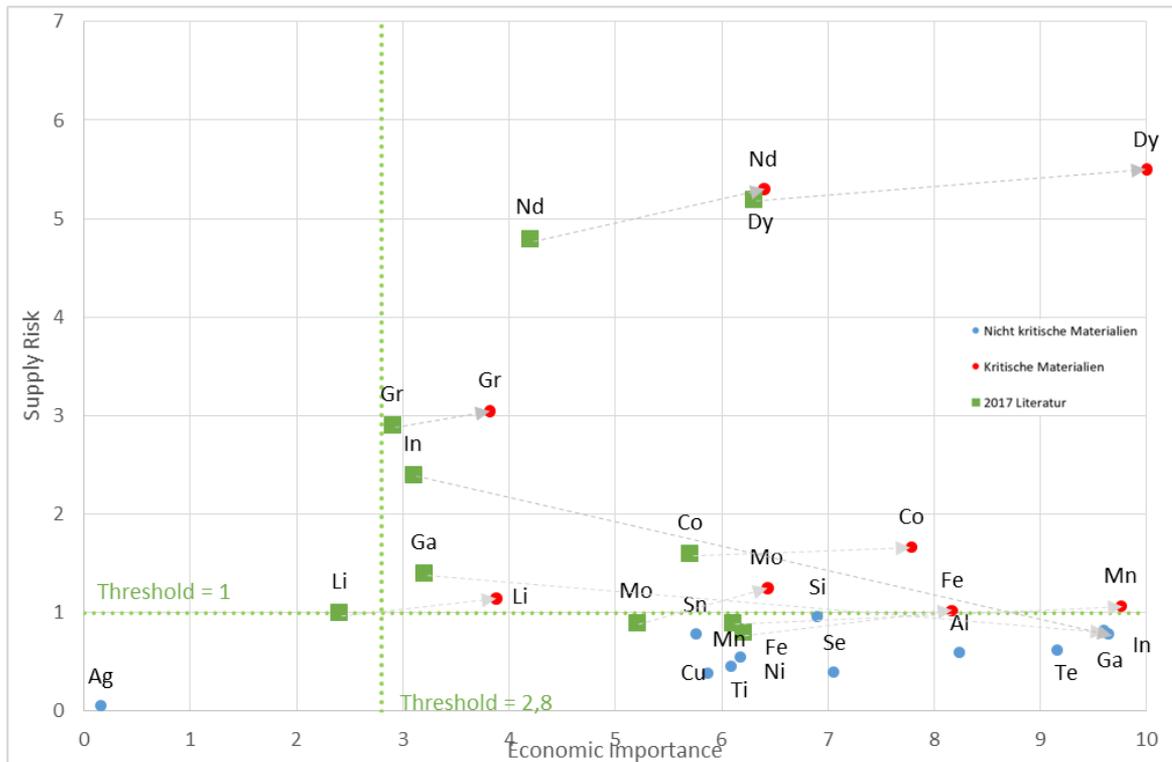


Abbildung 68: Veränderung der Kritikalität von Rohstoffen durch die europäische Energiewende – Abschätzung für 2030 (Beidinger 2018)

Im vorliegenden Projekt wurden die eingesetzten Materialien anhand der oben gezeigten Ergebnisse auf ihre Verfügbarkeit überprüft.

### 8.3. Toxizität

Als Toxizität wird die Giftigkeit einer Substanz bezeichnet. Sie hängt von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Substanz ab, und davon wie lange, wie oft usw. ein Organismus ihr ausgesetzt ist. Dazu kommt noch die genetische Veranlagung der betroffenen Organismen. Es wird in toxische Wirkung auf Menschen sowie auf aquatische und terrestrische Ökosysteme unterschieden. Die Toxizität wird mittels Tierversuches, Zellkultur (Humantoxizität) oder Feldversuches ermittelt. Es werden vier Toxizitätsklassen unterschieden, wobei die Klasse 1 die extrem giftigen Stoffe umfasst und die Klasse 4 solche mit äußerst geringer Toxizität (Lohs et al. 2009; S. 244). Angaben zur Toxizität der eingesetzten Stoffe sind in diversen technischen Beschreibungen und Sicherheitsdatenblättern zu finden.

Entlang der Wertschöpfungskette wurden Angaben zur Toxizität in openLCA (Version 1.10.3) ermittelt, eine Unterscheidung in Toxizitätsklassen wird hier nicht vorgenommen. Für die Anlage selbst und

deren Nutzung am Standort wurden die Angaben den Hersteller:innen-Angaben und Sicherheitsdatenblättern entnommen.

## 8.4. Konfliktrohstoffe

Die Konfliktmineralien-Verordnung der EU (Europäische Union 2017) verpflichtet Unionseinführer:innen zur Identifizierung von Konfliktmineralien in Lieferketten und zum Treffen geeigneter Maßnahmen zu deren Minimierung. Als Konfliktrohstoffe werden Rohstoffe bezeichnet, die aus Konflikt- oder Hochrisikogebieten bezogen werden. In der aktuellen Definition handelt es sich dabei um Zinn, Tantal, Wolfram und Gold. Angaben zur Verwendung von Konfliktmineralien wurden den Herstellern und den Ergebnissen der Klimabilanz entnommen.

## 8.5. Erweiterung der Bewertungskriterien - Technikfolgenabschätzung

Die Vorgangsweise zur Erarbeitung des Kriterienkatalogs beinhaltet im Wesentlichen drei Schritte:

1. Entwicklung eines Kriterienvorschlags auf Basis von Vorarbeiten für erneuerbare Energien
2. Diskussion dieses Vorschlages im Rahmen eines interdisziplinären Expert:innen-Workshops
3. Finalisierung des Katalogs, sowie Erarbeitung zu Vorschlägen zu Messgrößen/Indikatoren für die einzelnen Kriterien.

Ad (1): Der Kriterienkatalog wurde auf Basis bestehender, umfassender Kriterienkataloge entwickelt. Er enthielt sowohl quantitative als auch qualitative Größen. Diese wurden anhand von Literaturrecherche und Expert:innen-Interviews für Kleinwindkraft adaptiert. Dieser Katalog bildete den Ausgangspunkt für den interdisziplinären Expert:innen-Workshop.

Ad (2): Die Teilnehmer:innen stammten aus den Bereichen Sozialwissenschaft, Technik, Humanökologie, Ökologie, Technik, Risikoforschung, Anlagenherstellung und -vertrieb. Ziel des Workshops war es, die vorgeschlagenen Kriterien hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und Relevanz für Kleinwindkraft zu reflektieren. Dazu wurde ein virtuelles Whiteboard vorbereitet. Auf diesem konnten seitens der Teilnehmer:innen Ergänzungen vorgenommen werden (Vollständigkeit) und Punktwertungen abgegeben werden (Relevanz).

Für die Punktebewertung standen jeder Person 18 virtuelle Punkte zur Verfügung, die jeweils je nach Schwerpunktsetzung verteilt werden mussten – dabei waren sowohl mehrere Punkte für einzelne Kriterien als auch einzelne Punkte für mehrere Kriterien möglich. Darüber konnten sogenannte Knock-Out Kriterien gekennzeichnet werden, welche für eine positive Bewertung in jedem Fall erfüllt werden müssen. Argumente für Schwerpunktsetzungen und Ergänzungen wurden protokolliert.

Ad(3): Für die Finalisierung wurden die diskutierten Ergänzungen vorgenommen, Knock-Out-Kriterien gekennzeichnet und alle Kriterien, nach ihrer Wichtigkeit für die Teilnehmer:innen gereiht. Gereiht wurde nach der durchschnittlichen erworbenen Punkteanzahl von den 18 zur Verteilung gestandenen Punkten und der Anzahl der Teilnehmer:innen, die für die Kriterien Punkte vergeben haben. Dabei ergaben sich acht Gruppen, die höchsten fünf wurden als besonders relevant eingestuft.

Aus diesem Katalog wurde eine Bewertungsmatrix erstellt.

## 8.6. Vergleichende Bewertung der Anlagen

Die Bewertungsmatrix dient der vergleichenden Bewertung und kann keine absoluten Ergebnisse liefern. Das Ausgangsszenario ist der Status Quo – als im Falle der Kleinwindkraft der Bezug der Energie aus dem Stromnetz. Die Daten zur Bewertung der Anlagen stammen aus Berechnungen, Herstellerangaben und empirischen Beobachtungen. Die Bewertungsmatrix wurde mit den Daten vervollständigt und die Ergebnisse bewertet. Bewertet wurde für jedes Szenario die Veränderung vom Status Quo zum Betrieb der jeweiligen Anlage und Montagen. Zur besseren, gemeinsamen Darstellung wurden die qualitativen und quantitativen Ergebnisse auf die gleiche Weise quantifiziert. Dabei waren folgende Wertungen möglich:

- 2: starke Verschlechterung
- 1: leichte Verschlechterung
- 0: keine Veränderung
- +1: leichte Verbesserung
- +2: starke Verbesserung

Zur Objektivierung der Ergebnisse wurde die Bewertung im interdisziplinären Team vorgenommen. Die Ergebnisse konnten anschließend grafisch und narrativ dargestellt werden.

## 8.7. Ergebnisse

### 8.7.1. Sachbilanz

Zur Erstellung der Sachbilanz wurden die einzelnen Bauteile und Materialien, deren Masseanteil und Herstellungsort der fünf KWEA Superwind 1250, Vertikon M/Basis, Venturicon und Bluepower BlueOne bestimmt. Diese Bestimmungen erfolgten durch eigene Messungen und Berechnungen, Herstellerankünfte und fundierte Schätzungen. Berechnungen wurden mit der Software openLCA (Version 1.4.2 und Version 1.10.3) und unter Verwendung der Datenbank Ecoinvent (Version 2.2) durchgeführt. Zusätzlich wurden die Transportleistungen (Transportkilometer sowie die Transportart) der einzelnen Bauteile recherchiert. Die Transportkilometer der Schiffs- bzw. Flugwege wurden anhand von SeaRates (SeaRates LTD 2019) ermittelt, Landstrecken wurden mittels Google Maps (Google Maps 2019) verifiziert. In der Sachbilanz unberücksichtigt blieben Energiekabel, deren Entfernung zum Verbraucher unbekannt war und deren Umweltwirkung mit rund 0,68 kg CO<sub>2</sub>-äquivalent/m im Vergleich zum Gesamtsystem gering ausfällt (Malle und Stortecky 2018).

#### Gleiche Bauteile (Mastsysteme und Wechselrichter)

Als für alle Anlagen gleich zu betrachtende Bauteile ergaben sich bei den untersuchten KWEA die drei Befestigungssysteme Flachdachmast, Giebeldachmast und freistehender Mast mit Fundament und der Wechselrichter. Alle drei Mastsysteme bestehen aus einem Rohrmast, einer Halterung bzw. einer Leiter, einem Schwingungsentkoppler, einem Dämpfer und Befestigungsmaterial. Für den freistehenden Mast wurde ein Fundament errichtet. Für alle fünf untersuchten KWEA gleichsam eignet sich ein Wechselrichter mit einer Leistung von 2.500 Watt. Tabelle 19 zeigt die Sachbilanz der gemeinsamen Bauteile der KWEA.

Tabelle 19: Sachbilanz der gleichen Bauteile der untersuchten KWEA

Bauteil		Material	Masse	Herstellungsort
Flachdachmast	Rohrmast	Verzinkter Stahl	111,00 kg	Püchersreuth (DE)
	Halterung	Verzinkter Stahl	241,00 kg	
	Schwingungsentkoppler	Verzinkter Stahl	41,55 kg	
		Sylomer	2,00 kg	
		EPDM	0,3 kg	
		Kupfer	0,15 kg	
	Dämpfer	Sylomer	3,00 kg	
	Befestigungsmaterial	Verzinkter Stahl	10,5 kg	Schramberg (DE)
Giebeldachmast	Rohrmast	Verzinkter Stahl	111,00 kg	Püchersreuth (DE)
	Halterung	Verzinkter Stahl	264,00 kg	
	Schwingungsentkoppler	Verzinkter Stahl	41,55 kg	
		Sylomer	2,00 kg	
		EPDM	0,30 kg	
		Kupfer	0,15 kg	
	Dämpfer	Sylomer	2,00 kg	
	Befestigungsmaterial	Verzinkter Stahl	18,30 kg	Schramberg (DE)
	Freistehender Mast	Rohrmast	Verzinkter Stahl	440,00 kg
Sicherheitsleiter		Aluminium	35,00 kg	
Schwingungsentkoppler		Verzinkter Stahl	75,00 kg	
		Sylomer	2,00 kg	
		EPDM	0,3 kg	
		Kupfer	0,15 kg	
Dämpfer		Sylomer	2,00 kg	
Befestigungsmaterial		Verzinkter Stahl	27,70 kg	Schramberg (DE)
Fundament		Stahlbeton	11.614,00 kg	Dinkelscherben (DE)
		Verzinkter Stahl	223,00 kg	Dinkelscherben (DE)
		PVC	5,00 kg	Dinkelscherben (DE)
	Nirosta	2,00 kg	Dinkelscherben (DE)	
Wechselrichter	Legierter Stahl	9,80 kg	Püchersreuth (DE)	
	Kupfer	5,51 kg		

Der Transport der drei Mastsysteme wurde vom jeweiligen Herstellungsort bis zum Ort der Errichtung der Gesamtanlagen in Lichtenegg (AT) per LKW berücksichtigt (siehe Tabelle 20). Die Errichtung erfolgte mit einem Kran. Hierbei wurde angenommen, es handle sich um einen Kran der Fa. Reitinger aus Baden (AT), dessen Transportleistung ebenfalls berücksichtigt wurde.

Tabelle 20: Transportmittel und Transportleistung der Einzelbauteile der drei Mastsysteme

Transport der Einzelbauteile zum Aufstellungsort Lichtenegg (AT)			
	Flachdachmast	Giebeldachmast	Freistehender Mast
Transportmittel	Transportleistung [t*km]	Transportleistung [t*km]	Transportleistung [t*km]
LKW	525,15	566,95	689,26

### KWEA Superwind 1250

Die horizontalachsige KWEA Superwind 1250 besteht, wie in Abbildung 69 dargestellt, aus drei Rotorblättern, einem Generator, einer Scheibenbremse, einer Nabe, einer Windfahne und einem Windfahnen supporter. Sie hat eine Nennleistung von 1250 W und die Leistungsbegrenzung erfolgt durch passive Pitchregelung.

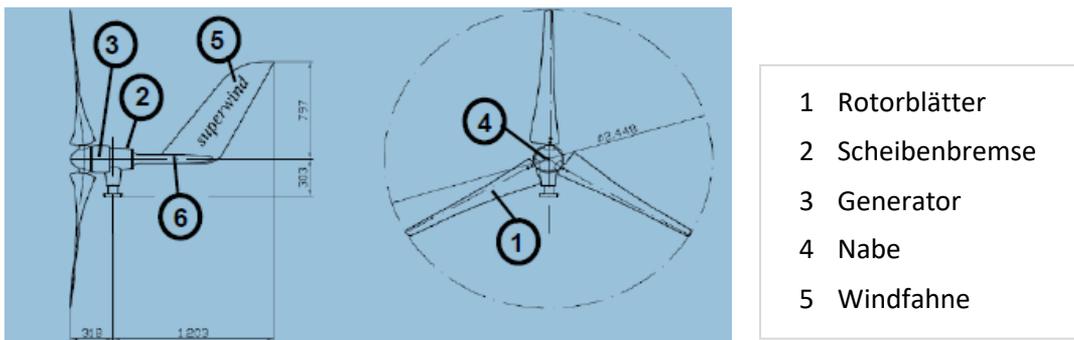


Abbildung 69: Konstruktionszeichnung der KWEA Superwind 1250 (Superwind GmbH 2016)

Der Generator nimmt den höchsten Masseanteil der Komponenten der Windturbine ein. Mit Ausnahme der Rotorblätter wurde die Anlage aus Metall (Aluminiumlegierung und Edelstahl) gefertigt. Die Rotorblätter bestehen zu gleichen Anteilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Abbildung 70 zeigt die Materialzusammensetzung der KWEA in Masseprozent.

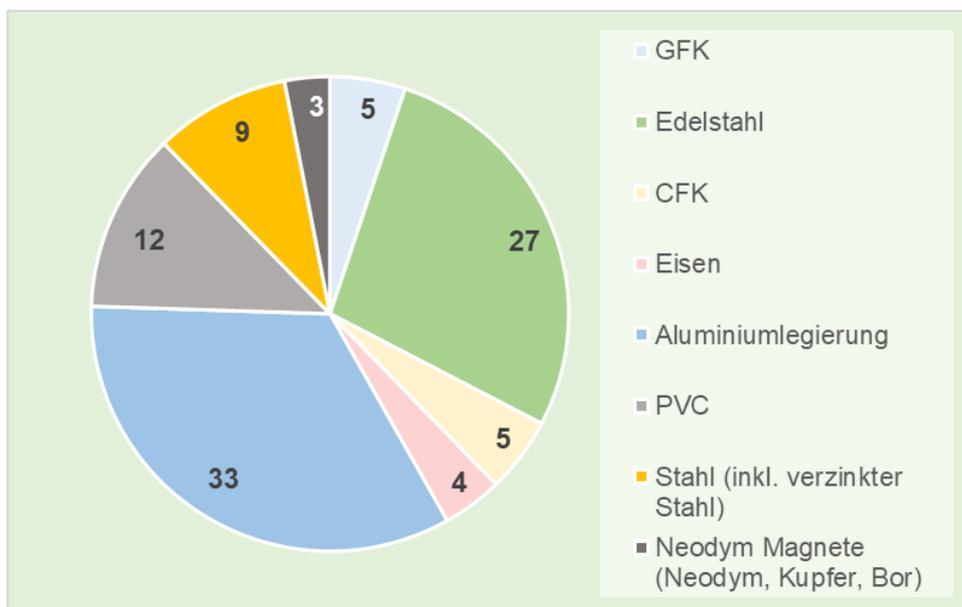


Abbildung 70: Materialzusammensetzung der KWEA Superwind 1250 in Masseprozent

Die Transportwege umfassten mit Ausnahme der Neodym Magnete, die in China hergestellt wurden, Wege innerhalb Deutschlands, die mittels PKW mit Anhänger bzw. mittels LKW bewältigt wurden (siehe Tabelle 21). Der Transportweg der Neodym Magnete aus China wurde per Schiff angenommen. Das Verpackungsmaterial fand in Form von 8 kg Karton Berücksichtigung.

Tabelle 21: Transportmittel und Transportleistung der Einzelbauteile der KWEA Superwind 1250

Transport der Einzelbauteile zum Produktionsstandort Brühl (DE)	
Transportmittel	Transportleistung [t*km]
LKW	2,27
Schiff	56,51
PKW mit Anhänger	1,80
<b>gesamt</b>	<b>60,58</b>

Aus dem Transportweg vom Produktionsstandort in Brühl (DE) zum Aufstellungsort in Lichtenegg (AT) ergab sich eine weitere Transportleistung von 50,79 t\*km.

### KWEA Vertikon M/Basis

Die vertikale KWEA Vertikon M/Basis, ausgeführt als H-Darrieus Rotor, erreicht bei einer Windgeschwindigkeit von 11 m/s eine Nennleistung von 950 W. Die KWEA wurde in die acht Hauptkomponenten untergliedert (siehe Abbildung 71). Sie besteht aus drei Rotorblättern, sechs Rotorstreben, einer elektronischen Bremseinheit, der E-Control Bodeneinheit, dem Generator, der Wellenaufnahme, einem Minimast und einem Entkoppler, der zur Schalldämpfung der KWEA dient.

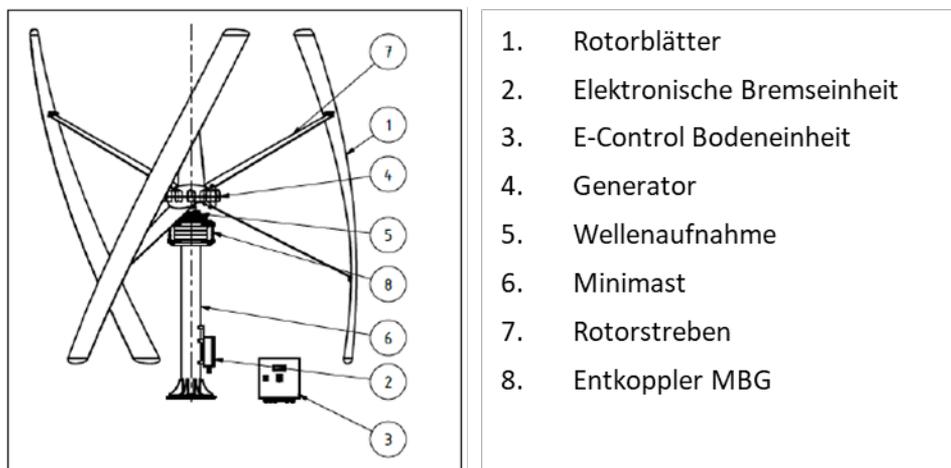


Abbildung 71: Konstruktionszeichnung der KWEA Vertikon M/Basis (DeTec Vision GmbH 2015)

Abbildung 72 zeigt die Materialzusammensetzung in Masseprozent. Die sechs Rotorstreben nehmen aufgrund ihrer Fertigung aus massivem Baustahl den höchsten Masseanteil dieser KWEA ein.

Der Anteil an legiertem Stahl ist nimmt mehr als die Hälfte der Materialzusammensetzung dieser KWEA ein, der Teil der sechs Rotorblätter (hochlegierter Stahl) und des Minimasts (niedriglegierter Stahl) ist. Ebenfalls hoch ist der Anteil an Aluminiumlegierung.

Zum Transport der einzelnen Bauteile von deren Herstellungsorten zum Produktionsort in Nordhausen (DE) und weiter zum Errichtungsort der Gesamtanlage in Lichtenegg (AT) wurden die Transportmittel

Schiff, LKW und PKW mit Anhänger gewählt. Tabelle 22 zeigt die Transportmittel und die Transportleistung der einzelnen Bauteile dieser KWEA.

Die Transportstrecke von Nordhausen (DE) zum Aufstellungsort der KWEA in Lichtenegg (AT) diente ein LKW, diese Transportleistung ergab zusätzliche 74,01 t\*km. Der Transport des zur Aufstellung notwendigen Krans (Reitinger GmbH, Baden (AT)) wurde ebenfalls berücksichtigt.

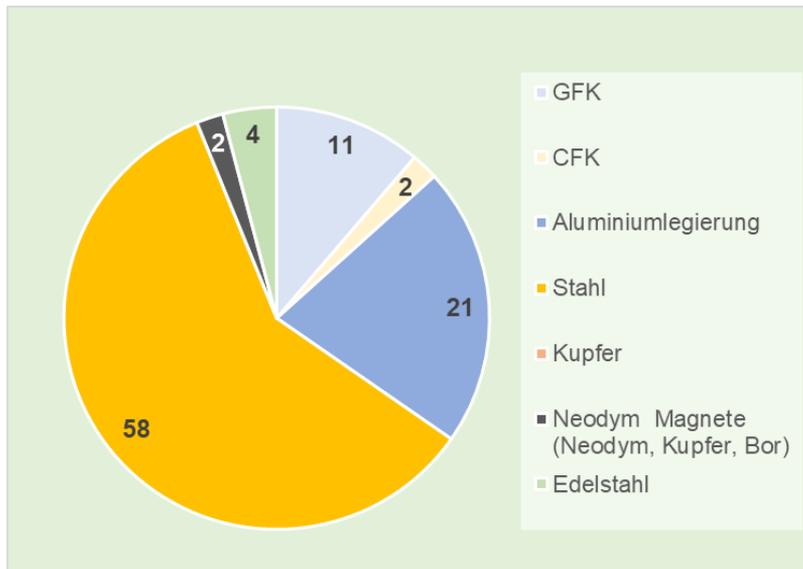


Abbildung 72: Materialzusammensetzung der KWEA Vertikon M/Basis in Masseprozent

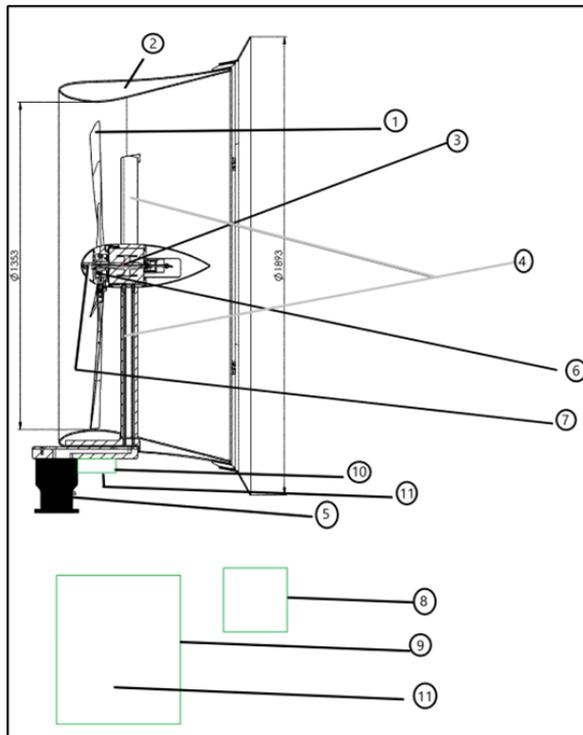
Tabelle 22: Transportmittel und Transportleistung der KWEA Vertikon M/Basis

Transport der Einzelbauteile zum Produktionsstandort Nordhausen (DE)	
Transportmittel	Transportleistung [t*km]
Schiff	56,51
LKW	65,07
PKW mit Anhänger	0,88
<b>gesamt</b>	<b>122,46</b>

### KWEA Venturicon

Die horizontale Mantelturbine Venturicon 3.Zero wurde in 12 Hauptkomponenten untergliedert. Diese bestehen aus fünf Rotorblättern, einem Mantel, einem Generator, einer Generatorkaufnahme, einem Giergelenk, einer Nabe mit Nabenabdeckung, einer Steuereinheit, einem Schaltschrank, einem Gleichrichter, einem Kühler und einer Sicherung (siehe Abbildung 73). Die Anlage weist eine Nennleistung von 1150 W auf.

Abbildung 74 zeigt die Materialzusammensetzung in Masseprozent. Der Mantel nimmt den höchsten Masseanteil der Komponenten der Windturbine ein, der fast ausschließlich aus GFK gefertigt wurde. Einen weiteren hohen Masseanteil nimmt das Giergelenk ein, das nahezu gänzlich aus einer Aluminiumlegierung besteht. Die Rotorblätter bestehen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK).



- 1 Rotorblatt
- 2 Mantel/Diffusor
- 3 Generator
- 4 Generatöraufnahme
- 5 Giergelenk inkl. Lager, Schleifring und Montageflansch
- 6 Nabe
- 7 Nabenabdeckung
- 8 Steuereinheit
- 9 Schaltschrank
- 10 Gleichrichter
- 11 Kühler
- 12 Sicherung und SPS

Abbildung 73: Konstruktionszeichnung der KWEA Venturicon (adaptiert nach Venturicon Windturbines GmbH s.a.)

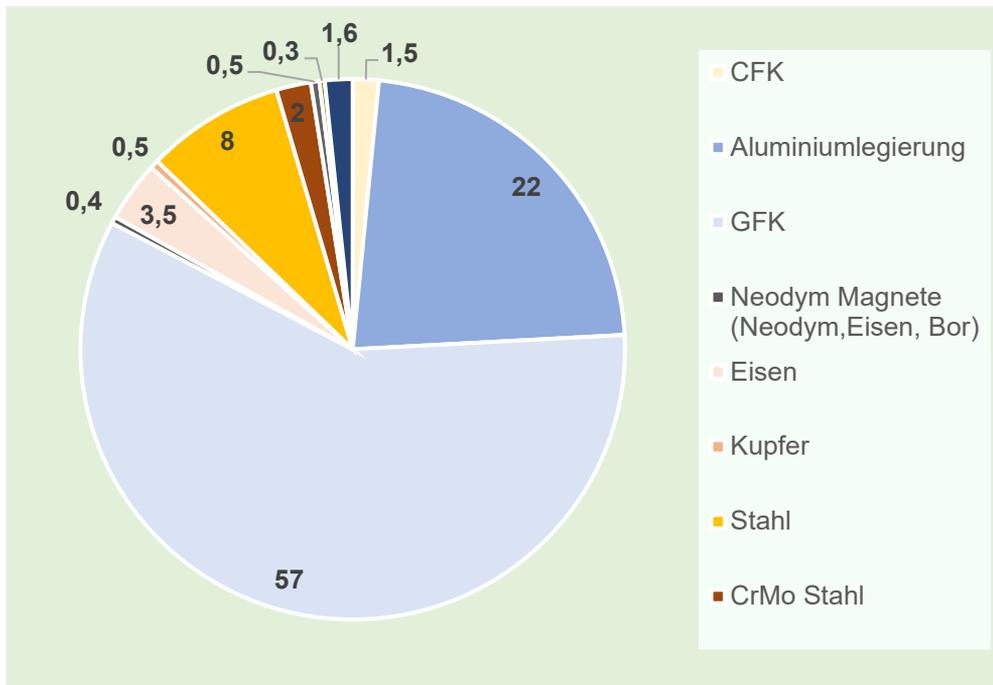


Abbildung 74: Materialzusammensetzung der KWEA Venturicon in Masseprozent

Die Transportwege umfassten mit Ausnahme der Neodym Magnete und der Bürsten für den Schleifring, die in China hergestellt wurden, Wege innerhalb Deutschlands und Österreichs, die mittels LKW bewältigt wurden (siehe Tabelle 23). Der Transportweg der Neodym Magnete und der Bürsten aus China wurde per Schiff angenommen.

Tabelle 23: Transportmittel und Transportleistung der KWEA Venturicon

Transport der Einzelbauteile zum Produktionsstandort Feldkirch (AT)	
Transportmittel	Transportleistung [t*km]
Schiff	56,60
LKW	22,67
<b>gesamt</b>	<b>79,27</b>

Die Transportstrecke von Feldkirch (AT) zum Aufstellungsort der KWEA in Lichtenegg (AT) diente ein LKW, diese Transportleistung ergab zusätzliche 54,80 t\*km. Der Transport des zur Aufstellung notwendigen Krans (Reitinger GmbH, Baden (AT)) wurde ebenfalls berücksichtigt

### KWEA Blueone

Die horizontale Mantelturbine Bluepower BlueOne wurde in neun Hauptkomponenten untergliedert. Sie besteht aus fünf Rotorblättern, einem Mantel, einem Generator und einer Generatorkaufnahme, einem Giergelenk, einer Nabe mit Nabenabdeckung, einer Steuereinheit und einem Schaltschrank (siehe Abbildung 75).

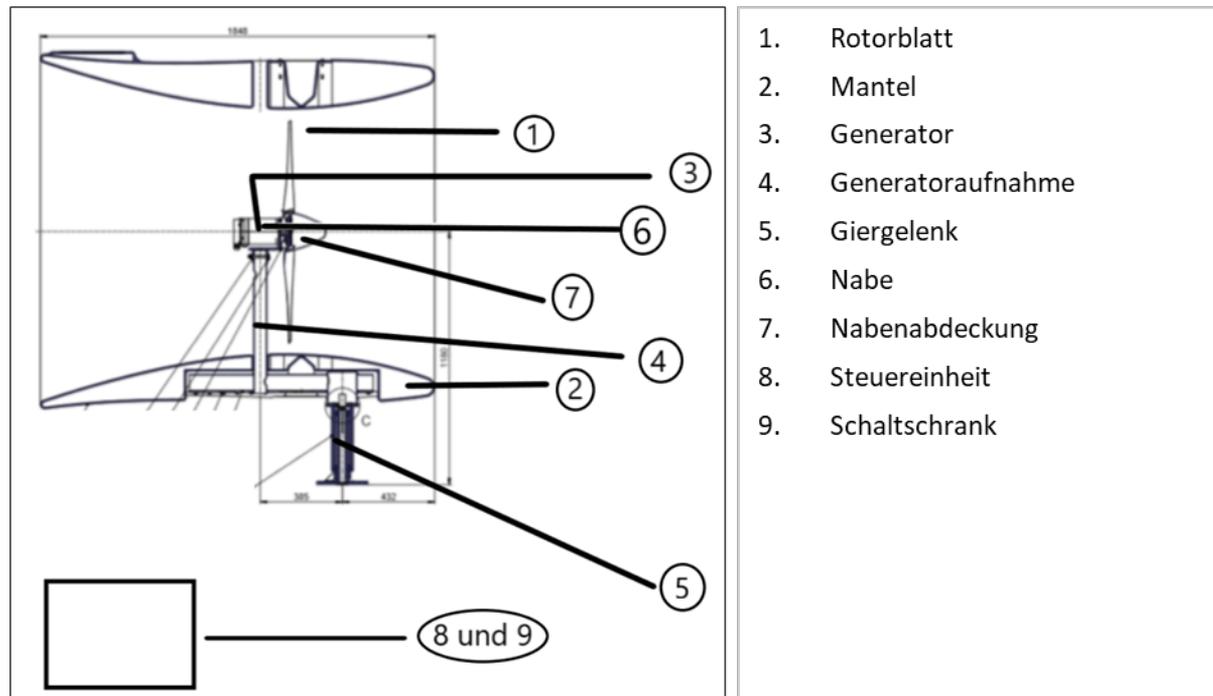


Abbildung 75: Konstruktionszeichnung KWEA Bluepower BlueOne (adaptiert nach Bluepower GmbH 2019)

Abbildung 76 zeigt die Materialzusammensetzung in Masseprozent. Der Mantel nimmt den höchsten Masseanteil der Komponenten der Windturbine ein, der ausschließlich aus GFK gefertigt wurde. Einen weiteren hohen Masseanteil nimmt die Generatorkaufnahme ein, die zu einem Großteil aus Chrom-Molybdän Stahl besteht. Die Rotorblätter dieser KWEA bestehen zu einem Viertel aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK), der übrige Masseanteil aus Polypropylen.

Die Transportwege umfassten mit Ausnahme der Neodym Magnete, der Steuereinheit und Anteile des Giergelenks, die in China hergestellt wurden, Wege innerhalb Deutschlands und Österreichs, die

mittels LKW bewältigt wurden (siehe Tabelle 24). Der Transportweg der Materialien aus China wurde per Schiff angenommen.

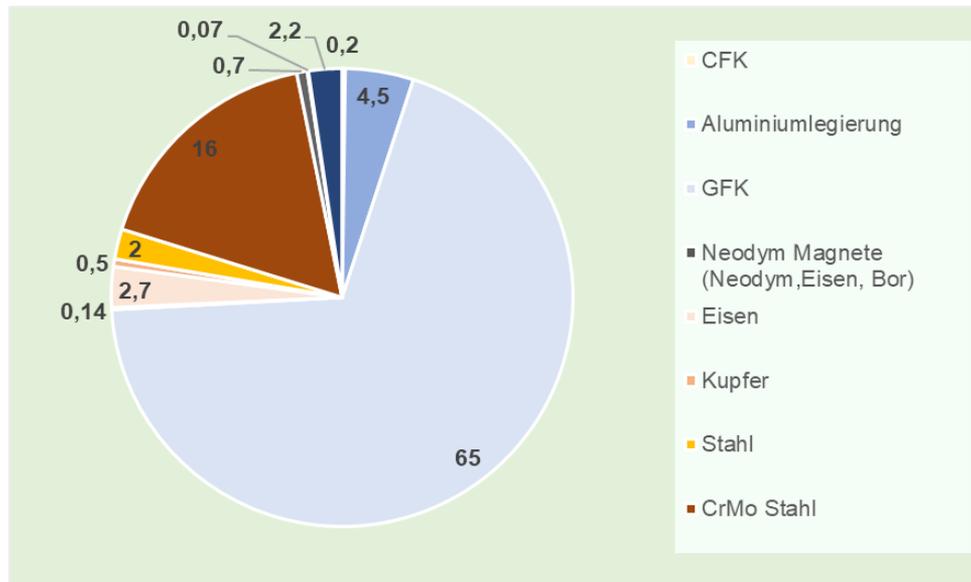


Abbildung 76: Materialzusammensetzung der KWEA Bluepower BlueOne in Masseprozent

Tabelle 24: Transportmittel und Transportleistung der KWEA BlueOne

Transport der Einzelbauteile zum Produktionsstandort Spital am Phyrn (AT)	
Transportmittel	Transportleistung [t*km]
Schiff	65,60
LKW	62,50
<b>gesamt</b>	<b>128,1</b>

Die Transportstrecke von Spital am Phyrn (AT) zum Aufstellungsort der KWEA in Lichtenegg (AT) diente ein LKW, diese Transportleistung ergab zusätzliche 23,37 t\*km. Der Transport des zur Aufstellung notwendigen Krans (Reitinger GmbH, Baden (AT)) wurde ebenfalls berücksichtigt.

### 8.7.2. Wirkungsabschätzung

Um die Umweltwirkungen der verwendeten Bauteile zu untersuchen, wurden die Wirkungskategorie  $GWP_{100}$  und der kumulierte Energieaufwand auf Basis von Daten der Datenbank Ecoinvent (Version 2.2) mit der Software openLCA (Version 1.4.2 und Version 1.10.3) ermittelt.

#### Vergleich der Umweltwirkung der Gesamtanlagen

Der Vergleich der KWEA-Gesamtanlagen (die Gesamtanlagen beinhalten die Windturbinen, Wechselrichter und Montagesystem) zeigte die Superwind 1250 die höchste Umweltwirkung hinsichtlich  $GWP_{100}$  und kumuliertem Energieaufwand bei Montage auf dem freistehenden Mast, die geringste Umweltwirkung bei Montage auf dem Flachdachmast. Die KWEA Bluepower BlueOne zeigte aufgrund ihrer emissionsstarken und ressourcenintensiven Herstellung die höchste Umweltwirkung. Am emissionsstärksten zeigt sich bei dieser KWEA der Mantel mit einem hohen Masseanteil, zur Gänze hergestellt aus GFK. Danach folgt die KWEA Vertikon M, deren emissionsstärkstes Bauteil der Generator darstellt, der mit einer hohen Masse zu fast 90 % aus einer Aluminiumlegierung besteht.

Die KWEA Venturicon nimmt die 4. Stelle in der Reihung nach der emissionsstarken Herstellung ein. Hier ist es der Turbinenmantel, der zu nahezu 100% aus GFK besteht, im Vergleich zum Turbinenmantel der KWEA Bluepower BlueOne mit 95 kg, eine Masse von 45 kg einnimmt. Die KWEA Superwind 1250 weist mit einem deutlichen Unterschied zu den übrigen untersuchten KWEA die geringsten Umweltwirkungen auf. Nachstehende Tabellen Tabelle 25 und Tabelle 26 zeigen die Umweltwirkung der untersuchten KWEA hinsichtlich GWP<sub>100</sub> und kumuliertem Energieaufwand nach Montageart, Windturbine sowie als Gesamtanlagen im Vergleich.

Tabelle 25: Umweltwirkung der KWEA Superwind 1250 und Vertikon M/Basis

<b>GWP<sub>100</sub> und kumulierter Energieaufwand der KWEA Superwind 1250 und Vertikon M/Basis</b>				
	<b>Superwind 1250</b>		<b>Vertikon M/Basis</b>	
	GWP <sub>100</sub> [kg CO <sub>2</sub> -äqu.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]	GWP <sub>100</sub> [kg CO <sub>2</sub> -äqu.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]
Windturbine	438,04	7.258,37	1.637,11	28.700,33
Wechselrichter	178,44	3.216,03	178,44	3.216,03
Mastsystem Flachdach	1.797,19	27.807,36	1.797,19	27.807,36
Mastsystem Giebeldach	1.921,13	29.654,42	1.921,13	29.654,42
Mastsystem freistehend	2.901,3	39.131,94	2.901,30	39.131,94
Gesamtanlage (Flachdach)	2.413,67	38.281,76	3.612,67	59.723,72
Gesamtanlage (Giebeldach)	2.537,61	40.128,82	3.736,61	61.570,68
Gesamtanlage (freistehend)	3.517,78	49.606,34	4.716,78	71.900,53

Tabelle 26: Umweltwirkung der KWEA Venturicon und Bluepower BlueOne

<b>GWP<sub>100</sub> und kumulierter Energieaufwand der KWEA Venturicon und Bluepower BlueOne</b>				
	<b>Venturicon</b>		<b>Bluepower</b>	
	GWP <sub>100</sub> [kg CO <sub>2</sub> -äqu.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]	GWP <sub>100</sub> [kg CO <sub>2</sub> -äqu.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]
Windturbine	1.012,93	16.282,75	1.735,05	25.805,19
Wechselrichter	178,44	3.216,03	178,44	3.216,03
Mastsystem Flachdach	1.797,19	27.807,36	1.797,19	27.807,36
Mastsystem Giebeldach	1.921,13	29.654,42	1.921,13	29.654,42
Mastsystem freistehend	2.901,30	39.131,94	2.901,30	39.131,94
Gesamtanlage (Flachdach)	2.988,56	47.306,14	3.710,68	56.828,58
Gesamtanlage (Giebeldach)	3.112,30	49.153,20	3.834,57	58.675,64
Gesamtanlage (freistehend)	4.092,67	58.630,69	4.814,79	68.153,16

### 8.7.3. Energetische und CO<sub>2</sub>-Amortisation

Zur Bestimmung der energetischen und der CO<sub>2</sub>-Amortisation der vier KWEA Superwind 1250, Vertikon M/Basis, Venturicon und Bluepower BlueOne wurden deren Jahreserträge auf einem Flachdach, einem Giebeldach und auf einer freistehenden Mast untersucht. Die Untersuchung erfolgte unter der Annahme, dass sich die KWEA aufgrund der unterschiedlichen Dachformen zu unterschiedlichen Zeitpunkten amortisieren würden. Die Amortisation wird dann erreicht, wenn die energetische, bzw. die CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer innerhalb der Lebensdauer der KWEA liegt.

## Energetische Amortisation

Die energetische Amortisationsdauer wird von einer KWEA dann erreicht, wenn die energetische Amortisationsdauer innerhalb ihrer Lebensdauer liegt. Zur Ermittlung der energetischen Amortisationsdauer wurde der kumulierte Energieaufwand der vier KWEA durch den jeweiligen Jahresenergieertrag der untersuchten Standorte dividiert. Die Nabenhöhe wurde an jedem untersuchten Standort mit 7,1 m festgelegt.

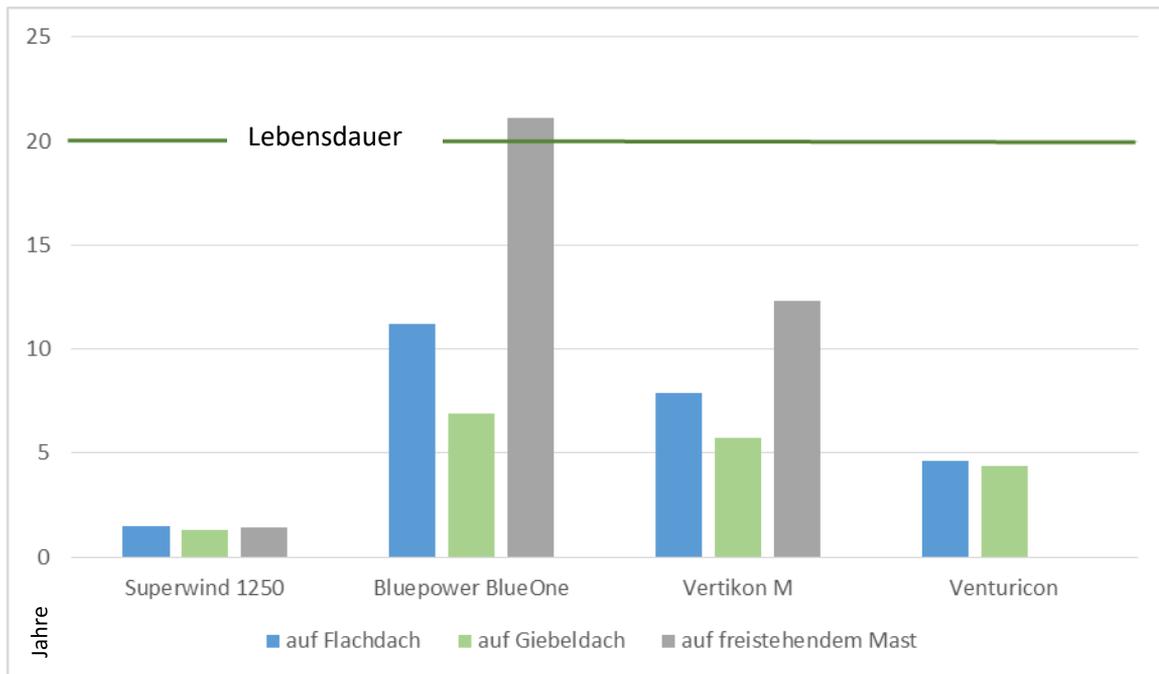


Abbildung 77: Energetische Amortisationsdauer der vier Windturbinen in Jahren

Alle untersuchten Windturbinen amortisieren sich innerhalb der angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren, außer der KWEA Bluepower BlueOne mit Montage auf der freistehenden Mast.

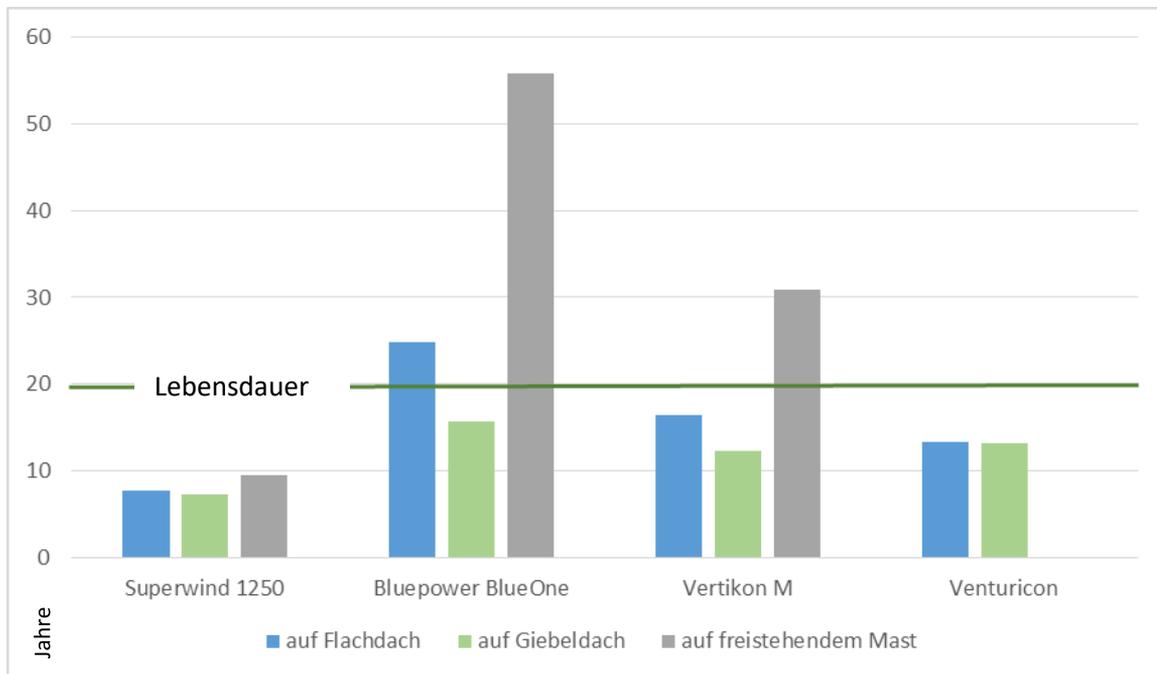


Abbildung 78: Energetische Amortisationsdauer der KWEA inkl. Wechselrichter und Mastsysteme

Werden die drei Mastsysteme und der Wechselrichter in die Berechnung miteinbezogen (siehe Abbildung 78), amortisiert sich die KWEA Bluepower BlueOne auf der Dachform Giebeldach nach 15,6 Jahren, montiert auf dem Flachdach und dem freistehenden Mast aber nicht innerhalb ihrer Lebensdauer. Die KWEA Vertikon M/Basis amortisiert sich montiert auf dem Giebeldach nach 12,2 Jahren, montiert auf dem Flachdach nach 16,4 Jahren. Montiert auf dem freistehenden Mast liegt der Amortisationszeitpunkt über der Lebensdauer der Anlage. Die KWEA Venturicon amortisiert sich energetisch nach 13,3 Jahren montiert auf dem Flachdach und nach 13,2 Jahren montiert auf dem Giebeldach. Die KWEA Superwind 1250 amortisiert sich montiert auf dem Flachdach nach 7,7 Jahren, auf dem Giebeldach nach 7,2 Jahren und auf dem freistehendem Mast nach 9,4 Jahren.

### CO<sub>2</sub>-Amortisation

Die CO<sub>2</sub>-Amortisation wird dann erreicht, wenn die CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer innerhalb der Lebensdauer der untersuchten KWEA liegt. Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer wurde das GWP<sub>100</sub> der vier KWEA Superwind 1250 und Bluepower BlueOne, Vertikon M und Venturicon mit dem mathematischen Produkt aus dem Jahresenergieertrag der KWEA, montiert auf Flachdach, Giebeldach und freistehendem Mast, und dem spezifischen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des österreichischen Strommix (E-Control 2019) verglichen. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Nabenhöhe von 7,1 m.

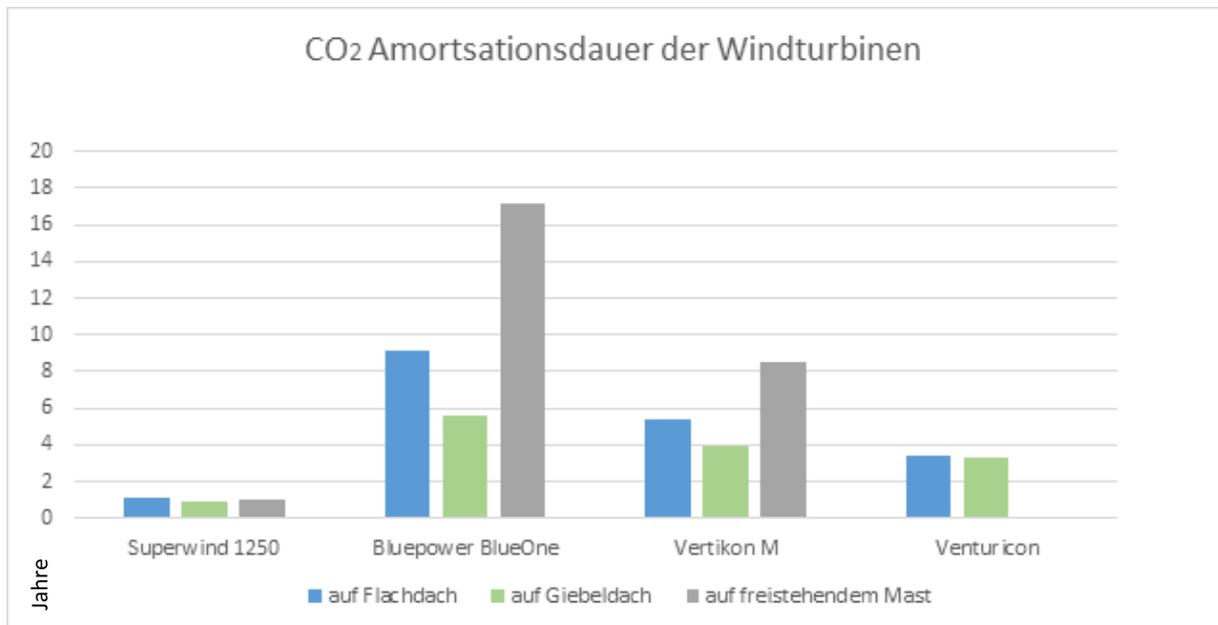


Abbildung 79: CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer der vier Windturbinen in Jahren

Abbildung 79 zeigt die CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer der Windturbinen, jeweils unter Berücksichtigung der Ertragsdaten von Montage auf Flach- und Giebeldach sowie auf dem freistehenden Mast in Jahren exkl. Wechselrichter und Mastsysteme. Alle untersuchten Windturbinen amortisieren sich innerhalb der angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren. Die KWEA Superwind 1250 amortisiert sich nach kürzester Zeit im Vergleich den übrigen KWEA, montiert auf dem Giebeldach nach bereits 0,9 Jahren, auf dem Flachdach nach 1,1 Jahren und auf dem freistehenden Mast nach einem Jahr. Alle Windturbinen zeigen eine kürzere CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer auf dem Giebeldach im Vergleich zur Montage auf dem Flachdach oder dem freistehenden Mast.

Werden die drei Mastsysteme und der Wechselrichter in die Berechnung miteinbezogen (siehe Abbildung 80), erreicht die KWEA Bluepower BlueOne auf dem freistehenden Mast ihre CO<sub>2</sub>-Amortisation nicht innerhalb ihrer Lebensdauer. Montiert auf dem Flachdach erreicht sie ihre CO<sub>2</sub>-Amortisation nach 19,5 Jahren und auf dem Giebeldach nach 12,3 Jahren. Die KWEA Vertikon M/Basis amortisiert sich montiert auf dem Giebeldach nach 9 Jahren, auf dem Flachdach nach 12 Jahren. Montiert auf dem freistehenden Mast liegt der Amortisationszeitpunkt über der Lebensdauer der Anlage. Die KWEA Venturicon amortisiert sich nach 10,2 Jahren montiert auf dem Flachdach und nach 10,1 Jahren montiert auf dem Giebeldach. Die KWEA Superwind 1250 amortisiert sich montiert auf dem Flachdach nach 5,8 Jahren, auf dem Giebeldach nach 5,5 Jahren und auf dem freistehendem Mast nach acht Jahren.

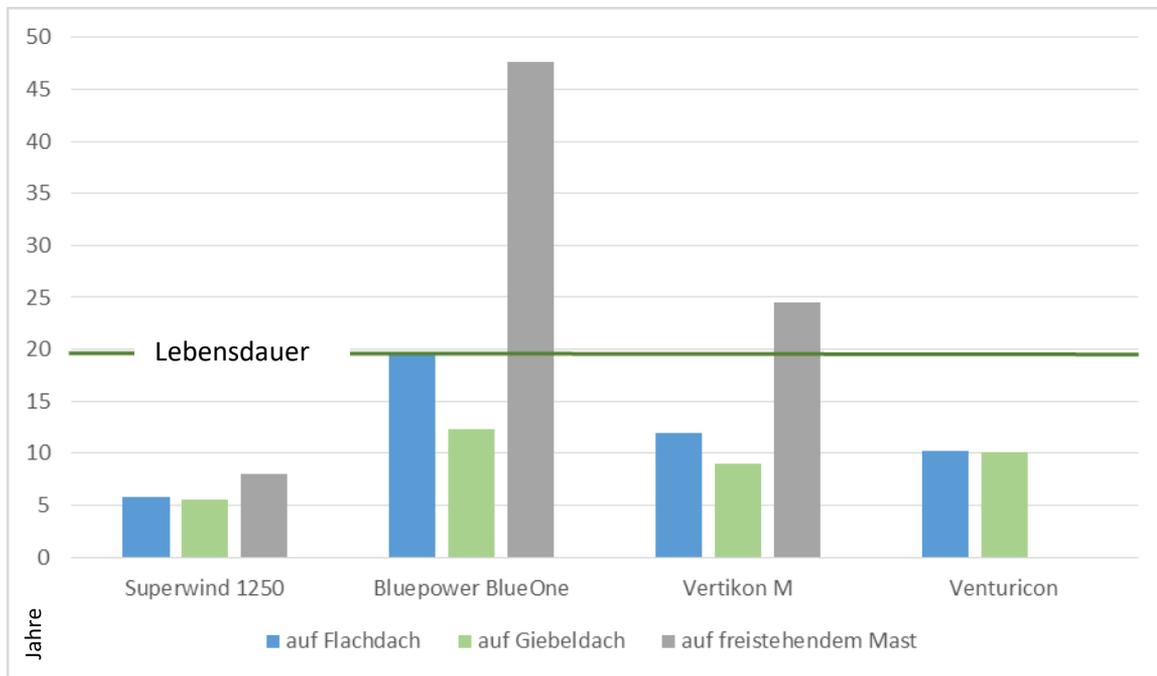


Abbildung 80: CO<sub>2</sub>-Amortisationsdauer der vier KWEA inkl. Wechselrichter und Mastsystem

## 8.8. Kritikalität und Toxizität der eingesetzten Rohstoffe sowie Umgang mit Konfliktrohstoffen

### 8.8.1. Kritikalität

Von den in den untersuchten KWEA enthaltenen Materialien werden folgende als kritisch oder potenziell kritisch eingestuft:

Kritische Rohstoffe: Tantal, Molybdän, Kobalt, Mangan, Phosphor, Indium, Tallium, Borate, Baryte und Gallium sind laut der erstellten Klimabilanz in den Herstellungsprozessen entlang der Wertschöpfungskette aller vier Windturbinen in geringen Mengen vorhanden.

Ein weiterer kritischer Rohstoff, der laut Herstellerangaben in den Generatoren aller untersuchten Windturbinen Verwendung findet, ist Neodym. Die Masseangaben variieren von 0,2 kg (Bluepower BlueOne), über 0,3 kg (Venturicon) bis zu 3 kg schweren eingesetzten Neodymmagnete (Vertikon M/Basis und Superwind 1250).

Als potenziell kritisch werden Eisen, Bauxit/Aluminium und Zink, genutzt für die Feuerverzinkung des Masts, eingestuft. Eisen ist ein Grundstoff der Stahlerzeugung und damit ein wichtiger Bestandteil der untersuchten KWEA. Hier können Recycling der Komponenten, bzw. deren Langlebigkeit einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Versorgungsengpässen leisten. Das gleiche gilt für Aluminium. Kupfer wird nicht als kritisch eingestuft.

### **8.8.2. Toxizität**

Entlang der Wertschöpfungskette konnten v.a. in den Prozessen für die Stahl- und Aluminiumherstellung toxische Substanzen identifiziert werden. Eine mögliche Ursache ist die Entstehung von Schlacken im Zuge der Herstellungsprozesse (Nentwig 2005). Schlacken enthalten humantoxische Schwermetalle wie beispielsweise Blei und Zink. Die in den Anlagen selbst verwendeten Materialien und Betriebsstoffe wurden als „nicht toxisch“ eingestuft.

### **8.8.3. Konfliktrohstoffe**

Als Konfliktrohstoffe wurden entlang der Wertschöpfungskette Tantal und Gold in geringen Mengen identifiziert, z. B. in Prozessen zur Herstellung der Steuereinheiten. Laut Herstellerangaben findet der Konfliktrohstoff Gold in der Windturbine Bluepower BlueOne Verwendung. Der Bezug aus Konflikt- und Hochrisikogebieten ist hier zu vermeiden und auf die Erfüllung der Sorgfaltspflicht entlang der Lieferkette zu achten.

### **8.8.4. Technikfolgenabschätzung**

Aufbauend auf die Ergebnisse der vorhergehenden Schritte wurde eine umfassende Technikfolgenabschätzung durchgeführt, die weitere Umweltauswirkungen und Auswirkungen auf betroffene Personen miteinbezieht. Das Bewertungssystem wurde in einem interdisziplinären Expert:innen-Workshop diskutiert und finalisiert, die Anwendung der Kriterien – also die eigentliche Bewertung – erfolgte durch das gesamte, interdisziplinäre Forschungsteam. Die Bewertung erfolgte jeweils relativ zum Referenzszenario, diese war der Ausgangszustand, also die Versorgung ohne KWEA. Um die Ergebnisse sichtbar, und damit auch besser verständlich zu machen, wurden die Ergebnisse wie im Kapitel 8.1 „Methoden“ beschrieben, quantifiziert und grafisch dargestellt. Die folgende Tabelle zeigt die für diesen Standort und diese Anwendung zur Bewertung herangezogenen Kriterien und die zugehörigen Indikatoren.

Tabelle 27: Kriterienliste für die Technikfolgenabschätzung

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
A Gesundheits- und umweltrelevante Impacts	Inputströme (Standort)	A.1	Gesamtenergieverbrauch und Anteil nicht erneuerbarer Energieträger/ Energetischer Ressourcenverbrauch	<u>Quantitativ:</u> Energetische Amortisation [y] CO <sub>2</sub> -Amortisation [y]
		A.2	Betriebsstoffe (toxische und petrochemische)	<u>Qualitativ</u> Toxische Betriebsstoffe [ja/nein] Petrochemische Betriebsstoffe [ja/nein] Kreislaufführung [ja/nein] Substitutionsmöglichkeit [ja/nein] <u>Quantitativ:</u> Menge toxische Betriebsstoffe [mg/kWh] Menge petrochemische Betriebsstoffe [mg/kWh]
	Outputströme (Standort)	A.3	Emissionen an die Kompartimente Wasser, Luft und Boden (Anlage + Transporte von Herstellungsort Anlage bis Aufstellungsort)	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Art der Emissionen [CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, ...]</li> <li>• Wirkungskategorie [Klima...]</li> <li>• Schattenwurf statisch störend [ja/nein]</li> <li>• Schattenwurf bewegend störend [ja/nein], Fenster werden gestreift [ja/nein]</li> <li>• Diskoeffekt störend [ja/nein]</li> <li>• Infraschall störend [ja/nein]</li> <li>• Körperschall störend [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionen [t/kWh]</li> <li>• Klimapotenzial [CO<sub>2</sub>-äquiv./kWh]</li> <li>• Schalldruckpegel [dB]</li> <li>• Beschattungszeit [h/y]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
		A.4	Abfälle, besonders Problemabfälle und deren Behandlung	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Art der Entsorgung [Recycling, Deponie]</li> </ul> Unterstützend: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidungsmöglichkeit [ja/nein]</li> <li>• Kreislaufführung [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menge GFK [t/kWh]</li> <li>• Menge CFK [t/kWh]</li> <li>• Menge Elektronikschrott [t/kWh]</li> <li>• Menge und Art Abfall durch Tausch/Wartung [t/kWh]</li> </ul>
	Risiken (Standort)	A.5	Fehlertoleranz der Anlage	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorsorgemaßnahmen [ja/nein]</li> <li>• Unfallwahrscheinlichkeit [groß/klein]</li> <li>• Schadensdimension [groß/klein]</li> <li>• Blitzschutzkonzept [ja/nein]</li> <li>• Sturmsicherung [ja/nein]</li> <li>• Standsicherheit Fundament vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Einhausung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Eiserkennungssystem vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Rotorblattheizung vorhanden [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unfallwahrscheinlichkeit [%]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
	Herstellung der Anlagenteile	A.6	Ressourcenverbrauch und Emissionen an die Kompartimente Wasser, Luft und Boden (Anlagenteile + Transport von Herstellungsort Anlagenteil bis Herstellungsort Anlage)	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kritikalität der Rohstoffe [ja/nein]</li> <li>• Konfliktrelevante Rohstoffe [ja/nein]</li> <li>• Toxische Betriebsstoffe [ja/nein]</li> <li>• Art der Emissionen entlang der Wertschöpfungskette [CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>...]</li> <li>• Wirkungskategorien [Klima...]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeinsatz entlang der Wertschöpfungskette (falls nicht bei A.1 berücksichtigt) [kWh/kWh]</li> <li>• Rohstoffe kritisch [t/kWh]</li> <li>• Rohstoffe konfliktrelevant [t/kWh]</li> <li>• Flächeninanspruchnahme [m<sup>2</sup>/kWh]</li> </ul>
	Arten	A.8	Verdrängung und Kollision	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einhausung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Fledermausschaltung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Bewirtschaftungsmanagement umliegender Flächen [ja/nein]</li> </ul>
<b>B</b> Sicherung und Qualität der Beschäftigung	Anlage	B.1	Gefährdung der Arbeitnehmer:innen (Sicherheit am Arbeitsplatz) & Anlagenbetreiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unfallwahrscheinlichkeit (Montage, Wartung) [ja/nein, groß/klein]</li> <li>• Vorsorgemaßnahmen geplant [ja/nein]</li> <li>• Angaben über Fehlertoleranz [ja/nein]</li> </ul>
<b>C</b> Wissen	Zu bildende Ressourcen	C.1	Forschung und Weiterentwicklung der Technologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weitergabe von Erfahrungswerten</li> <li>• Monitoring</li> </ul>
		C.2	Anwendung von bestehendem Wissen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einbeziehung erfahrener Akteure</li> </ul>
	Kulturelle und individuelle Identität	D.4	Beitrag zur Energieautarkie	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beitrag zur regionalen Versorgungssicherheit [ja/nein]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
E Akteursinteraktionen	Kooperationsformen		Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette (Rohstoffe/Halbzeuge/Zulieferer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommunikation [ja/nein]</li> <li>• Entscheidungen werden inklusiv/diskursiv getroffen [ja/nein]</li> <li>• Konfliktmaterialien [ja/nein]</li> </ul>
			div. Indikatoren für Wirtschaftlichkeit der Anlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamische Investitionsrechnung (Kapitalwert, interner Zinssatz, Amortisationsdauer) aus Sicht Anlagenbetreiber:in/Investor:in Stromgestehungskosten</li> </ul>

### 8.8.5. Auswertung

Für die Auswertung wurde eine umfangreiche Matrix erstellt, welche die Kriterien und die verschiedenen Betriebsszenarien für die unterschiedlichen Anlagen enthält. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in MS Excel (Version 2016), die Darstellung der Ergebnisse in Form von Netzdiagrammen. Der als IST-Zustand titulierte Referenzzustand stellt die Stromversorgung aus dem Netz dar. Im Vergleich zu diesem IST-Zustand wurde die Bewertung der Auswirkungen der jeweiligen KWEA montiert auf Flachdach, Giebeldach und freistehendem Mast dargestellt. Die Möglichkeit des Netzausbaus stand nicht im Fokus der Untersuchungen.

### 8.8.6. Ergebnisse - Gesamtbewertung der Anlagen

Die Bewertung (siehe Abbildung 81) zeigt in vielen Bereichen eine Verbesserung der Situation gegenüber dem IST-Zustand (rot markierter Bereich bzw. Null-Linie).

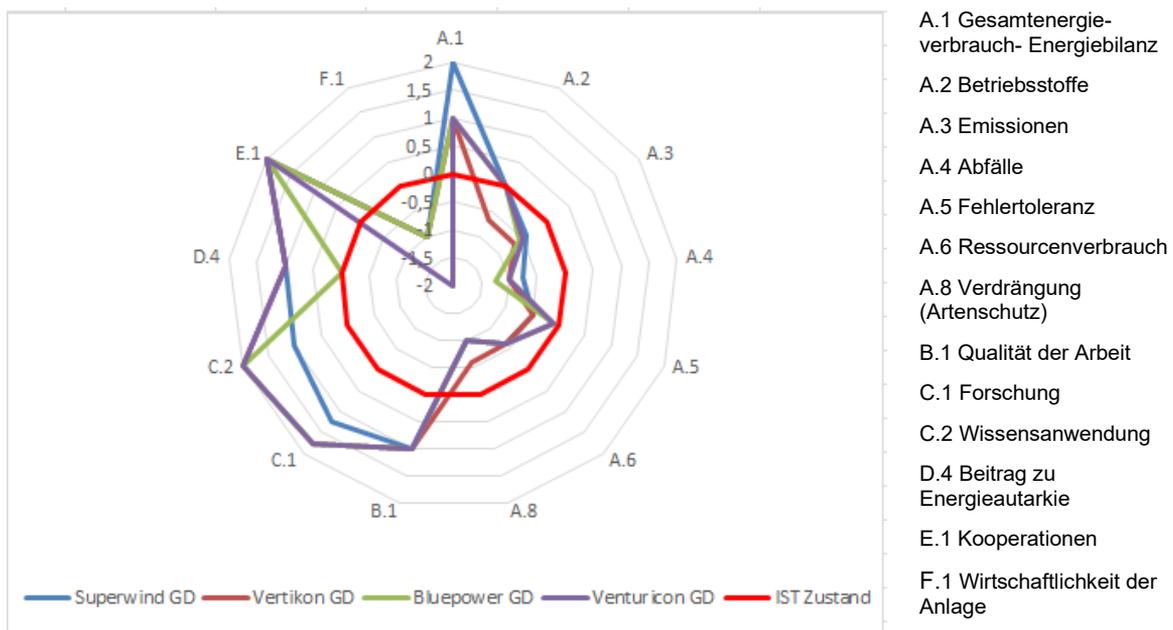


Abbildung 81: Ausprägungen der an den KWEAs (Giebeldach) untersuchten Kriterien

Der Gesamtenergieverbrauch (A.1) zeigt, dass sich alle untersuchten KWEAs innerhalb ihrer Lebensdauer energetisch amortisieren können. Hier liegt die niedrigste Dauer, aufgrund der höheren Erträge, jeweils beim Betrieb auf dem Giebeldach, die höchste aufgrund des erhöhten Materialaufwandes beim Betrieb auf dem freistehenden Mast. Ausnahme bildet hier die KWEA BlueOne; diese kann aufgrund der niedrigeren Erträge keine Amortisation auf dem freistehenden Mast erreichen. Das gleiche gilt auch für die CO<sub>2</sub>-Amortisation der KWEAs. Damit ist auch von allen KWEAs ein, wenn auch durch eine einzelne Anlage nur geringer, Beitrag zur Energieautarkie (D.4) zu erwarten – wobei für die KWEA Venturicon auf dem freistehenden Mast keine Werte vorliegen.

Ein hoher Direktnutzungsanteil verkürzt die ökonomische Amortisationszeit (F.1) – diese liegt jedoch unter den gegebenen Rahmenbedingungen weiterhin außerhalb der Lebensdauer. Die Arbeitsbedingungen bei der Herstellung der Anlagenteile (B.1) sind überwiegend gut bewertet – der größte Teil der Herstellung findet dabei überprüfbar in Europa statt. Da es sich bei der vorliegenden

Untersuchung um ein Forschungsprojekt handelt, sind Wissenstransfer und Forschung (C.1, C.2) als sehr gut zu bewerten. Im Projekt wurden Entscheidungen diskursiv und kooperativ getroffen, was ebenfalls positiv zu bewerten ist (E.1), da so tragfähigere Ergebnisse zu erwarten sind.

Mit Ausnahme der KWEA Vertikon M sind berücksichtigbare Mengen an petrochemischen Betriebsstoffen (Möglichkeit des Austritts von mineralischen Schmierstoffen), die auch nicht im Kreislauf geführt werden, nicht zu verzeichnen (A.2). Toxische Betriebsstoffe werden in keiner der Anlagen eingesetzt.

**Optimierungsbedarf** besteht bei allen Anlagen in mehreren Bereichen.

Im Bereich der Emissionen (A.3) sind hier in erster Linie licht- und schallbedingte Emissionen zu nennen. Wobei zu sehen ist, dass der Diskoeffekt neben kleineren Rotorflächen (Vertikon M, Venturicon) auch durch Ummantelungen reduziert ist (Vertikon M, Venturicon). Die Schallemissionen liegen bei allen KWEAs bei Windgeschwindigkeiten bis 6 m/s unter dem Grenzwert für urbane Siedlungsgebiete bei Nacht – 45 dBA energieäquiv. Schallpegel bei 20 m Abstand. Bei höheren Windgeschwindigkeiten liegen sie darüber. Jedoch ist hier zu berücksichtigen, dass dies selten zu erwarten ist und im Falle des Auftretens der Umgebungslärm durch Wirbelablösungen an Objekten ebenfalls ansteigt. Die Datenlage für Körperschall lässt aufgrund fehlender Messungen nur Vergleiche, keine absoluten Werte zu. Aus Sicht von Gebäudenutzer:innen ist jedoch erkennbar, dass ein Giebeldach, das im Falle einer Holzbalkenkonstruktion einen höheren Dämpfungsgrad aufweist, im Vergleich weniger Infra- und Körperschall durch eine darauf montierte KWEA im Gebäude zulässt als ein Flachdach.

Bei Infraschall liegen die Messwerte jedenfalls bei allen Anlagen unterhalb der Grenzwerte, wobei die KWEA Vertikon M die höchsten Werte aufweist. Körperschall (akustischer Schall) liegt mit 60 bis 80 dBA über den zulässigen Grenzwerten. Die Messergebnisse sind jedoch aufgrund fehlender Umgebungsschallmessung nicht belastbar.

Über Recycling und Entsorgung (A.4) liegen keine Daten vor. Aufgrund der verwendeten Materialien ist davon auszugehen, dass sowohl Recycling, bei Stahl, Kupfer, Elektronik, als auch Deponierung bei GFK der Rotorblätter) vorgenommen werden. Dazu kommt eine nicht unerhebliche Menge Elektroschrott. Hier könnte ein ausgereiftes Recyclingkonzept zu einer positiveren Bewertung führen.

Die Unfallwahrscheinlichkeit (A.5) wurde bei allen KWEAs durch verschiedene Maßnahmen gesenkt (Einhausungen, Blitzableiter, Statik usw.). Dennoch bestehen weitere Risiken wie z. B. herabfallende Anlagenteile oder Eis. Hier ist auch die Größe der Rotorblätter mitentscheidend für das Risiko, wobei hier die KWEA Superwind und Vertikon M ohne Einhausung das höhere Risiko aufweisen. Dieses kann in Bezug auf Eiswurf reduziert werden, indem Eiserkennungssensoren eingesetzt werden.

Entlang der Wertschöpfungskette, bei der Herstellung der Grundmaterialien für die Endfertigung, sind bei allen KWEAs toxische, kritische und konfliktrelevante Rohstoffe eingesetzt (A.6).

Zu Verdrängung und Gefährdung von Tieren (A.8), liegt für die Kleinwindkraft eine Studie für den ländlichen Raum zu Kollisionsrisiko, Schlagrisiko und Verhaltensänderung vor (Thomsen et al. 2020). Das Fazit für die Untersuchungsregion zeigt ein vergleichsweise hohes Risiko für Vögel und geringe (keine) Auswirkung auf Fledermäuse. Eine Übertragung auf andere Regionen oder bebauten Gebiet wurde noch nicht vorgenommen. Auf dieser Basis wurde in der Bewertung eine mittlere Gefährdung angenommen – wobei in Zukunft eventuell mit Blick auf Einhausungen und andere bauliche

Unterschiede Differenzierungen vorgenommen werden müssen. Siedlungsgebiete und hier besonders Stadtränder mit ihrer hohen Artenvielfalt stellen bezüglich dieser Auswirkungen besonders sensible Gebiete dar.

Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen (F.1) ist in der aktuellen Situation (Förderungen, Investitionskosten...) bei keiner Anlage darstellbar.

Die Bewertung der vier KWEA montiert auf dem Flachdach und der KWEA Bluepower, Vertikon M und Superwind montiert auf dem freistehenden Mast zeigen in manchen Kriterien geringe Abweichungen in den Werten, das Gesamtbild, das Verbesserung und Optimierungsbedarf gegenüber dem IST Zustand darstellt, bleibt gleich.

Unterschiede zwischen den KWEA:

- Energiebilanz: Die KWEA Superwind zeigt eine bessere Performance im Vergleich zu den anderen Anlagen aufgrund ihrer kontinuierlich hohen Ertragswerte. Darüber hinaus ist der Materialaufwand aufgrund eines fehlenden Mantels und des höchsten Wirkungsgrads im Vergleich gering.
- Betriebsstoffe: Die KWEA Vertikon M zeigt hier eine schlechtere Performance als die übrigen drei KWEA aufgrund der eingesetzten Betriebsstoffe. Für die Schmierung der Rotorwelle wird auf Mineralöl basierendes Schmierfett eingesetzt, welches über einen Nachfüllstutzen in das Lager gepresst wird. Überschüssiges Fett kann austreten.
- Emissionen: In diesem Kriterium zeigen sich geringe Unterschiede: Die KWEA Superwind hat hier den besten Wert, darauf folgen die Anlagen Venturicon, Vertikon M und zuletzt Bluepower. Hier wirken sich die spezifischen Emissionen, also jeweils auf die erzeugte kWh bezogenen Emissionen positiv aus.
- Abfälle: Hier zeigt die KWEA Superwind, auch aufgrund der Bauart und damit des eingesetzten Materials, die geringsten Abfälle, danach folgen Venturicon und Vertikon, gefolgt von der KWEA Bluepower. Der Bezug zum Ertrag schlägt auch hier zu Buche.
- Fehlertoleranz: Die KWEA Vertikon M zeigt hier ein schlechteres Ergebnis als die übrigen KWEA. Systembedingt weist eine vertikalachsige Anlage unsymmetrische Lasten an den Rotoren auf. Dies führt zu Belastungen des Materials, speziell an den Rotorblattstreben und den Flanschen an den Rotorblättern. Während des Projekts sind Schadenmuster, welche auf dieses Lasten zurückzuführen sind, aufgetreten.
- Artenschutz: Die KWEA Venturicon und BlueOne zeigen hier aufgrund ihres Mantels, der einen gewissen Schutz gegen Kollision bietet, eine bessere Performance als die anderen KWEAs.
- Forschung: Der Wissenstransfer zu KWEA Superwind ist geringer als zu den die übrigen KWEAs.
- Wissensanwendung: s.o.
- Beitrag zur Energieautarkie: Aufgrund der Ertragswerte zeigt die KWEA BlueOne eine schlechtere Performance als die anderen KWEA.
- Wirtschaftlichkeit der Anlage: Für dieses Kriterium erreicht die KWEA Venturicon aufgrund der hohen Kosten pro kW installierter Leistung ein schlechteres Ergebnis als die übrigen die KWEA.

### 8.8.7. Ergebnisse - Einfluss der Dachform auf die Bewertung

Die Dachform zeigt geringen Einfluss auf die Bewertung. Vergleicht man die untersuchten Kriterien der KWEA unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dachformen, zeigen sich folgende Unterschiede:

Die Bewertung der KWEA Superwind (Abbildung 82 links) zeigt durch den höheren Ertrag bei Betrieb auf dem freistehenden Mast eine etwas bessere Bewertung der spezifischen Emissionen (A.3). Der gegenüber dem Betrieb auf dem Flachdach höhere Ertrag und geringere Vibrationen auf dem Giebeldach fällt so gering aus, dass die Auswirkungen in der Grafik nicht sichtbar sind. Der höhere Energie- und Materialeinsatz (A.1) auf für den freistehenden Mast wird durch höhere Erträge kompensiert.

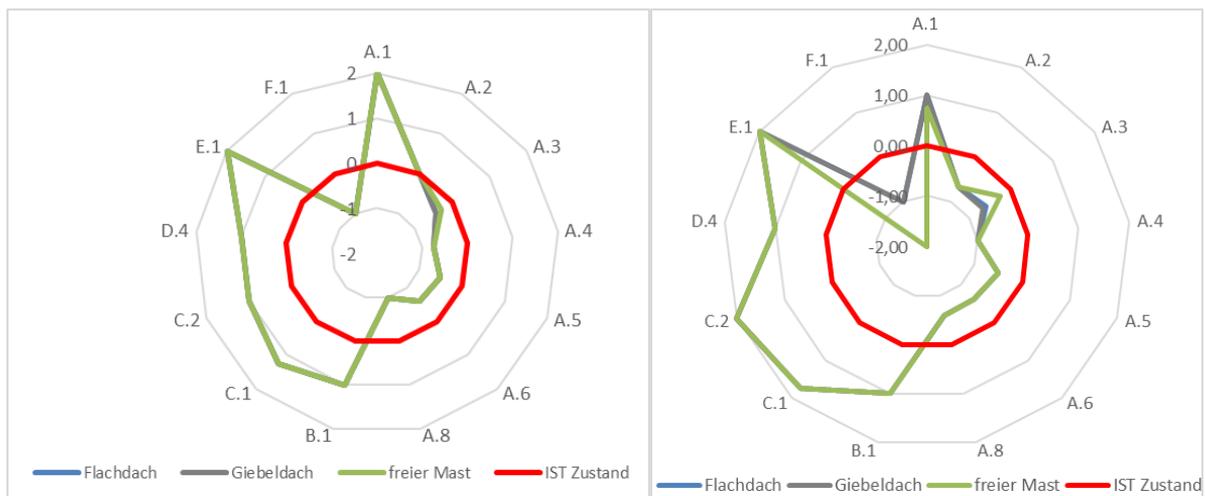


Abbildung 82: Ausprägungen der bewerteten Kriterien der KWEA Superwind (links) und der KWEA Vertikon (rechts)

Für die KWEA Vertikon M/Basis (Abbildung 82 rechts) fällt die Bewertung der Emissionen für die Montage auf dem Dach deutlich schlechter aus als für den Betrieb auf dem freistehenden Mast. Dies ist vor allem auf den bei dieser KWEA auftretenden Körperschall bei Dachmontage zurückzuführen. Die Bewertung der Energiebilanz zeigt die negativen Auswirkungen des höheren Material- und Energieeinsatzes für den freistehenden Mast. So zeigt die Montage auf dem freistehenden Mast ein schlechteres Ergebnis als auf dem Flach- und Giebeldach.

Die Bewertung der KWEA Bluepower BlueOne (Abbildung 82 links) zeigt ebenfalls die Verschlechterung der Energiebilanz bei Betrieb auf dem freistehenden Mast. Für Abfälle und Wirtschaftlichkeit der Anlage verschlechtert sich das Ergebnis unter Montage auf dem freistehenden Mast ebenfalls. Der Ertrag ist hier geringer als auf dem Gebäude und damit die spezifischen, auf den Ertrag bezogenen Werte schlechter. Die bessere Bewertung der Emissionen für den Betrieb auf dem Mast gibt vor allem die Unterschiede in der Übertragung von Körperschall wieder.

Die Bewertung der KWEA Venturicon (Abbildung 82 rechts) zeigt für Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit auf dem Flachdach ein besseres Ergebnis als auf dem Giebeldach. Dieser Unterschied lässt sich durch den Einfluss des besseren Ertrags dieser KWEA auf dem Flachdach erklären. Dieses Ergebnis zeigt auch, dass nicht alle Anlagentypen den Düseneffekt auf dem Giebeldach nutzen können.

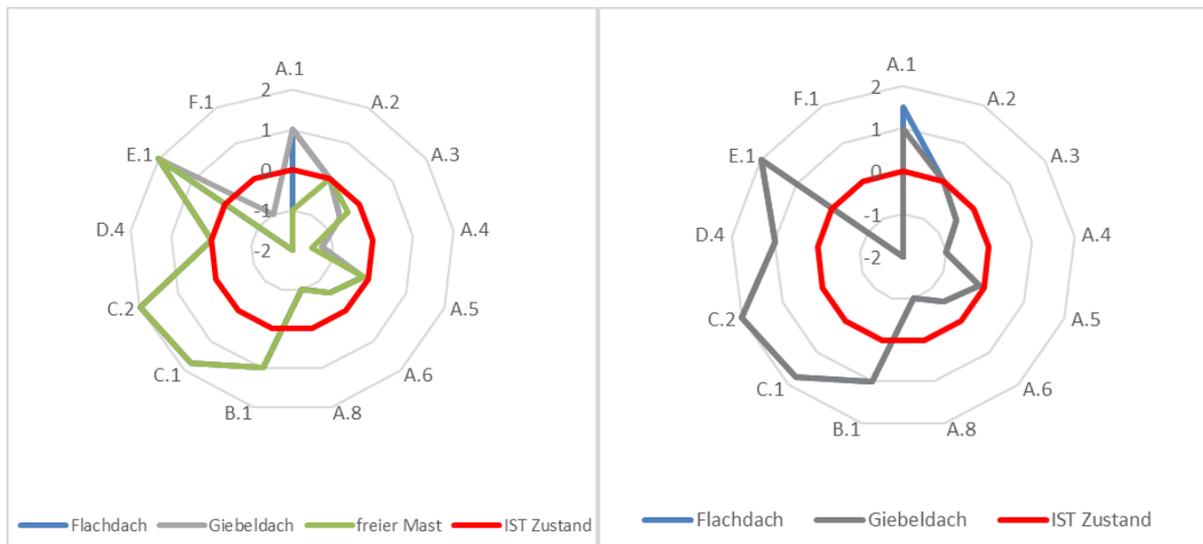


Abbildung 83: Ausprägungen der bewerteten Kriterien der KWEA Bluepower (links) und der KWEA Venturicon (rechts)

Generell konnte festgestellt werden, dass die positiven Effekte auf die Windgeschwindigkeit (Flachdach +7%, Giebeldach +2%) über den Dächern messtechnisch anhand der Leistung der Anlagen nicht nachgewiesen werden konnten und sich daher auch wenig bis kein Effekt auf die spezifischen Indikatoren feststellen lässt.

# 9 Evaluierung und Bewertung

## 9.1. Evaluierung der Strömungsbeeinflussung

Ein Ziel des Projektes war, die Eignung der beiden Modellansätze zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes zu demonstrieren sowie die Herangehensweise bei der Modellierung für zukünftige Anwendungen zu optimieren. Deswegen wurde den Ertrag bei Nordwest Strömung 330° mit einer normalen Rayleigh-Verteilung auf Basis der mittleren gemessenen Windgeschwindigkeit berechnet sowie auf Basis der mit MISKAM und OpenFOAM modellierten Windgeschwindigkeiten. Als Referenz diente immer jene Leistungskennlinie, die sich auf die Windgeschwindigkeit von MP1 auf einer Höhe von 7 m bezieht.

Superwind: Der gemessene und berechnete Ertrag für die KWEA Superwind ist in Abbildung 84 zu sehen. Für das Flachdach stimmt der auf Basis der modellierten Windgeschwindigkeiten berechnete Ertrag sehr gut mit dem gemessenen Ertrag überein. Somit zeigen beide Modelle ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes. Beim Giebeldach überschätzen die Modelle den gemessenen Ertrag deutlich, wobei OpenFOAM bessere Einschätzungen gibt. Ein Grund dafür ist die detailliertere Darstellung der Dachform in OpenFOAM im Gegensatz zu MISKAM.

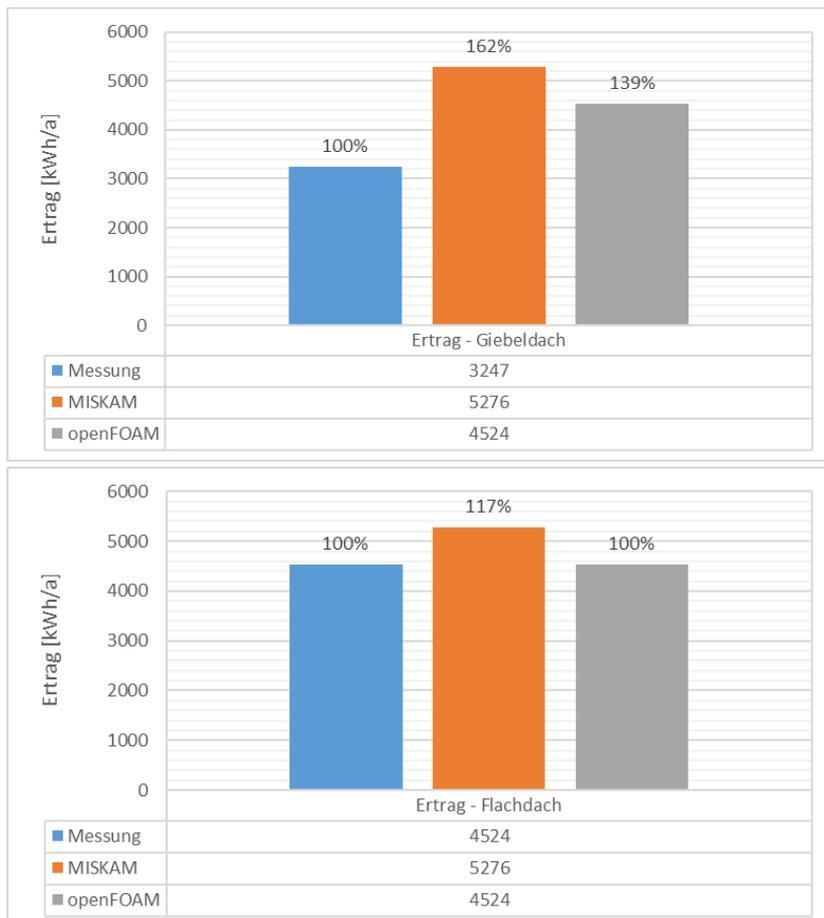


Abbildung 84: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Superwind.

**Vertikon M:** Der gemessene und berechnete Ertrag für die KWEA Vertikon M ist in Abbildung 85 dargestellt. Für das Flachdach stimmt der mit der auf Basis der modellierten Windgeschwindigkeiten berechnete Ertrag auch für diesen KWEA-Typ sehr gut mit dem gemessenen überein. Somit zeigen auch für die VertikoM KWEA beide Modelle ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes. Beim Giebeldach überschätzen die Modelle auch für diesen KWEA-Typ den gemessenen Ertrag deutlich.

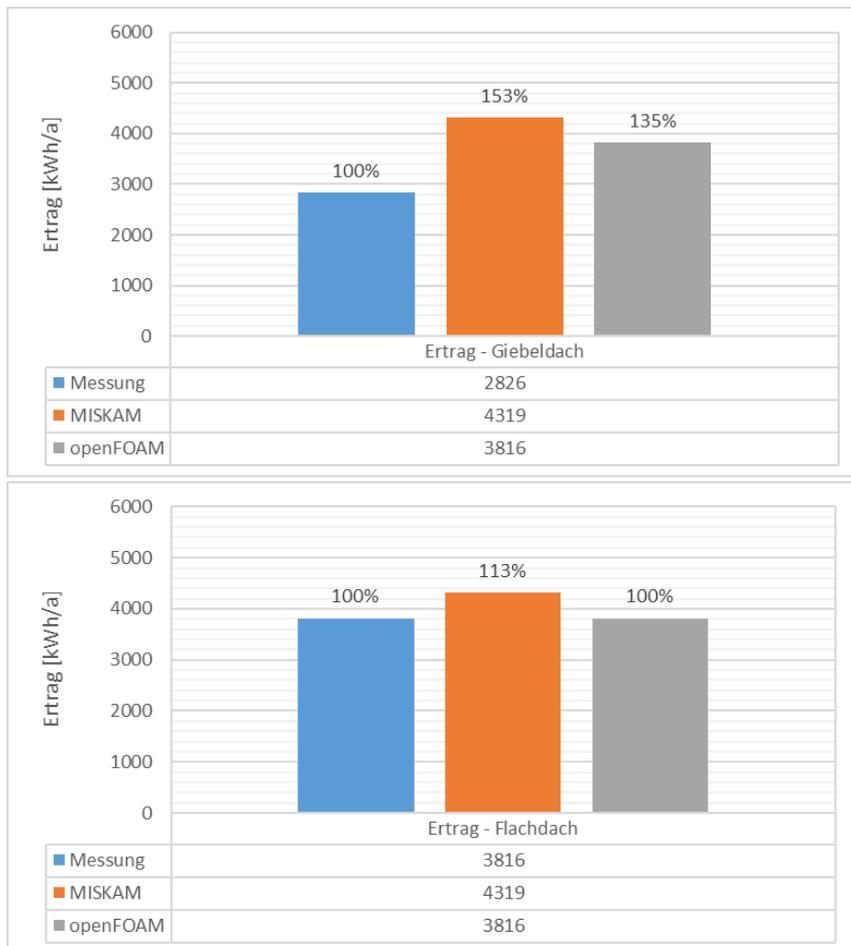


Abbildung 85: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Vertikon M.

**BlueOne:** Der gemessene und berechnete Ertrag für die KWEA BlueOne ist in Abbildung 86 dargestellt. Für Flachdach stimmt der mit den modellierten Windgeschwindigkeiten berechnete Ertrag auch für diesen KWEA-Typ sehr gut mit dem gemessenen Ertrag überein. Im Fall der KWEA BlueOne sind die über Giebeldach modellierten Windgeschwindigkeiten trotz leichter Überschätzungen geeignet, um den Ertrag in hinreichender Genauigkeit zu berechnen. Somit zeigen für die BlueOne beide Modelle ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes bei beiden Dachkonfigurationen.

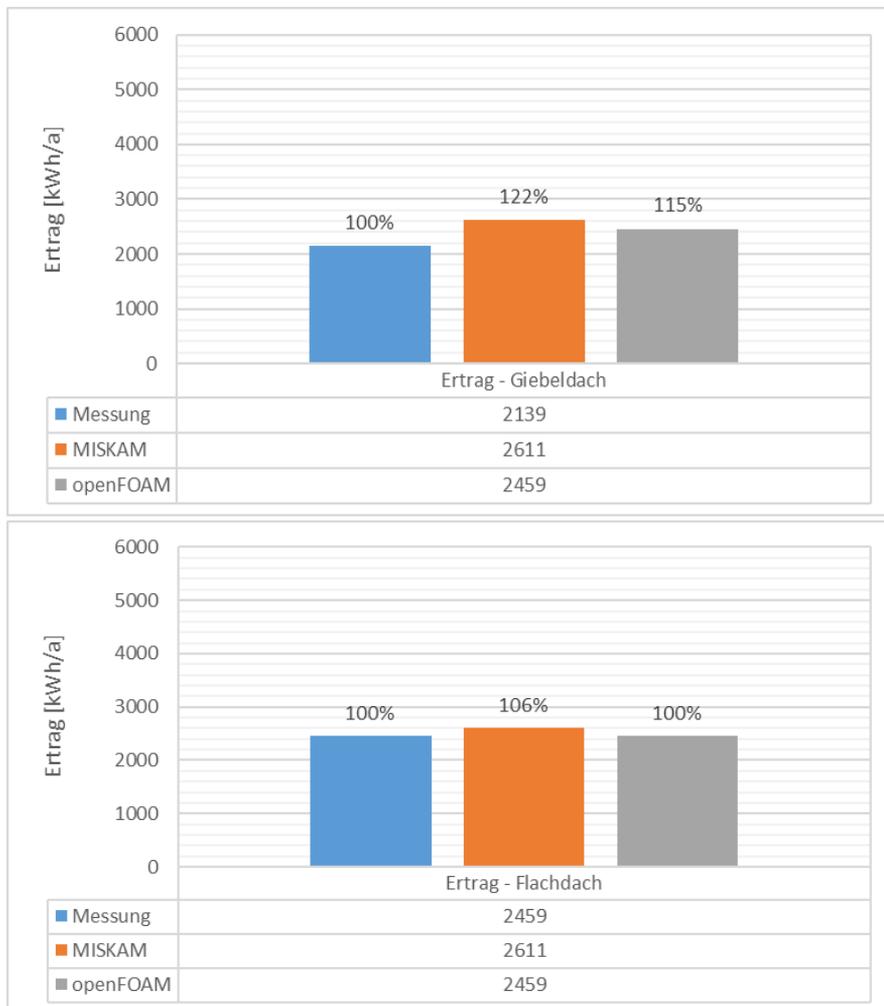


Abbildung 86: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (links) und über Flachdach (rechts) für die KWEA BlueOne

**KWEA Venturicon:** Der gemessene und berechnete Ertrag für die KWEA Venturicon ist in Abbildung 87 zu sehen. Auch für diesen KWEA-Typ stimmen die berechneten und gemessenen Ertragswerte über Flachdach gut überein. Somit zeigen auch für die Venturicon KWEA beide Modelle ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes. Beim Giebeldach überschätzen Ertragsberechnungen auf Basis der Windgeschwindigkeiten beider Modelle für diesen KWEA-Typ die gemessenen Ertragswerte am stärksten.

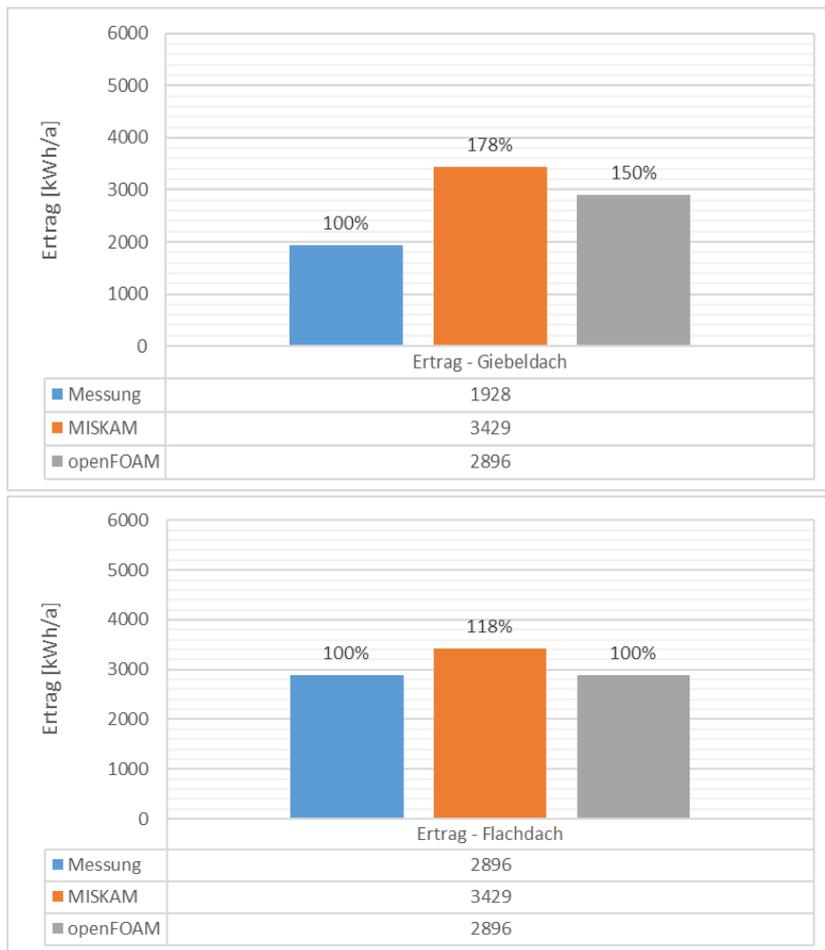


Abbildung 87: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebedach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Venturicon.

Anhand der Messungen und Modellberechnungen für zwei Gebäudeformen in Lichtenegg (Szenario 1 Flachdach und Szenario 2 Giebedach) können die folgenden Schlussfolgerungen über die Windsituation an derartigen Standorten bzw. über die Möglichkeiten geeigneter Methoden zur Standortbewertung für verschiedene Typen von KWEA getroffen werden:

**Szenario 1 Flachdach:** Über Flachdach stimmt der auf Basis der modellierten Windgeschwindigkeiten berechnete Ertrag für alle vier im Projekt getesteten KWEA-Typen (Superwind, Vertikon M, BlueOne und Venturicon) sehr gut mit dem gemessenen Ertrag überein. Somit zeigen beide Modelle ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes im Fall eines Gebäudes mit Flachdach.

**Szenario 2 Giebedach:** Beim Giebedach überschätzen die Ertragsberechnungen auf Basis der Strömungssimulationen bei allen KWEA-Typen mit Ausnahme von BlueOne den gemessenen Ertrag deutlich. Bei der KWEA BlueOne zeigen beide Modelle auch beim Giebedach ein sehr gutes Potenzial zur Bewertung eines potenziellen Standortes. Die Überschätzungen der Windgeschwindigkeit durch die Modelle könnten auch in diesem Fall durch Optimierung der Modelleingangsdaten deutlich reduziert werden. Zudem müsste für eine optimale Simulation des Strömungseinflusses dieser Dachform die Konfiguration des Rechengitters, insbesondere hinsichtlich der räumlichen Auflösung in Nähe des Dachbereichs deutlich erhöht werden. Bei dem Modell MISKAM stößt man hier jedoch aus modellphysikalischen Gründen auf Grenzen, die eine feine Gitterauflösung (unter einem Gitterabstand

von 1 m) nicht erlauben. Aufwändigere Strömungsmodelle, wie das Modell OpenFOAM, ermöglichen eine derartige Optimierung, jedoch auf Kosten der erforderlichen Rechenressourcen. Gegenwärtig erscheint ein derartiger zusätzlicher Modelleinsatz für eine Standortbegutachtung nicht praxistauglich. Dies wäre Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

Anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse konnte erwiesen werden, dass den Einsatz beider Modelle MISKAM und OpenFOAM zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes grundsätzlich möglich ist und vor allem bei Gebäuden mit Flachdach eine vergleichbar gute Ertragsprognose ermöglicht, wie die Durchführung einer zeitlich und räumlich repräsentativen Windmessung vom Ort. Es wurden Möglichkeiten der weiteren Optimierung der Modellanwendungen beziehungsweise der Standortbewertung aufgezeigt.

## **9.2. Evaluierung von Leistungskurve, Energieertrag und -prognosen**

Vorbereitend für die Analyse des energetischen und ökonomischen Potenzials gebäudemontierter KWEA wurden für alle vier KWEA im Projekt die Leistungskennlinien auf Flach- und Giebeldach sowie freistehend in Anlehnung an die Norm ermittelt. Darüber hinaus wurde eine normgerechte Leistungskennlinie für jede KWEA erstellt. Alle gemessenen Leistungskennlinien sind in Abbildung 88 ersichtlich.

Während für die Messungen am LK-Mast ein eigener, kalibrierter Windmessmast zur Verfügung stand, wurde für die Messungen am Giebel- und Flachdach sowie am freistehenden Mast MP1 als Referenz für die Windmessung verwendet. Da keine Kalibrierung zwischen MP1 und MP2 (= Standort der KWEA) erfolgt, kann die LK nicht als normgerecht bezeichnet werden.

Wie wichtig eine solche Kalibrierung ist, zeigt Tabelle 2 (Strömungsgeschwindigkeitsunterschiede zwischen MP1 und MP2). Wie dort ersichtlich, kommt es im Vergleich zur unbeeinflussten Strömung bei MP1, bei MP2 in Höhe der KWEA (7 m) sowohl beim Giebeldach als auch beim Flachdach zu einer Beeinflussung der Strömung, sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit als auch in Bezug auf den Anströmwinkel. Die Turbulenzintensität wird hingegen (zumindest im Vergleich zwischen MP1 und MP2) nicht beeinflusst. Beim freistehenden Mast kommt es zu keiner Beeinflussung der Strömung.

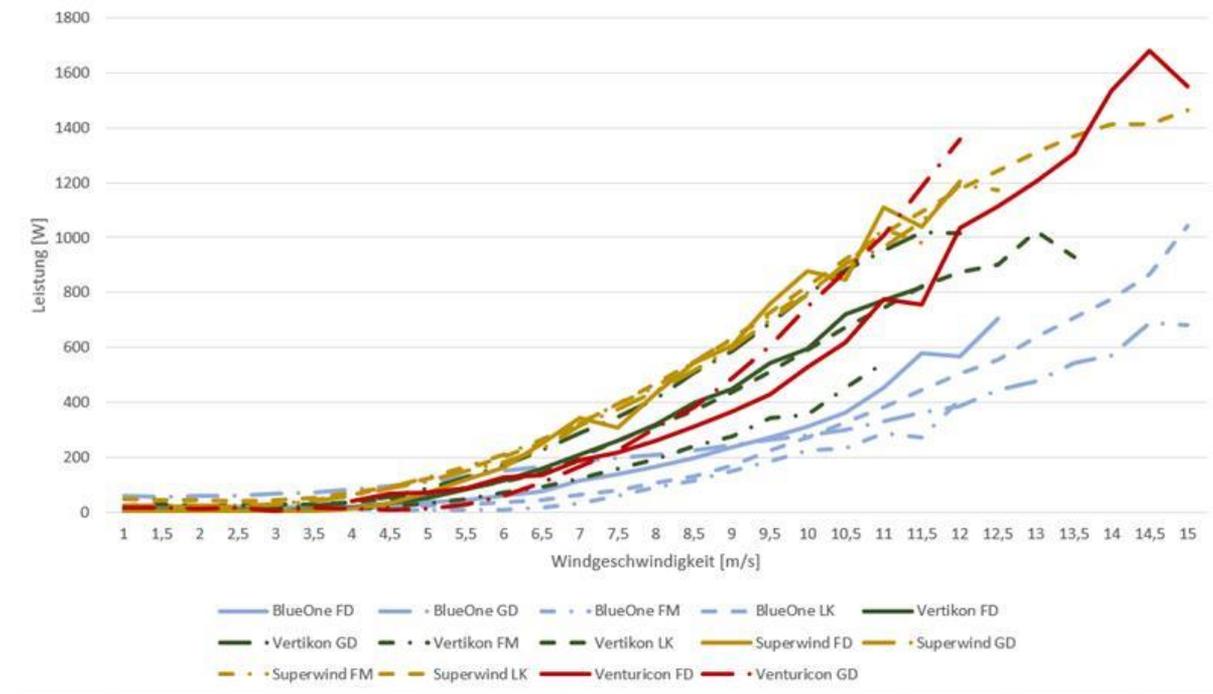


Abbildung 88: Leistungskennlinien der betrachteten KWEA und Montageformen

Da bei den Messungen am Giebel- und Flachdach bzw. am freistehenden Mast keine Kalibrierung erfolgte, kann die ermittelte Leistungskurve nicht als normgerecht bezeichnet werden. Es handelt sich um spezifische Leistungskennlinien, die sowohl das Verhalten der KWEA als auch den Einfluss der Montageform (FD, GD, freistehend) abbilden. Normgerechte LK zeigen hingegen nur das Verhalten der KWEA bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit. Das bedeutet, dass die am FD bzw. GD gemessene LK nur unter bestimmten Voraussetzungen zur Ertragsabschätzung verwendet werden kann: Ist die für die Ertragsabschätzung verwendete Windmessung auf einem freistehenden Mast erfolgt, kann theoretisch der Ertrag für eine Gebäudemontage abgeschätzt werden. Erfolgte die Windmessung jedoch auf einem Gebäude, ist eine Ertragsabschätzung auf Basis der am FD bzw. GD gemessenen LK nicht ratsam, da der Einfluss der Montageform doppelt berücksichtigt werden würde. Da im vorliegenden Fall die Windmessung auf einem freistehenden Mast erfolgte, kann theoretisch der Ertrag für eine Gebäudemontage abgeschätzt werden.

Umgekehrt bedeutet das natürlich auch, dass auf Basis der am LK-Mast normgerecht ermittelten LK und den an MP1 gemessenen Winddaten eine Ertragsabschätzung für Anlagen auf Flach- bzw. Giebeldach nur bedingt möglich ist, da der Einfluss der Montageform dabei nicht berücksichtigt wird. Hierfür wiederum ist eine Windmessung auf einem Gebäude (z. B. MP2) erforderlich.

### 9.2.1. BlueOne

Während Soll- und Ist-Ertrag am Flachdach sowie am Giebel- und Flachdach sowie am freistehenden Mast weitestgehend übereinstimmen, zeigt sich am LK-Mast ein etwas größerer Unterschied. Gründe dafür können auch hier z. B. frühzeitiges Abschalten bei hohen Windgeschwindigkeiten oder auch aufgetretene Störungen und damit verbundene Stillstandszeiten sein. Eine fundierte Aussage dazu kann jedoch auf Basis der verfügbaren Daten nicht getroffen werden. Wie in Abbildung 89 ersichtlich, konnten die Soll-Erträge bei 3 von 4 Messungen erreicht werden, was auf eine gute Performance der Anlage schließen lässt.

Tabelle 28: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für BlueOne

Dachform - Standort	Soll-Ertrag [kWh]	Ist-Ertrag [kWh]	Anteil erreicht [%]	Messzeitraum KWEA
Flachdach - Lichtenegg	185,2	182,3	101,5	13.08. - 06.12.2019
Giebeldach - Lichtenegg	109,6	105,5	96,4	18.12.2019 - 21.01.2020
Freistehend (LK) - Lichtenegg	103,2	73,4	71,1	14.06. - 06.12.2019
Freier Mast - Lichtenegg	19,6	19,6	99,9	07.10. - 23.10.2020

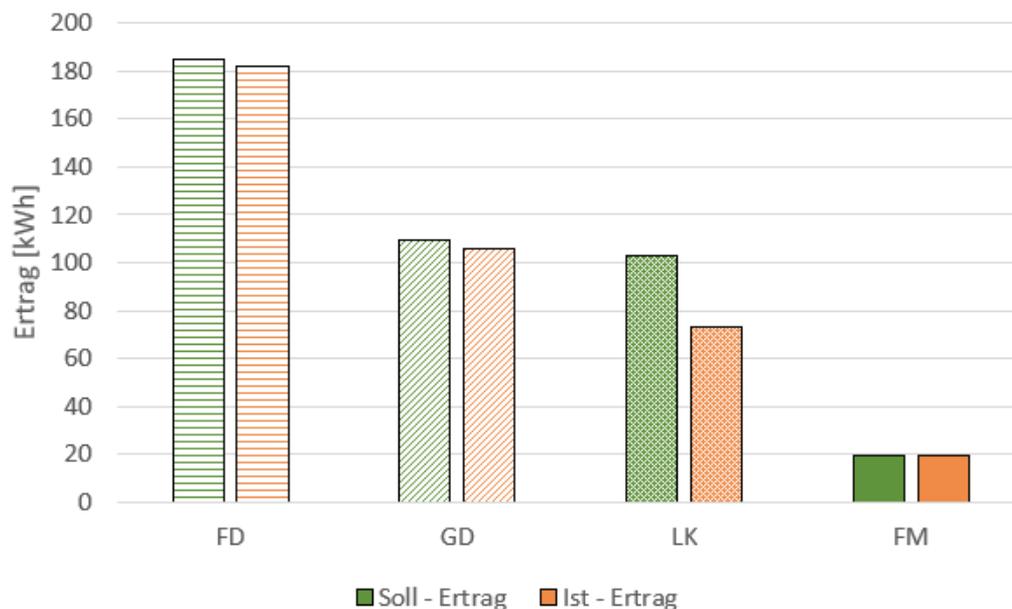


Abbildung 89: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA BlueOne im Messzeitraum

## 9.2.2. Vertikon M

Tabelle 29 und Abbildung 90 zeigen den Soll-/Ist-Vergleich im Messzeitraum. Während der Ist-Ertrag gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der ermittelten LK und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

Während Soll und Ist-Ertrag am Flachdach sowie am LK-Mast sowie am Flachdach weitestgehend übereinstimmen, zeigt sich am Giebeldach doch ein deutlicher Unterschied. Wie in Abbildung 90 ersichtlich, erzeugt die KWEA am Giebeldach deutlich weniger, als aufgrund der Berechnung zu erwarten gewesen wäre. Gründe dafür können z. B. frühzeitiges Abschalten bei hohen Windgeschwindigkeiten oder auch aufgetretene Störungen und damit verbundene Stillstandszeiten sein. Eine fundierte Aussage dazu kann jedoch auf Basis der verfügbaren Daten nicht getroffen werden.

Tabelle 29: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Vertikon M

Dachform – Standort	Soll-Ertrag [kWh]	Ist-Ertrag [kWh]	Anteil erreicht [%]	Messzeitraum KWEA
Flachdach – Lichtenegg	250,7	223,3	89,1	09.04. – 09.08.2019
Giebeldach – Lichtenegg	319,9	206,4	64,5	26.01. – 09.04.2019
Freistehend (LK) – Lichtenegg	264,4	253,18	95,8	01.04. – 01.08.2018
Freier Mast – Lichtenegg	21,5	12,5	58,2	18.06. – 26.06.2020

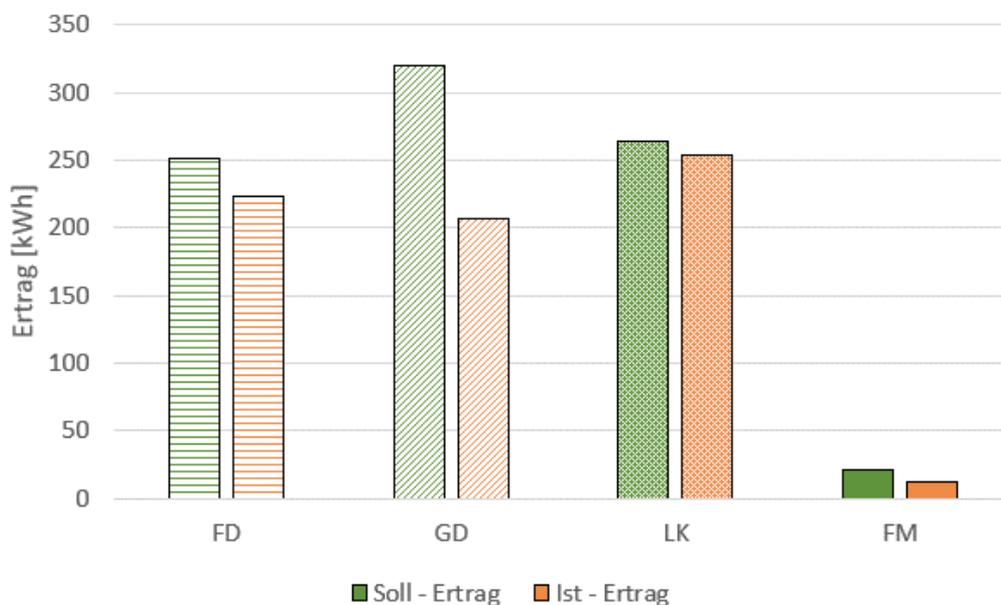


Abbildung 90: Soll-/Ist-Ertrag der Vertikon M im Messzeitraum

Am freistehenden Mast sind die Erträge aufgrund des kurzen Messzeitraums zu gering für einen aussagekräftigen Vergleich. Wie in Abbildung 90 ersichtlich, konnten die Soll-Erträge bei 2 von 3 Messungen erreicht werden, was auf eine zufriedenstellende Performance der Anlage schließen lässt.

### 9.2.3. Superwind

Tabelle 30 und Abbildung 91 zeigen den Soll-/Ist-Vergleich im Messzeitraum. Während der Ist-Ertrag gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der ermittelten LK und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

Tabelle 30: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Superwind

Dachform - Standort	Soll-Ertrag [kWh]	Ist-Ertrag [kWh]	Anteil erreicht [%]	Messzeitraum KWEA
Flachdach - Lichtenegg	0,51	0,49	96	19.11. – 01.12.2020
Giebeldach - Lichtenegg	432,68	314,34	73	10.04. – 06.12.2019
Freistehend (LK) - Lichtenegg	805,36	612,97	76	1.12.2019 – 30.4.2020
Freier Mast - Lichtenegg	82,09	43,13	60	9.12.2020 – 10.1.2021

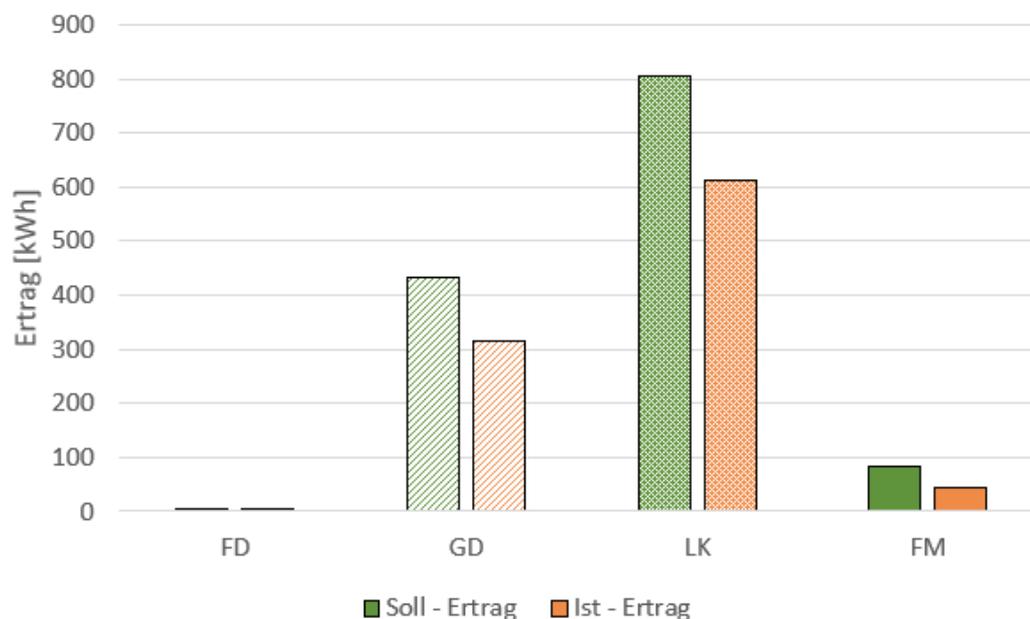


Abbildung 91: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA Superwind im Messzeitraum

Sowohl am Giebeldach als auch am freistehenden Mast und am LK-Mast liegt der Ist-Ertrag teilweise deutlich unter dem berechneten Soll-Ertrag. Gründe dafür können auch hier z. B. frühzeitiges Abschalten bei hohen Windgeschwindigkeiten oder auch aufgetretene Störungen und damit verbundene Stillstandszeiten sein. Am freistehenden Mast sind die Erträge aufgrund des kurzen Messzeitraums zu gering für einen aussagekräftigen Vergleich. Somit konnten wie in Abbildung 91 ersichtlich die Soll-Erträge bei keiner der Messungen erreicht werden. Die Performance der Anlage ist daher ausbaufähig.

#### 9.2.4. Venturicon

Tabelle 31 und Abbildung 92 zeigen den Soll-/Ist-Vergleich im Messzeitraum. Während der Ist-Ertrag gemessen wurde, wurde der Soll-Ertrag anhand der ermittelten LK und der im Messzeitraum gemessenen Windgeschwindigkeiten errechnet.

Tabelle 31 Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Venturicon

Dachform - Standort	Soll-Ertrag [kWh]	Ist-Ertrag [kWh]	Anteil erreicht [%]	Messzeitraum KWEA
Flachdach - Lichtenegg	0,781	0,761	97	01.09 – 01.09.2020
Giebeldach - Lichtenegg	199,99	122,76	61	03.09 – 24.11.2020

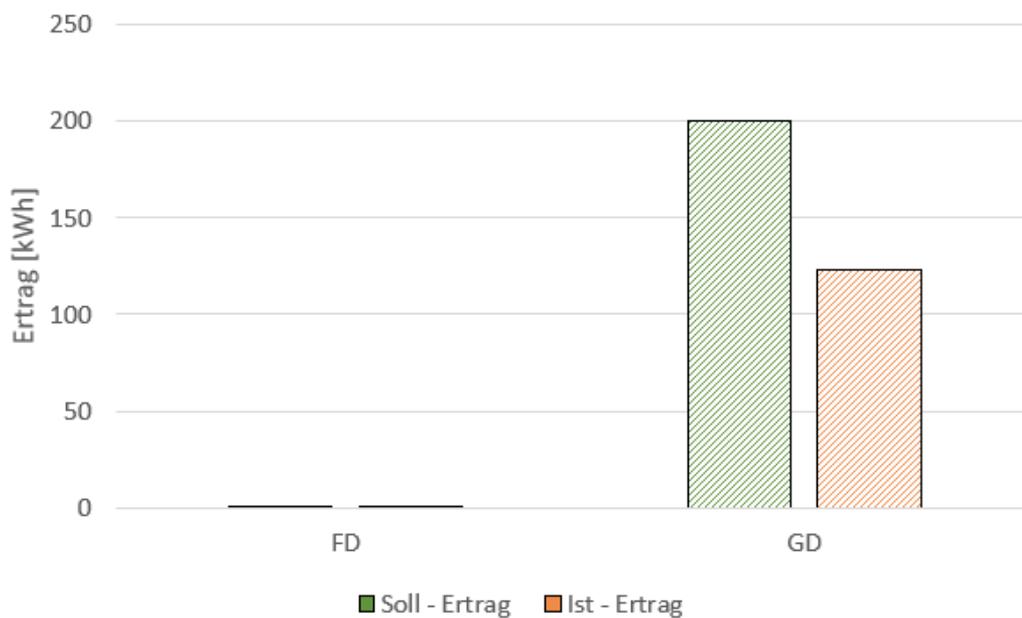


Abbildung 92: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA Venturicon im Messzeitraum

Am Giebeldach liegt der Ist-Ertrag deutlich unter dem berechneten Soll-Ertrag. Gründe dafür können auch hier z. B. frühzeitiges Abschalten bei hohen Windgeschwindigkeiten oder auch aufgetretene Störungen und damit verbundene Stillstandszeiten sein. Die Performance der Anlage ist daher ausbaufähig.

Am Flachdach sind die Erträge aufgrund des kurzen Messzeitraums zu gering für einen aussagekräftigen Vergleich.

### 9.3. Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Kosten: Um die Wirtschaftlichkeit einer KWEA zu ermitteln, müssen die Erträge sowie die Kosten (Investitionskosten, Betriebskosten, ...) erhoben werden. Zu den Kosten gehören unter anderem die Kosten für

- Windturbine mit Generator
- Mast
- Gleichrichter
- Wechselrichter
- Stoppschalter
- Messgeräte
- Überspannungs- und Überdrehzahlenschutz
- Elektronische Netzfreeschaltstelle
- Anschlusskabel
- Blitzschutz
- Transport und Montage
- Anmeldung bei Netzbetreiber
- Versicherung
- Förderung (als Einsparung)

Für die Wirtschaftlichkeit der ausgewählten KWEA wurden die Investitionskosten direkt bei den Herstellern erhoben (siehe Tabelle 32). Die Kosten für eine Dachmontage sind dabei als Richtwerte zu verstehen, da diese stark von den tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort (Dachart, -alter, Statik, ...) abhängen. Den Einschätzungen der befragten Hersteller bzw. Expert:innen zufolge, betragen die Mehrkosten im Vergleich zu freistehenden Anlagen ca. EUR 2.000 bis 3.000.

Für einen besseren Vergleich der Investitionskosten der untersuchten Anlagen wurden zusätzlich die spezifischen Kosten pro m<sup>2</sup> Rotorfläche bzw. pro kW angeführt.

Tabelle 32: Investitionskosten in EUR (inkl. MWSt.)

	Flachdach	Giebeldach	Freier Mast
<b>Vertikon M [EUR]</b>	21.950,0	21.950,0	17.100,0
pro m <sup>2</sup> Rotorfläche [EUR/m <sup>2</sup> ]	3.810,8	3.687,8	2.873,0
pro kW [EUR /kW]	23.105,3	23.105,3	18.000,0
<b>BlueOne [EUR]</b>	11.846,8	13.172,9	11.895,4
pro m <sup>2</sup> Rotorfläche [EUR /m <sup>2</sup> ]	5.527,0	6.145,7	5.549,7
pro kW [EUR /kW]	11.846,8	13.172,9	11.895,4
<b>Superwind [EUR]</b>	16.525,8	17.851,9	16.574,4
pro m <sup>2</sup> Rotorfläche [EUR /m <sup>2</sup> ]	3.653,0	3.946,1	3.663,7
pro kW [EUR /kW]	13.220,6	14.281,5	13.259,5
<b>Venturicon [EUR]</b>	22.536,8	23.862,85	22.585,4
pro m <sup>2</sup> Rotorfläche [EUR /m <sup>2</sup> ]	8.007,6	8.478,7	8.024,8
pro kW [EUR /kW]	19.597,2	20.750,3	19.639,5

(potenzieller) Jahresenergieertrag: Ist der Jahresertrag nicht bekannt, muss dieser berechnet werden. Die Jahresenergieproduktion (AEP) wird mittels einer normgerecht ermittelten Leistungskennlinie sowie der Häufigkeitsverteilung des Windes am geplanten Standort errechnet. Formel [4] zeigt die Berechnung des AEPs.

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^v f_{Häufigkeit-v_i} * P_{v_i} [4]$$

Die Stromgestehungskosten können mit der Annuitätenmethode berechnet werden. Dabei werden die Investitionskosten in jährliche Zahlungen (Annuitäten) aufgeteilt. Die Annuitäten ergeben sich aus dem Produkt des Annuitätenfaktors, der über die Lebensdauer und dem Zinssatz berechnet wird, und den Investitionskosten. Die Stromgestehungskosten ergeben sich, wenn dieses Produkt durch die Volllaststunden dividiert wird.

Lebensdauer: Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Berücksichtigung der korrekten Lebensdauer. In der Regel geben Hersteller bei KWEA eine Lebensdauer von 10 bis 30 Jahren an (Halbhuber 2014). Daher wurde für die Berechnung der Stromgestehungskosten (LCOE<sup>1</sup>) eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen.

### 9.3.1. BlueOne

Abbildung 93 zeigt den errechneten Jahresenergieertrag der BlueOne für die Standorte Lichtenegg (MP1: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 4,71 m/s, LK-Mast: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 5,22 m/s) und ENERGYbase (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 3,48 m/s). Der höchste Jahresertrag ist dabei mit über 1.000 kWh am Giebeldach zu erwarten. Der Grund dafür ist die ermittelte LK (siehe Abbildung 54), die im Windgeschwindigkeitsbereich bis 6 m/s unrealistisch hohe Leistungsdaten enthält. Es ist daher anzunehmen, dass nicht die berechnete Jahresenergieerzeugung am Giebeldach, sondern jene am Flachdach bzw. am LK-Mast (etwa 600 kWh) das realistische Leistungsvermögen der KWEA abbilden. Der geringste Ertrag ist auch hier auf der ENERGYbase zu erwarten.

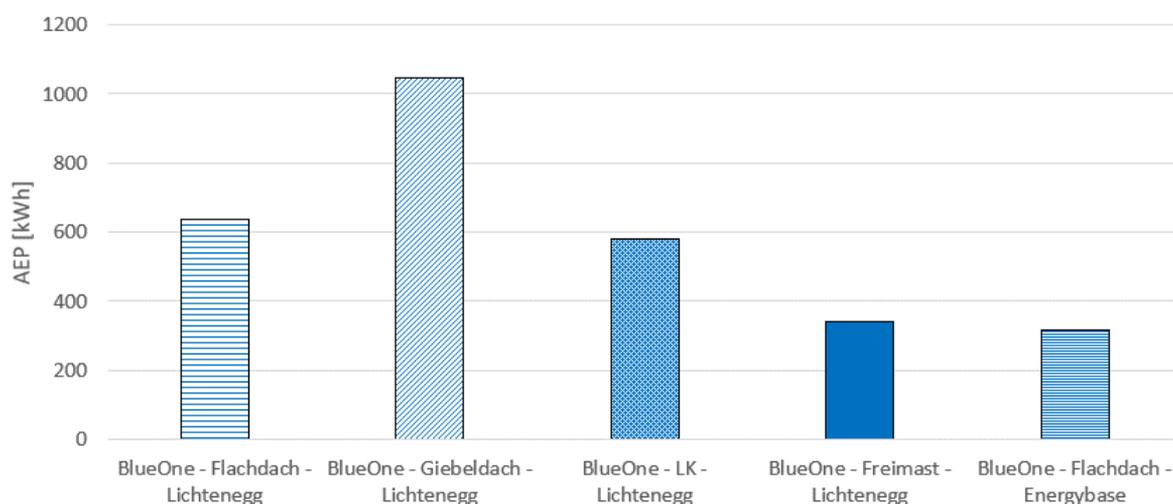


Abbildung 93: Jahresenergieproduktionen (AEP) BlueOne

<sup>1</sup> Levelized Cost of Electricity

Abbildung 94 zeigt die Stromgestehungskosten für die BlueOne, die auf Basis des errechneten Jahresenergieertrages sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren berechnet wurden. Mit Stromgestehungskosten von ca. 60 Cent / kWh am Giebeldach bzw. 90 Cent / kWh ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage in Österreich (Opportunitätskosten 20,415 Cent / kWh<sup>2</sup>) selbst bei einem sehr hohen Eigenverbrauchsanteil außer Reichweite.

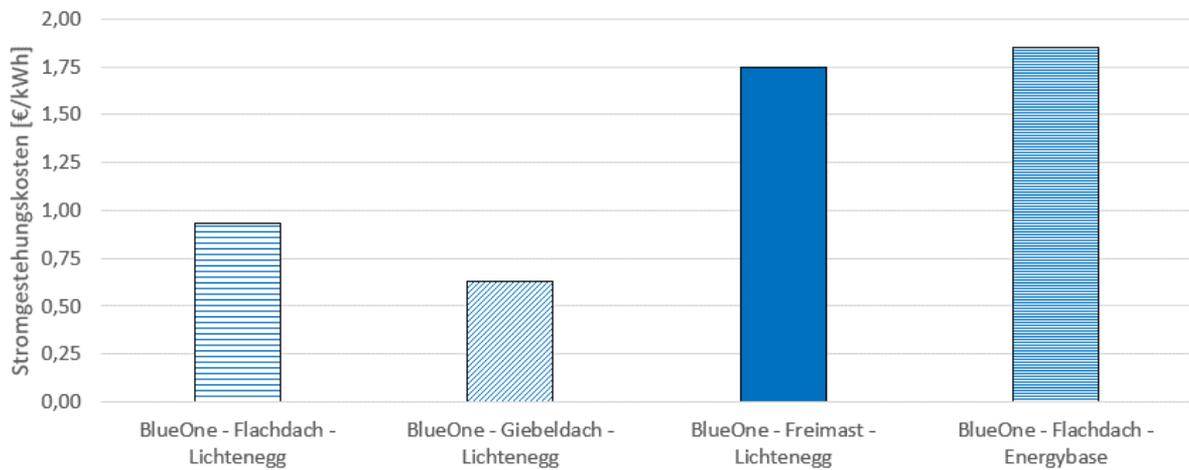


Abbildung 94: Stromgestehungskosten BlueOne

<sup>2</sup> <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>

### 9.3.2. Vertikon M

Abbildung 95 zeigt den errechneten Jahresenergieertrag der Vertikon M für die Standorte Lichtenegg (MP1: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 4,71 m/s, LK-Mast: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 5,22 m/s) und ENERGYbase (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 3,48 m/s). Die höchsten Jahreserträge sind am LK-Mast und am Giebeldach zu erwarten. Gründe dafür sind die höchste mittlere Jahreswindgeschwindigkeit am LK-Mast (+ 0,5 m/s im Vergleich zu MP1) sowie die höchste Leistungskennlinie am Giebeldach (siehe Abbildung 56). Der geringste Ertrag ist auf der ENERGYbase zu erwarten, da der Standort mit einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 3,48 m/s doch deutlich gegenüber Lichtenegg abfällt.

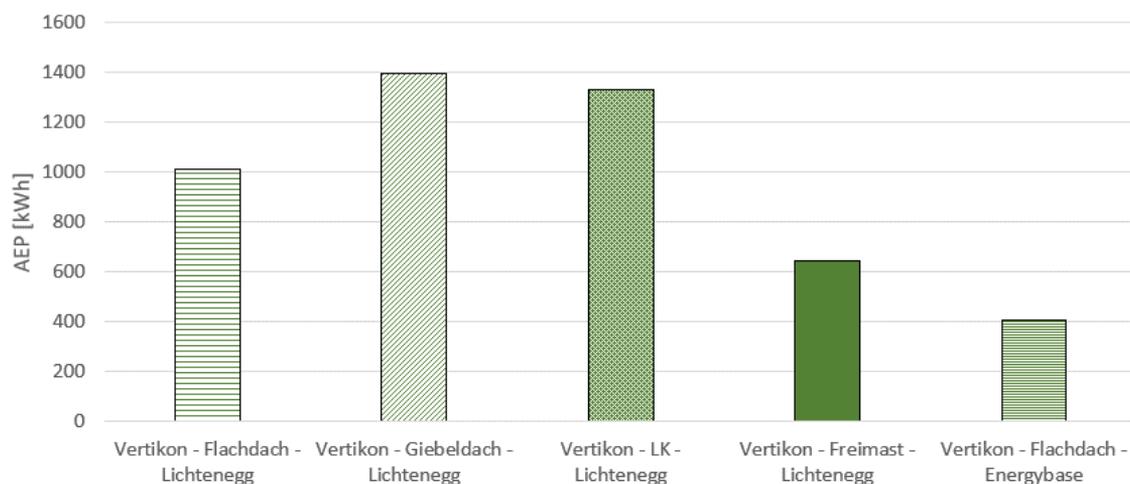


Abbildung 95: Jahresenergieproduktionen (AEP) Vertikon M

Abbildung 96 zeigt die Stromgestehungskosten für die Vertikon M, die auf Basis des errechneten Jahresenergieertrages sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren berechnet wurden. Mit Stromgestehungskosten von ca. 80 Cent / kWh am Giebeldach ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage in Österreich (Opportunitätskosten 20,415 Cent / kWh<sup>3</sup>) selbst bei einem sehr hohen Eigenverbrauchsanteil außer Reichweite.

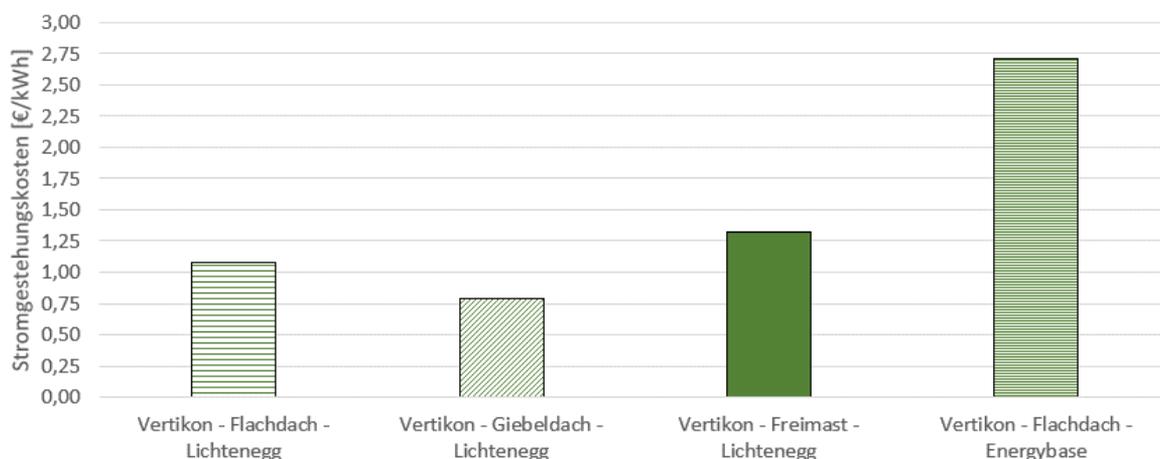


Abbildung 96: Stromgestehungskosten Vertikon M

<sup>3</sup> <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>

### 9.3.3. Superwind

Abbildung 97 zeigt den errechneten Jahresenergieertrag der Superwind für die Standorte Lichtenegg (MP1: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 4,71 m/s, LK-Mast: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 5,22 m/s) und ENERGYbase (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 3,48 m/s). Der höchste Jahresertrag ist dabei mit über 2.000 kWh am Giebeldach zu erwarten, gefolgt vom Giebel- und Flachdach sowie dem freistehenden Mast mit etwa 1.500 kWh. Die errechneten Jahresenergieerträge zeigen sehr gut den Einfluss der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit, da die LK sehr eng beisammen liegen und der Jahresenergieertrag daher primär durch den Standort beeinflusst wird.

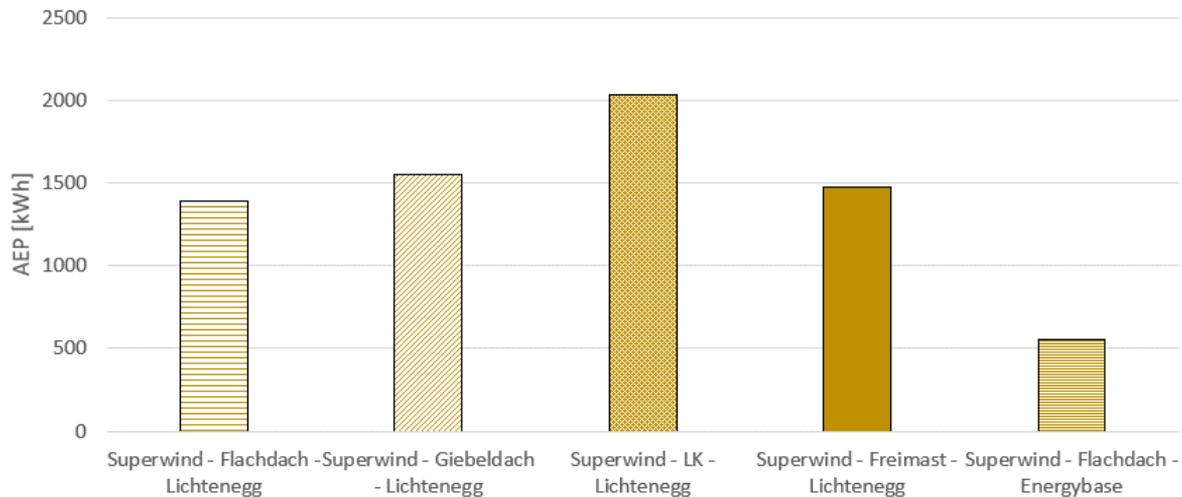


Abbildung 97: Jahresenergieproduktionen (AEP) Superwind

Abbildung 98 zeigt die Stromgestehungskosten für die Superwind, die auf Basis des errechneten Jahresenergieertrages sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren berechnet wurden. Mit Stromgestehungskosten von ca. 60 Cent / kWh ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage in Österreich (Opportunitätskosten 20,415 Cent / kWh<sup>4</sup>) selbst bei einem sehr hohen Eigenverbrauchsanteil außer Reichweite.

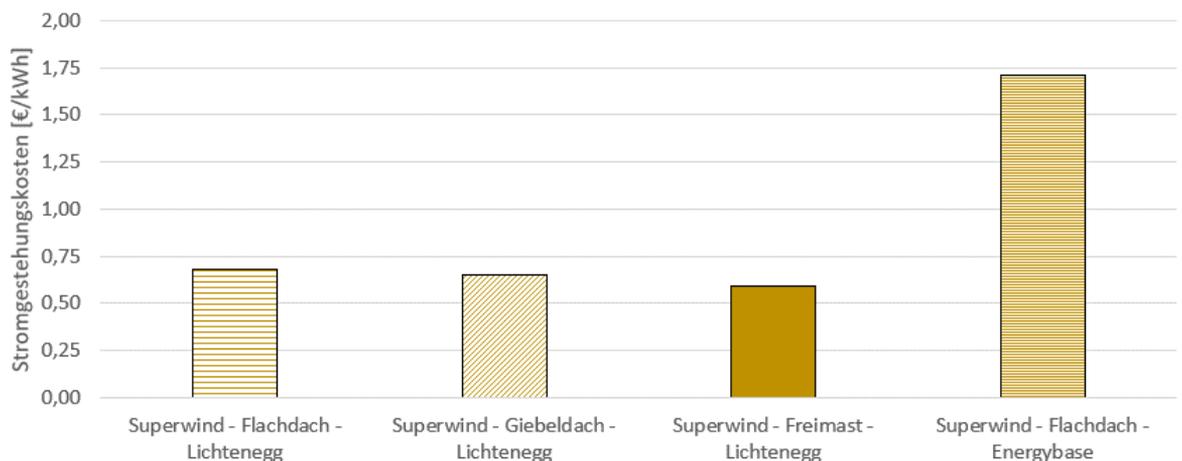


Abbildung 98: Stromgestehungskosten Superwind

<sup>4</sup> <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>

### 9.3.4. Venturicon

Abbildung 99 zeigt den errechneten Jahresenergieertrag der Venturicon für den Standort Lichtenegg (MP1: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 4,71 m/s, LK-Mast: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit 5,22 m/s). Sowohl am Flachdach als auch am Giebeldach sind Jahresenergieerträge von ca. 1.000 kWh zu erwarten.

Abbildung 100 zeigt die Stromgestehungskosten für die Superwind, die auf Basis des errechneten Jahresenergieertrages sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren berechnet wurden. Mit Stromgestehungskosten von ca. 1,10 EUR / kWh ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage in Österreich (Opportunitätskosten 20,415 Cent / kWh<sup>5</sup>) selbst bei einem sehr hohen Eigenverbrauchsanteil außer Reichweite.

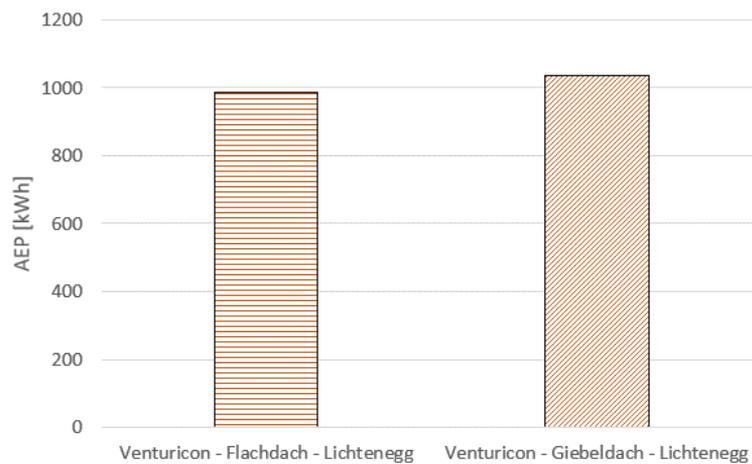


Abbildung 99: Jahresenergieproduktionen (AEP) Venturicon

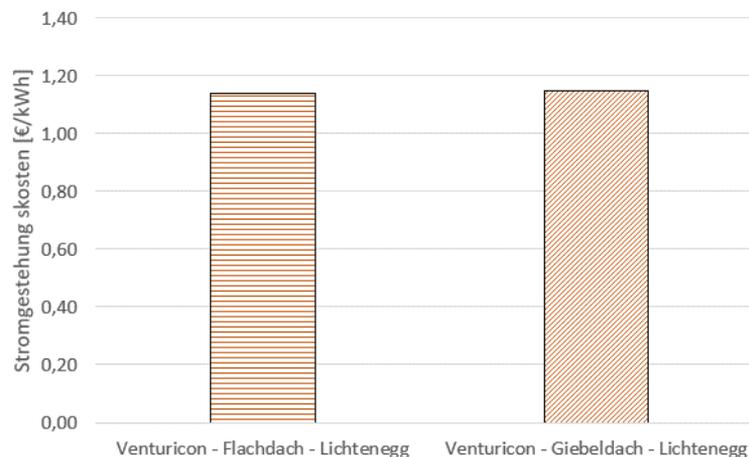


Abbildung 100: Stromgestehungskosten Venturicon

<sup>5</sup> <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>

## 9.4. Evaluierung Schwingungskopplung

Schwingungen und Vibrationen der Anlage können ins Gebäude eingeleitet werden und dort störende Vibrationen, Körperschall oder gar Beschädigungen des Bauwerks verursachen. Um dies zu vermeiden, werden vermehrt Schwingungskopplungssysteme eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde die Wirksamkeit eines solchen Schwingungskopplungssystems untersucht.

In Abbildung 101 sind die Schwingungen der Vertikon M Kleinwindenergieanlage oberhalb und unterhalb des Entkopplers in Form eines Campbell Diagramms dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass die Beschleunigungswerte unterhalb des Entkopplers allgemein sinken. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass dank des Entkopplers die Eigenfrequenzen des Tragwerks (bestehend aus Gebäude und Mast) welche am Mast deutlich erkenntlich sind, am Rotor kaum Auswirkungen zeugen. Dies bestätigt die Entkopplung der Resonanzfrequenzen. Lediglich bei einer Frequenz von 82 Hz ist eine Eigenfrequenz (schwarz dargestellt) leicht zu erkennen. Der Entkoppler verursacht jedoch eine eigene Eigenfrequenz bei 13 Hz auf welche bei einer Drehzahl von 265 U/min durch eine mechanische Anregung des Rotors zur Resonanz führt und dadurch starke Schwingungen der Anlage verursacht. Im Vergleich zu dem Messpunkt oberhalb des Entkopplers sind unter dem Entkoppler klar die Eigenformen des Systems bei 201 Hz und 365 Hz zu erkennen. Die Eigenform des Entkopplers bei 13 Hz welche am Rotor starke Schwingungen verursacht, weist unterhalb des Entkopplers nur mehr geringen Beschleunigungswerte auf. Dies zeigt, dass diese durch den Schwingungskoppler diese kaum an das Tragwerk weitergeleitet werden. Insbesondere bei den Schwingungen niedriger Ordnungen erweist sich der Entkoppler als äußerst effizient. Die Schwingungen höherer Ordnung mit einer Frequenz von 200 Hz und höher werden jedoch vom Entkoppler in das Gebäude übertragen und regen hier Resonanzen bei 208 Hz, und 370 Hz an welche in einer Amplitude. Die akustisch wahrnehmbaren Schwingungen sind daher auch im Gebäude wahrzunehmen.

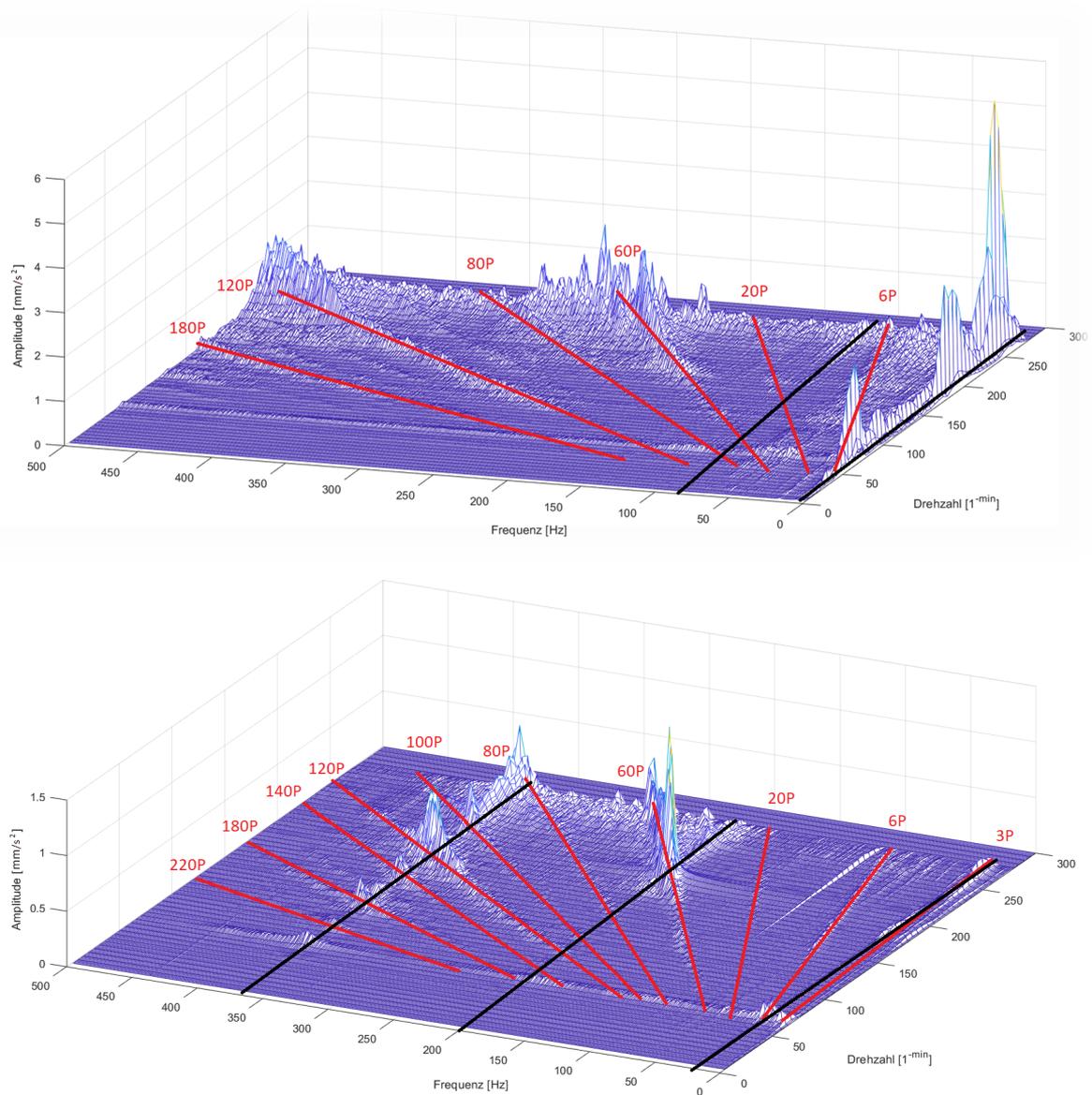


Abbildung 101: Gegenüberstellung des Schwingungsverhaltens der Vertikon M am Giebedach gemessen am Rotor (oben) und unter dem Entkoppler (unten)

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse zeigt, dass der Entkoppler die Eigenformen des Tragwerks und so Resonanzschwingungen im unteren Frequenzbereich gut entkoppeln kann. Die Ergebnisse zeugen jedoch auch, dass Schwingungen mit einer Frequenz über 100 Hz nur wenig gedämpft und in das Tragwerk eingeleitet werden. Dies kann unter Umständen zu hörbaren Vibrationen im Tragwerk bzw. im Gebäude führen.

Des Weiteren zeigen die Messergebnisse, dass die horizontale Bewegung des Entkopplers zu eigenen Resonanzpunkten im Entkoppler führen können. Diese werden zwar nur sehr schwach an das Tragwerk weitergeleitet, können aber zu erhöhten Beschleunigungswerten am Rotor führen.

# 10 Anforderungen, Kriterien und Handlungsempfehlungen

## 10.1. Entwicklung eines Kriterienkatalogs

### 10.1.1. Bewertungssystem – Kriterien-Entwicklung

Ausgangsbasis für die Diskussionen im Expert:innen-Workshop bildete ein Kriterienkatalog der im Rahmen verschiedener Vorprojekte entwickelt wurde (Schidler 2003, Bauer und Wild 2008, Adensam et al. 2009). Dieser kann die Nachhaltigkeitsperformance von unterschiedlichen Energieträgern abbilden. Strukturiert ist der Katalog nach Kriterien, diese sind zu inhaltlichen Clustern zusammengefasst, welche thematische Kategorien bilden. Diese Hierarchisierung hat sich bei der Darstellung von Einzel-, Zwischen- und Gesamtergebnissen bereits bewährt.

Dieses System wurde unter Einbeziehung von Literaturrecherche und einem Expert:innen-Workshop weiterentwickelt. Notwendige Adaptierungen betreffen Kriterien im Zusammenhang mit Artenschutz (A.8). Hier ist vor allem die Gefährdung von Vögeln durch direkten Schlag und Kollision an der Anlage zu nennen. Dazu kommen Verhaltensänderungen und mögliche Verdrängungen. Thomsen et al. (2020) sehen nach einer 3-jährigen Studie in Norddeutschland in der Untersuchungsregion ein vergleichsweise hohes Risiko für Vögel, geringe bis keine Auswirkung auf Fledermäuse. Eine Übertragung der Ergebnisse auf städtisches Gebiet steht noch aus.

Ergänzungen wurden auch für Schattenwurf und Körperschall im Gebäude vorgenommen. In urbanen Umgebungen können zusätzlich zu den bereits genannten Kriterien herabfallende Anlagenteile und Eis eine Rolle spielen (Cace et al. 2007). Syngellakis et al. (2006) gehen im urbanen Bereich davon aus, dass Anlagen mit horizontaler Achse auf größere Akzeptanz stoßen als jene mit vertikaler Achse, da sie im städtischen Umfeld als ästhetischer erscheinen können. Dies wurde jedoch aufgrund des Standorts der Untersuchung nicht mit einbezogen.

Der auf diesen Grundlagen entwickelte Vorschlag wurde im Workshop diskutiert und ergänzt. Die Spalte Messgrößen/Indikatoren erklärt die Inhalte der einzelnen Kriterien und Indikatoren zu deren Messung.

Dieser Katalog bietet Kriterien und Indikatoren zu einer umfassenden Bewertung von Anlagen und Standorten. Er wurde mit einer interdisziplinären Gruppe von Expert:innen diskutiert und finalisiert. Das Ergebnis der Relevanzprüfung ist in der Tabelle gekennzeichnet. Jene Kriterien und Indikatoren, die als besonders wichtig eingestuft wurden, sind in der Tabelle in roter Schrift gekennzeichnet. Ihre Bewertung für eine Anlage oder einen Standort wird von den Expert:innen als grundlegend im Sinne einer Mindestanforderung angesehen.

### 10.1.2. Kriterienkatalog

Die Kriterien wurden einer Relevanzprüfung unterzogen, die in Rot formatierten Größen sind jene, die von den Teilnehmer:innen als besonders relevant eingestuft wurden.

Tabelle 33: Finalisierter Kriterienkatalog

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
A Gesundheits- und umweltrelevante Impacts	Inputströme (Standort)	A.1	Gesamtenergieverbrauch und Anteil nicht erneuerbarer Energieträger/ Energetischer Ressourcenverbrauch	<u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energiebilanz [kWh/kWh]</li> <li>Erntefaktor [1]</li> <li>Energetische Amortisation [y]</li> <li>CO<sub>2</sub> Amortisation [y]</li> </ul>
		A.2	Betriebsstoffe (toxische und petrochemische)	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Toxische Betriebsstoffe [ja/nein]</li> <li>Petrochemische Betriebsstoffe [ja/nein]</li> <li>Kreislaufführung [ja/nein]</li> <li>Substitutionsmöglichkeit [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Menge toxische Betriebsstoffe [mg/kWh]</li> <li>Menge petrochemische Betriebsstoffe [mg/kWh]</li> </ul>
	Outputströme (Standort)	A.3	Emissionen an die Kompartimente Wasser, Luft und Boden (Anlage + Transporte von Herstellungsort Anlage bis Aufstellungsort)	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Art der Emissionen [CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, ...]</li> <li>Wirkungskategorie [Klima...]</li> <li>Schattenwurf statisch störend [ja/nein]</li> <li>Schattenwurf bewegend störend [ja/nein], Fenster werden gestreift [ja/nein]</li> <li>Diskoeffekt störend [ja/nein]</li> <li>Infraschall störend [ja/nein]</li> <li>Körperschall störend [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Emissionen [t/kWh]</li> <li>Klimapotenzial [CO<sub>2</sub>-äquiv./kWh]</li> <li>Schalldruckpegel [dB]</li> <li>Beschattungszeit [h/y]</li> <li>Mindestabstand zu Nachbargrundstücken [m]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
		A.4	Abfälle, besonders Problemabfälle und deren Behandlung	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Art der Entsorgung [Recycling, Deponie]</li> </ul> <u>Unterstützend:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeidungsmöglichkeit [ja/nein]</li> <li>• Kreislaufführung [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menge GFK [t/kWh]</li> <li>• Menge CFK [t/kWh]</li> <li>• Menge Elektronikschrott [t/kWh]</li> <li>• Menge und Art Abfall durch Tausch/Wartung [t/kWh]</li> </ul>
	Risiken (Standort)	A.5	Fehlertoleranz der Anlage	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorsorgemaßnahmen [ja/nein]</li> <li>• Unfallwahrscheinlichkeit [groß/klein]</li> <li>• Schadensdimension [groß/klein]</li> <li>• Blitzschutzkonzept [ja/nein]</li> <li>• Sturmsicherung [ja/nein]</li> <li>• Standsicherheit Fundament vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Einhausung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Eiserkennungssystem vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Rotorblattheizung vorhanden [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unfallwahrscheinlichkeit [%]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
	Herstellung der Anlagenteile	A.6	Ressourcenverbrauch und Emissionen an die Kompartimente Wasser, Luft und Boden (Anlagenteile + Transport von Herstellungsort Anlagenteil bis Herstellungsort Anlage)	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kritikalität der Rohstoffe [ja/nein]</li> <li>• Konfliktrelevante Rohstoffe [ja/nein]</li> <li>• Toxische Betriebsstoffe [ja/nein]</li> <li>• Art der Emissionen entlang der Wertschöpfungskette [CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>...]</li> <li>• Wirkungskategorien [Klima...]</li> <li>• Belästigung durch Lärm [ja/nein]</li> <li>• Belästigung durch Geruch [ja/nein]</li> <li>• Recyclinganteil [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeinsatz entlang der Wertschöpfungskette (falls nicht bei A.1 berücksichtigt) [kWh/kWh]</li> <li>• Rohstoffe kritisch [t/kWh]</li> <li>• Rohstoffe konfliktrelevant [t/kWh]</li> <li>• Flächeninanspruchnahme [m<sup>2</sup>/kWh]</li> <li>• Recyclinganteil [t/kWh]</li> <li>• Schalldruckpegel [dB]</li> </ul>
	Flächen	A.7	Versiegelung durch Anlagenaufbau und Transportwege	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Möglichkeit zum Diskurs gegeben [ja/nein]</li> <li>• Versiegelung entspricht den vereinbarten Zielen [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächenversiegelung [m<sup>2</sup>/kWh]</li> </ul>
	Arten	A.8	Verdrängung und Kollision	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einhausung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Fledermausschaltung vorhanden [ja/nein]</li> <li>• Bewirtschaftungsmanagement umliegender Flächen [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestabstand zu Fortpflanzungs- und Ruhestätten [m]</li> <li>• Umliegende Wiesenfläche nicht oder nur saisonal gemäht [m<sup>2</sup>]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
B Sicherung und Qualität der Beschäftigung	Anlage	B.1	Gefährdung der Arbeitnehmer:innen (Sicherheit am Arbeitsplatz) & Anlagenbetreiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unfallwahrscheinlichkeit (Montage, Wartung) [ja/nein, groß/klein]</li> <li>Vorsorgemaßnahmen geplant [ja/nein]</li> <li>Angaben über Fehlertoleranz [ja/nein]</li> </ul>
	Akteure	B.2	Qualität der Arbeit entlang der Wertschöpfungskette	<ul style="list-style-type: none"> <li>Möglichkeit zum Diskurs ist gegeben [ja/nein]</li> <li>Die Arbeitsbedingungen entsprechen den entwickelten Zielen [ja/nein]</li> <li>Art &amp; Ausmaß der Belastungen am Arbeitsplatz [mental, physisch] [hoch/niedrig]</li> <li>Arbeitsplatzqualität entlang der Wertschöpfungskette [hoch/niedrig]</li> </ul>
		B.3	Sicherung und Schaffung von (qualifizierten) Arbeitsplätzen entlang der Wertschöpfungskette	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl der Arbeitsplätze (direkte &amp; indirekte zusätzliche Beschäftigung)</li> <li>Qualifikationsstruktur entspricht den Anforderungen der Region</li> <li>Einbindung regionaler Gewerbetreibende</li> <li>Berücksichtigung von Gleichbehandlungsaspekten</li> </ul>
C Wissen	Zu bildende Ressourcen	C.1	Forschung und Weiterentwicklung der Technologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weitergabe von Erfahrungswerten Monitoring</li> <li>Angebot von Schulungen Teilnahme an Vernetzungsmöglichkeiten</li> </ul>
		C.2	Anwendung von bestehendem Wissen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einbeziehung erfahrener Akteure</li> </ul>
D Regionalentwicklung	Regionalwirtschaft und -versorgung	D.1	Unterstützung der regionalen Infrastruktur	<p><u>Qualitativ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Schaffung neuer Infrastruktur (smart grids, Straßen)</li> <li>Infrastruktur entspricht den gewünschten Zielen [ja/nein]</li> </ul> <p><u>Quantitativ:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Investitionen in institutionelle Infrastruktur [€/kW]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
		D.2	Beleben der regionalen Wirtschaftsstruktur durch Innovation	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unternehmensneugründungen [ja/nein]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsatz neugegründeter Unternehmen bzw. Unternehmensausweitung [€/kW]</li> <li>• Zusätzliche Beschäftigte in neu gegründeten Unternehmen bzw. Durch Umsatzausweitung [Vollzeitbeschäftigt/a/kW]</li> <li>• Anteil der Wertschöpfung, der in der Region bleibt [%]</li> </ul>
		D.3	Verstärkung der Vernetzung mit anderen Regionen	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diskurs [ja/nein]</li> <li>• Verstärkte Vernetzung findet statt [ja/nein]</li> </ul>
		D.4	Beitrag zur Energieautarkie	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Änderung der Rolle des Energieerzeugers, Energieverteilers und Energieverbrauchers [ja/nein]</li> <li>• Beitrag zur regionalen Versorgungssicherheit [ja/nein]</li> </ul>
	Kulturelle und individuelle Identität	D.5	Erhaltung der Kulturlandschaft als schützenswertes Gut	<u>Qualitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Möglichkeit zum Diskurs [ja/nein]</li> <li>• Veränderung des Landschaftsbilds entspricht den vereinbarten Zielen [ja/nein]</li> <li>• Veränderung des Landschaftsbilds [positiv/negativ]</li> <li>• Veränderungen des architektonischen Gesamtbilds [positiv/negativ]</li> </ul> <u>Quantitativ:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestabstand zu Nachbargrundstück [m]</li> </ul>
E Akteursinteraktionen	Kooperationsformen		Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette (Rohstoffe/Halbzeuge/Zulieferer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommunikation [ja/nein]</li> <li>• Entscheidungen werden inklusiv/diskursiv getroffen [ja/nein]</li> <li>• Konfliktmaterialien [ja/nein]</li> </ul>
			Kooperationen im Rahmen der Implementierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berücksichtigung der Anrainerinteressen [ja/nein]</li> <li>• Verschieden Beteiligungsformen im Rahmen des Betriebs möglich/angedacht [ja/nein]</li> </ul>

Kategorie	Cluster	Z	Kriterien	Messgrößen/Indikatoren
F Wirtschaftlichkeit	Wirtschaftlichkeit der Anlage		Marktanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Marktanalyse für KWK durchgeführt – Anlagenmarkt und Strommarkt (Inlandsmarkt, internat. Markt)</li> </ul>
			div. Indikatoren für Wirtschaftlichkeit der Anlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dynamische Investitionsrechnung (Kapitalwert, interner Zinssatz, Amortisationsdauer) aus Sicht Anlagenbetreiber:in/Investor:in Stromgestehungskosten</li> </ul>
		Wirtschaftlichkeit global/national	<p>national:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vermiedene Strafzahlungen [€/KWh]</li> <li>Beitrag zur Erreichung nationaler/internationaler Klimaziele</li> <li>Auswirkungen auf Netztarife</li> <li>Exportmöglichkeit für Ö [€/a]</li> <li>Zus. Erwartete Wertschöpfung durch Produktion/Zulieferer/Instandhaltung [VZÄ/a, kW]</li> <li>Versorgungssicherheit [gr/kl]</li> <li>Erforderlicher Fördermitteleinsatz [j/n, c/kWh]</li> <li>Ausbau der Forschungsinfrastruktur [j/n, c/kWh]</li> </ul> <p>global</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Beitrag zur Verknappung der Ressourcen (global)</li> <li>Beitrag zu Preisänderungen Windenergie (Anstieg/Reduktion) (s.o)</li> </ul>	
	Wirtschaftlichkeit aus Akteurssicht	div. Indikatoren für die W. aus Akteurssicht	<p>Betreiber:in/Kund:in</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapitalwert für Anlagenbetreiber (s.o.)</li> <li>KundIn: Kosteneinsparung Energieversorgung [ja/nein, €/a]</li> </ul> <p>Netzbetreiber:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erfordernisse zur Systemintegration [hoch/niedrig]</li> <li>Beitrag zur Netzstabilität [groß/klein]</li> </ul> <p>Nachbar:innen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wertverlust eigenes Grundstück/ Gebäude? [ja/nein]</li> </ul>	

## 10.2. Handlungsempfehlungen

### 10.2.1. Standortbewertung und -auswahl

Strömungsmodellierung und -simulation: Der Einsatz von KWEA auf Gebäuden und/oder in dicht bebauten Gebieten bringt bestimmte Anforderungen an den Aufstellungsort sowie an die verwendete Anlage mit sich. Der Standort einer KWEA entscheidet wesentlich über den Energieertrag und damit über den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage. Die am potenziellen Standort zu erwartenden Windverhältnisse können entweder vor Ort gemessen oder mittels Strömungsmodellierung simuliert werden. Repräsentative Windmessungen können vergleichsweise aufwändig und kostenintensiv sein.

Strömungsmodelle ermöglichen die Bewertung eines Standortes auch vor Errichtung eines Gebäudes. Die Anwendung von Strömungsmodellen zur Standortbegutachtung für eine KWEA bietet gegenüber dem Einsatz einer Windmessung vor Ort zudem den Vorteil, dass nicht nur das Windangebot an einem Punkt über Dach bewertet werden kann, sondern auch unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Windrichtungen der hinsichtlich des Windpotenzials optimale Standort im gesamten Dachbereich gefunden werden kann.

Anhand der im Projekt durchgeführten Untersuchungsergebnisse konnte erwiesen werden, dass der Einsatz von Modellen (im konkreten Fall der Modelle MISKAM und OpenFOAM) zur Bewertung eines potenziellen KWEA-Standortes grundsätzlich möglich ist und vor allem bei Gebäuden mit Flachdach eine ebenso aussagekräftige Ertragsprognose ermöglicht wie die Durchführung einer zeitlich und räumlich repräsentativen Windmessung vom Ort. Bei komplexen Dachstrukturen ist die Auflösung der Hindernisform im verwendeten Modellgitter für die Güte der Ertragsprognose entscheidend.

Messtechnische Erfassung: Vor der Aufstellung von KWEA kann eine Erfassung der vorherrschenden Windbedingungen für die Zwecke einer Ertragsprognose vorgenommen werden. Für eine aussagekräftige Bewertung sollte sich jedoch dann eine solche Messung über einen Zeitraum von mindestens einem ganzen Jahr erstrecken.

Sofern am Aufstellungsort mit dem Vorliegen von gestörten oder komplexen Anströmungsbedingungen für die KWEA gerechnet werden muss (bspw. auf oder zwischen Gebäuden), so sollte die messtechnische Erfassung dieser spezifischen Anströmungsbedingungen im Vordergrund stehen. Auf diese Weise kann möglicherweise der Aufstellungsort der KWEA an einen Punkt mit günstigeren Bedingungen verschoben werden. Sofern das nicht möglich ist, dann können die Messergebnisse zu den zu erwartenden Anströmungsbedingungen für die Auswahl einer dafür geeigneten KWEA-Ausführung genutzt werden.

Berücksichtigung von Eiswurf bzw. -abfall: Beim Betrieb von KWEA in besiedelten Gebieten geht ab Temperaturen unter 1 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit größer 90 % eine Gefährdung von Personen und Sachgütern durch Vereisung der Rotorblätter und damit verbundenen Eiswurf bzw. Eisabfall aus (Cattin Heikkilä 2016). Untersuchungen der Einschlagskraft und eine Abschätzung des Risikos von Eiswurf durch KWEA, welche im Projekt „Urbane Windenergie“ (Leonhartsberger et al. 2019b) durchgeführt wurden zeigen, dass von abfallenden oder abgeworfenen Eisfragmenten ein nicht zu unterschätzendes Gefährdungspotenzial für Mensch und Umgebung ausgeht. Es wurden Eisfragmente mit einem Gewicht von 100 g bis 200 g und einer Einschlagsgeschwindigkeit von 16 m/s

in einer Entfernung von 25 m gefunden. Herkömmliche Ansätze zur Eiserkennung und Vermeidung, wie beispielsweise die synoptische Eiserkennung bzw. die Beschichtung der Rotorblätter mit Nanolacken oder plasmabeschichtete Polyurethanfolien, haben sich als ineffizient oder zu teuer herausgestellt. Aus diesem Grund werden von Sachverständigen oftmals bestimmte Sicherheitsabstände gefordert, die das 1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) betragen. Daraus ergeben sich große Abstände in von bewohnten Gebieten und damit eine Erschwernis für die Integration in urbane Gebiete.

Berücksichtigung von Schattenwurf: Der sich bewegende Schatten von KWEA kann als unangenehm bzw. störend empfunden werden. Daher müssen für die Genehmigung strenge Grenzwerte eingehalten werden. Als Schwellenwert gilt hierbei eine Beeinträchtigung durch Schattenwurf von maximal 30 Minuten pro Tag bzw. 30 Stunden pro Jahr (IG Windkraft 2019). Um die Beschattungsdauer durch eine etwaige KWEA für einen bestimmten Standort und die dort gegebene Topographie zu berechnen, können Planungstools wie beispielsweise windPRO eingesetzt werden. Es kann außerdem der sogenannte Discoeffekt auftreten, der durch schnell drehende Flügel, stark reflektierende Oberflächen entsteht und ein ähnliches Blinkmuster erzeugt, wie ein Stroboskop in einer Diskothek. Vor allem bei KWEA mit hoher Drehzahl kann dieser Effekt subjektiv als störend empfunden werden und zu einem Problem werden (IG Windkraft 2019). Die Einhausung des Rotors – wie es bei Mantelturbinen der Fall ist – oder der Einsatz von nichtreflektierenden Lackierungen bzw. Beschichtungen kann diesen Effekt erheblich verringern. Die Grenzwerte für Beschattung von benachbarten Wohnflächen sind dennoch einzuhalten.

### 10.2.2. Auswahl einer KWEA

Untersuchungen im Energieforschungspark Lichtenegg zeigen, dass nicht alle in Österreich erhältlichen KWEA die Anforderungen hinsichtlich Qualität und Betriebssicherheit erfüllen: Insgesamt wurden in den letzten Jahren ca. 25 KWEA im Energieforschungspark Lichtenegg getestet und vermessen. Wie in Abbildung 102 ersichtlich, konnten dabei nicht alle KWEA hinsichtlich Qualität und Betriebssicherheit überzeugen.



Abbildung 102: Erfahrungen aus dem Energieforschungspark Lichtenegg: gebrochener Stahlmast einer KWEA (links), gebrochener Flügel einer KWEA (Mitte links), abgestürzter Rotor (Mitte rechts), defekte KWEA Typ Windtronics (rechts)

## Qualität und Betriebssicherheit (Materialtests)

Qualitätsprüfung: Die Erfahrungen zeigen, wie wichtig es ist, dass Qualität und Betriebssicherheit von einer unabhängigen Prüfeinrichtung überprüft bzw. sichergestellt wird, z. B. nach IEC 61400-2 „Anforderungen für kleine Windenergieanlagen“. Nur wenn Qualität und Betriebssicherheit sichergestellt werden, kann eine Gefährdung der Umgebung reduziert bzw. ausgeschlossen werden.

Alternativ dazu können die wichtigsten Qualitätskriterien auch im Energieforschungspark Lichtenegg überprüft werden. Bisherige Erfahrungen mit KWEA im Energieforschungspark Lichtenegg haben gezeigt, dass bei KWEA, welche den Qualitätsanforderungen nicht entsprechen, bereits nach wenigen Monaten erste Schäden auftraten. Bei Anlagen, die die ersten sechs Monate ohne gravierende Schäden betrieben werden konnten, kam es in der Regel auch in den folgenden Monaten/Jahren zu keinen risikorelevanten Schäden.

Eine Dauerprüfung in Lichtenegg ersetzt zwar keine Prüfung nach IEC61400-2, ist jedoch ein deutlich besserer Indikator als andere, in Österreich gängige Methoden zur Qualitätsprüfung, wie z. B. die Bestätigung eines Ziviltechnikers, dass die KWEA im Falle einer Prüfung nach Norm IEC61400-2 diese bestehen würde.

Sicherheits- und Abschaltssysteme: Ein weiterer Aspekt der IEC61-400 sind die Anforderungen an KWEA bezüglich Sicherheits- und Abschaltssysteme. Zu diesem Zweck werden Sicherheits- und Funktionsprüfungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass Maßnahmen zur Maschinen- und Personensicherheit umgesetzt wurden und die zu prüfende Anlage auch im Realbetrieb das geplante Verhalten zeigt. Wesentliche Kriterien dabei sind unter anderem:

- Leistungs- und Drehzahlregelung
- Regelung der Windausrichtung (Giermechanismus)
- Lastabwurf
- Schutz durch eine Drehzahlregelung bei der Bemessungswindgeschwindigkeit und darüber
- Anlauf und Abschaltung oberhalb der Bemessungswindgeschwindigkeit

Darüber hinaus müssen entsprechende Abschaltssysteme vorhanden sein, die eine automatische bzw. manuelle Unterbrechung des Betriebes jederzeit bzw. bei definierten Bedingungen (z. B. bei Abschaltgeschwindigkeit) ermöglichen, z. B.:

- Fail-Safe Abschaltssystem bei Überschreitung der Bemessungs-Rotordrehzahl: Nachweis durch Versuch oder Analyse; auch bei Ausfall eines Bauteils oder der Energieversorgung darf die maximale Rotordrehzahl nicht überschritten werden
- Handabschaltung: Jede KWEA muss über eine Vorkehrung (Hebel, Abschaltknopf, Schalter, ...) verfügen, die eine händische Abschaltung der Anlage ermöglicht.
- Abschaltung zur Instandhaltung: Jeder Hersteller muss ein sicheres Verfahren zur Abschaltung der KWEA für Überprüfung, Wartung und Instandhaltung vorsehen – Norm unterscheidet die Verfahren für WKA bis 40 m<sup>2</sup> Rotorfläche (bei diesen Anlagen gilt auch das Absenken einer WKA auf einem Kippmast als sicheres Verfahren) und über 40 m<sup>2</sup> (kein Absenken auf Kippmast als Verfahren zulässig und Vorhandensein einer Feststellvorrichtung)

Statische und dynamische Auslegung (Vibrationen und Schwingungen): KWEA sind aufgrund deren Aufbau, dynamischer Betriebsweise und exponierten Lage sehr schwingungsfreudige Systeme. Schwingungen können mechanische und windbedingte Kräfte als Ursache haben, wobei zu beachten ist, dass diese Kräfte wiederum Eigenfrequenzen von Bauteilen (Mast, Generator, Rotorblatt) anregen können und somit zur Resonanzschwingung und in weiterer Folge zu Schäden führen. Daraus resultierende starke Kräfte können zur vorzeitigen Materialermüdung führen, welche unweigerlich Anlagenausfälle zur Folge haben (siehe Abbildung 103).



Abbildung 103: Schäden durch Vibrationen und Schwingungen

Vibrationen und Schwingungen von (gebäudemontierten) KWEA können somit schwerwiegende Folgen sowohl für Menschen in der Umgebung (Schallemissionen, Körperschall und Infraschall) als auch für Anlage und tragende Struktur (erhöhte Belastung => Materialermüdung, Dauerbrüche, Abnutzung der Lager, Belastung des Gebäudes) haben. Speziell bei Einfamilienhäusern kann dies unter Umständen dazu führen, dass KWEA aufgrund der statischen Belastungen nicht bzw. nicht in der gewünschten Art und Weise montiert werden können. Die Kenntnis des Frequenzspektrums, der Auslenkung, der Schnelle und der Beschleunigung von Schwingungen ist ausschlaggebend für einen sicheren und effizienten Betrieb.

### **Ertrag und Leistung**

Nicht nur hinsichtlich Qualität und Betriebssicherheit, sondern auch in Bezug auf die Leistungsfähigkeit, können nicht alle KWEA die vom Hersteller geschürten Erwartungen erfüllen. Im Projekt „Kleinwindkraftanlagen“ wurden 13 KWEA untersucht und dabei unter anderem der Ertrag der KWEA über mehr als 12 Monate gemessen. Dabei konnten nur sechs der getesteten Anlagen die auf vom Hersteller berechneten Erträge annähernd erreichen (Warmuth et al. 2014). Ähnliche Ergebnisse wurden auch im vorliegenden Projekt erzielt. Dies zeigt, dass viele Hersteller in Ermangelung einer fachmännisch erstellten Leistungskurve nicht in der Lage sind, verlässliche Ertragsschätzungen vorzunehmen, was zu falschen Erwartungen führt.

Darüber hinaus erlauben die nominellen Angaben der Hersteller, die sich in erster Linie auf die Maximalleistung beziehen, nur wenig Rückschlüsse über das tatsächliche Leistungsvermögen bzw. die mögliche Jahresenergieproduktion. Die maximale Leistung ist oft primär eine Auslegungsgröße für die elektrischen Komponenten, hat jedoch nur wenig Bezug zur aerodynamischen und mechanischen Ausführung. Im praktischen Betrieb ist ein Betrieb mit Maximalleistung nur unter seltenen Starkwindbedingungen zu erwarten. Unter solchen Bedingungen können dann aber wiederum andere Einschränkungen wie die dynamische Belastbarkeit und das Regelverhalten wirksam werden.

Der in der Praxis wichtige Betriebsbereich ist jener der viel häufiger auftretenden Windgeschwindigkeiten im Bereich von etwa 3 m/s bis 8 m/s. Bei der Auswahl einer KWEA sollte daher

vor allem auf die Leistungsfähigkeit der Anlage in diesem Windgeschwindigkeitsbereich das Augenmerk liegen.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass es zwischen den unterschiedlichen Bauformen der KWEA als Horizontalläufer, Mantelturbine oder Darrieus-Rotor große Unterschiede im Betriebsverhalten unter den oft komplexen Anströmungsbedingungen in Bodennähe und im urbanen Bereich geben kann. So sind starke Schräganströmung, wie sich bei der Aufstellung von KWEA auf Dächern unter Umständen zu erwarten sind, für manche KWEA ein stark störender Einfluss, der die Leistungsfähigkeit auf einen Bruchteil reduzieren kann.

Bei der Auswahl einer KWEA sollte das Hauptaugenmerk auf dem tatsächlichen Leistungsvermögen im Bereich der am meisten zu erwartenden Windgeschwindigkeiten liegen. Als Bezugsgröße sollte dabei die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit verwendet werden, die für KWEA in Bodennähe und im besiedelten Raum in der Regel deutlich unter 6 m/s liegen wird. Die theoretisch mögliche Maximalleistung einer Anlage hat hingegen in der Praxis eine nur sehr untergeordnete Bedeutung. Sofern an dem Aufstellungsort mit komplexen Strömungsbedingungen gerechnet werden muss (Schräganströmung, Windscherung, Verwirbelungen), so sollte die Eignung der Anlagenbauart (Horizontalläufer, Vertikalläufer, Mantelturbine) für die spezifischen Anströmungsbedingungen besonders beachtet werden.

### **Power Quality**

Erzeugungsanlagen können die Netzqualität z. B. durch Oberschwingungen, Flicker und Spannungseinbrüche beeinflussen. Daher gibt es allgemeine genormte Grenzwerte, die Erzeugungsanlagen erfüllen müssen. Für Windkraftanlagen gibt unter anderem die Norm EN 61400-21 Messverfahren vor, welche charakteristischen Parameter eingehalten werden müssen. Die Rückwirkungen von KWEA auf das Stromnetz sind dabei unmittelbar vor dem Netzanschlusspunkt zu ermitteln.

Die Netzverträglichkeit ist ein wesentliches Kriterium für einen stabilen Betrieb einer Kleinwindkraftanlage. Wesentlich dafür ist das Einhalten von Grenzwerten für Flicker, harmonische Oberschwingungsströme sowie Spannung und Frequenz. In allen Fällen konnten die untersuchten Kleinwindkraftanlagen die Grenzwerte einhalten. Wesentlich dafür ist jedoch die Konformität der eingesetzten Betriebsmittel wie zum Beispiel der Wechselrichter. Daher sollte beim Kauf einer KWEA zumindest auf ein CE-Prüfzeichen und eine Konformitätserklärung geachtet werden.

### **Schallemissionen**

Schallemissionen bei KWEA haben unterschiedlichen Gründe: Einerseits lösen sich an den Flügelspitzen Wirbel ab, welche zu hörbaren Schallemissionen führen, andererseits entstehen Schallemissionen durch den Turmschatteneffekt sowie beim Abbremsen des Rotors. Der durch die Flügelbewegung hervorgerufene Lärm beschränkt sich dabei nicht nur auf den hörbaren Bereich, denn auf Grund ihrer Größe und geringen Rotationsgeschwindigkeit wird auch ein erheblicher Anteil an Infraschall unterhalb von 20 Hz erzeugt.

Werden KWEA in der Umgebung von Wohnbauten aufgestellt, muss nachgewiesen werden, dass die in *Abbildung 104* angeführten Grenzwerte nicht überschritten werden. Wirft man einen Blick darauf wird deutlich, dass Schallemissionen von KWEA in besiedelten Gebieten durchaus ein Problem darstellen können. Um die gültigen Immissionsgrenzwerte einzuhalten, sind - je nach KWEA - Abstände

zu bewohnten Objekten von 30 bis 100 m erforderlich - Distanzen, die in Wohngebieten oftmals nicht verfügbar sind. Die Schallemissionskarte für den Vertikalläufer VK250 (Abbildung 105) verdeutlicht diesen Umstand.

Planungsrichtwerte gemäß ÖNORM S 5021, Teil 1					
Kat.	Gebiet und Standplatz	Planungsrichtwerte bzw. zul. Immissionsgrenzwerte <sup>1)</sup>			
		LA,Gg,TAG	LA,eq,TAG	LA,Gg,NACHT	LA,eq,NACHT
<b>BAULAND</b>					
1	Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus	35	45	25	35
2	Wohngebiete in Vororten, Wochenendhausgebiete, ländliches Wohngebiet, Schulen	40	50	30	40
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	45	55	35	45
4	Kerngebiet (Büros, Geschäfte, Handel, Verwaltung ohne wesentliche Emission störender Schalls, Wohnungen), Gebiet für Betriebe ohne Schallemission	50	60	40	50

Abbildung 104: Planungsrichtwerte hinsichtlich zulässiger Immissionsgrenzwerte für verschiedene Widmungskategorien unter Berücksichtigung der einschlägigen Gesetze der Länder (ÖNORM S5021, Teil1)

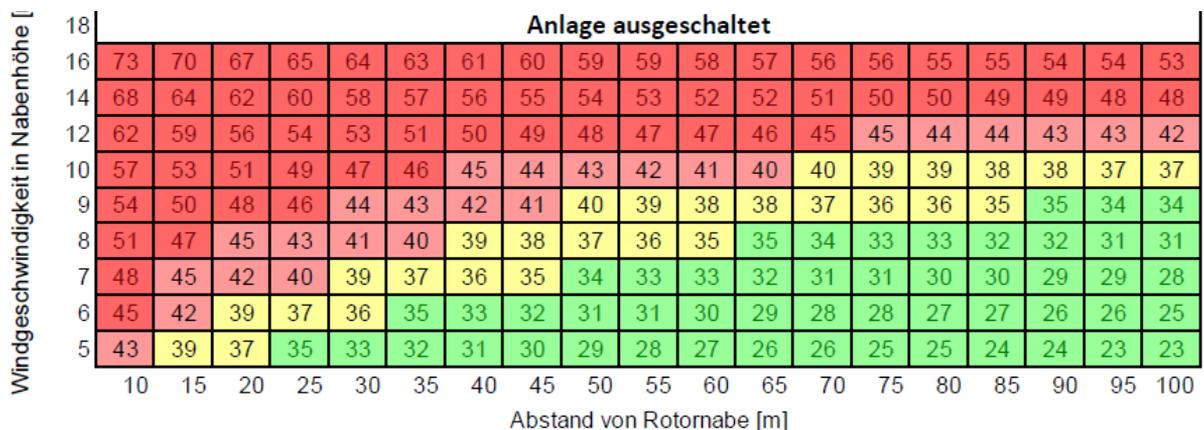


Abbildung 105: Schallimmissionskarte für Vertikalläufer VK250 (Quelle: www.amperius.de)

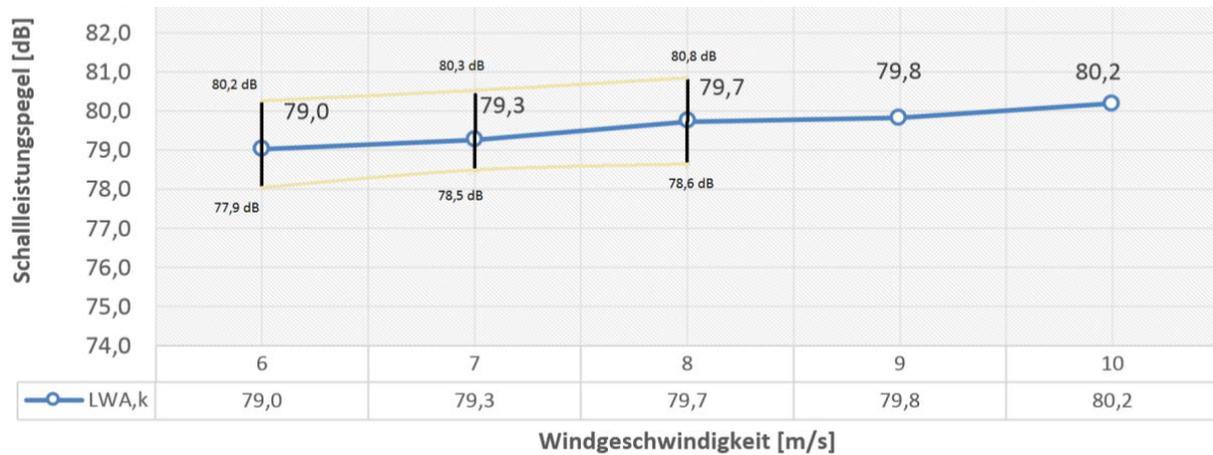


Abbildung 106: Turbulenzinduzierte Schallemissionen – Auswirkung der Turbulenz auf die Ergebnisse des immissionsrelevanten Schalleistungspegels (Niederhofer 2016)

Darüber hinaus zeigen weiterführende Untersuchungen (Niederhofer 2016), dass Turbulenzen eine Schwankung des immissionsrelevanten Schalleistungspegels um bis zu 2,2 dB verursachen können (siehe Abbildung 106). Das bedeutet, dass an einem Standort mit hoher Turbulenzintensität - wie z. B. in der Stadt - der gemessene Schalleistungspegel in einzelnen Windgeschwindigkeitsklassen um bis zu 2,2 dB höher sein kann als an einem Standort mit niedriger Turbulenzintensität. Auf Basis dieses Ergebnisses ist eine Erweiterung der bestehenden Norm hinsichtlich der Einführung weiterer Kennzahlen wie z. B. turbulenzinduzierte Schallemissionen zur überdenken.

### 10.2.3. Detailplanung, Vorbereitung und Betrieb

#### Abschätzung von Ertrag und Wirtschaftlichkeit

Die mögliche Jahresenergieproduktion kann vorab mittels einer normgerecht erstellten Leistungskennlinie und einer im Idealfall gemessenen Häufigkeitsverteilung des Windes errechnet/abgeschätzt werden. Präsentiert die Leistungskennlinie das tatsächliche Leistungsverhalten der Anlage bzw. die Winddaten das tatsächliche Windvorkommen vor Ort, sind realitätsnahe Ertragsabschätzungen möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass die berechneten Erträge in der Regel um 10 bis 30 % über den in der Praxis erzielbaren Erträgen liegen.

Der Grund dafür ist, dass selbst normgerechte Leistungskennlinien meist ein optimales Leistungsverhalten der KWEA zeigen, da bei der Erstellung der LK Messzeiträume, in denen keine oder deutlich verminderte Erträge gemessen wurden, begründet ausgeschlossen werden können und somit nicht in der ermittelten LK aufscheinen.

Während kleinere Defekte, Störungen usw. somit in der LK nicht aufscheinen, machen sich ebendiese jedoch im gemessenen Ertrag bemerkbar. Der gemessene Ertrag fällt damit geringer aus als bei der Ertragsberechnung. Tabelle 34 gibt einen Überblick über die Soll- und Ist-Erträge für ausgewählte KWEA, die in Lichtenegg vermessen wurden. Selbst Anlagen, bei denen im Messzeitraum keine erkennbaren Störungen und Defekte aufgetreten sind, können den errechneten Soll-Ertrag in der Regel nicht erreichen (-10 bis -30 %).

Tabelle 34: Zusammenfassende Darstellung der Soll- und Ist-Erträge für verschiedene KWEA

KWEA	Montageart	Ist-Ertrag	Soll-Ertrag normgerechte LK	
		kWh	kWh	Abweichung
BlueOne	Freistehender Mast	19,6	26,8	-26,88%
Vertikon	Freistehender Mast	12,5	34,7	-63,96%
Superwind	Freistehender Mast	43,1	93,1	-53,68%

Basierend auf dem errechneten Betrag können die Stromgestehungskosten mit der Annuitätenmethode berechnet werden. Dabei werden die Investitionskosten in jährliche Zahlungen (Annuitäten) aufgeteilt. Die Annuitäten ergeben sich aus dem Produkt des Annuitätenfaktors, der über die Lebensdauer und dem Zinssatz berechnet wird, und den Investitionskosten. Die Stromgestehungskosten ergeben sich, wenn dieses Produkt durch die Volllaststunden dividiert wird. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Berücksichtigung der korrekten Lebensdauer. In der Regel geben Hersteller bei KWEA eine Lebensdauer von 10 bis 30 Jahren an (Halbhuber 2014).

### Genehmigungsverfahren

Kleinwindkraftanlagen sind in Österreich grundsätzlich genehmigungspflichtig. Wie in Deutschland fällt das Genehmigungsverfahren auch in Österreich in den Zuständigkeitsbereich der Bundesländer.

### Installation

Eine häufige Schadensursache sind Montagefehler und unfachmännische Installation. Die Verwendung von unangemessenem Montagematerial und inkorrektem Anzugsmoment für Montagebolzen können dazu führen, dass diese sich lösen bzw. den Belastungen nicht standhalten. Die Installation der Anlage hat daher stets durch geschultes und eingewiesenes Personal zu erfolgen. Es werden dabei feuerverzinkte Bolzen der Festigkeitsklasse 10.9 bevorzugt, da diese bei gleichem Gewindestandard eine höhere Zugfestigkeit und zusätzlichen Korrosionsschutz bieten als herkömmliche Bolzen und so eine längere Lebensdauer bieten. Des Weiteren sind wichtige Schmierstoffe und Verschleißteile wie beispielsweise Bremsbeläge, elektrische Bürsten je nach Anlagentyp im Laufe der Betriebszeit der Anlage zu erneuern, um einen langfristig sicheren und effizienten Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Ein Wartungsplan und ein entsprechender Servicevertrag sollte vom Hersteller der Anlage bzw. dem Anbieter/Planer vorgesehen und eingehalten werden.

Zu vermeiden sind unterbrochene Schweißnähte und Verstärkungsrippen, da diese lokalen thermischen Spannungen nach dem Abkühlen der Schweißnaht verursachen, welche unter andauernden dynamischen Belastungen eine Schwachstelle darstellen. An diesen Stellen können sich Risse bilden, welche sich im Dauerbetrieb fortpflanzen können und die Standsicherheit der KWEA beeinträchtigen können. Dies hat sich als häufige Fehlerursache bei Schadensfällen herausgestellt.



Abbildung 107: Risse an Schweißnähten aufgrund von Resonanzschwingungen

Beton kann unter dynamischen Lasten auf Dauer Risse bilden und Montagebolzen können sich aus dem Beton lösen. Um dies zu verhindern, werden speziell für dynamische Belastungen geeignete Ausführung des Fundaments, des Ankerkorbs und der chemischen Zusammensetzung des Betons verwendet. Bei der Fundamentlegung als auch bei der Anbindung des Tragwerks der KWEA an ein Gebäude ist demnach darauf zu achten, dass entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um solche Beschädigungen zu vermeiden



Abbildung 108: Beschädigung eines Betonfundaments aufgrund von Resonanzschwingungen (links) sowie weitere Schadensbilder aus dem Energieforschungspark Lichtenegg (Mitte und rechts)

Ein weiterer Aspekt welche bei der Installation der KWEA zu beachten ist, ist der fachmännische Transport der Anlage zum Standort und das Anheben der KWEA auf den Mast mittels Kran. Hochwertige KWEA verfügen über spezielle Aufbewahrungskonzepte und einer Montagevorrichtung welche verhindern, dass es dabei zu Beschädigungen kommt.

Auch bei der Installation der elektrischen Komponenten der Anlage und der Verkabelung zwischen Rotor und Leistungselektrik gibt es Fehlerquellen. Um im Fehlerfall die Anlage verriegeln und spannungsfrei machen zu können, ist ein Notausschalter vorzusehen. Der Wechselrichter und die Leistungselektrik sollten witterungsfest installiert werden, um das Eindringen von Wasser und Feuchtigkeit als auch Beschädigungen durch Frost zu verhindern. Darüber hinaus ist eine für die Anlage angemessene Belüftung vorzusehen, um eine Überhitzung zu vermeiden. Da die Entfernung zwischen Rotor und Leistungselektrik je nach Anwendungsfall stark variieren kann, ist eine angemessene Dimensionierung der Leistungskabel vorzusehen. Wird dies nicht eingehalten, kann es zu Spannungsverlusten auf der Leitung kommen, welche zu Ertragseinbußen oder gar Kabelbrand führen können. Die Vorgaben für die elektrische Installation sollten von dem Hersteller der Anlage zur Verfügung gestellt werden oder direkt umgesetzt werden.

Um solche Fehlerursachen auszuräumen, haben Länder wie Dänemark und USA in den KWEA weit verbreitet sind, die Zertifizierung von Installateur:innen vorgeschrieben. Hier müssen Unternehmen welche die Installation von KWEA durchführen ihre Mitarbeiter:innen entsprechend ausbilden und prüfen lassen. Die Einhaltung dieser Vorschriften wird darüber hinaus im Zuge der Genehmigung überprüft. In Österreich ist eine solche Zertifizierung von Installateur:innen nicht vorgeschrieben. Um Installationsfehler dennoch zu vermeiden, sollte daher die Installation ausschließlich durch den Hersteller oder Anbieter der KWEA durchgeführt werden. Dies ist auch im Zuge der Genehmigung ein Vorteil da der Hersteller oder Anbieter der Anlage die technischen Herausforderungen kennen sollte und entsprechende Unterlagen, welche im Zuge der Genehmigung erforderlich sind, bereitstellen kann.

## **Vereisung**

Herabfallende und abgeworfene Eisbrocken, welche sich von den Rotorblättern oder anderen Anlagenteilen lösen, können eine erhebliche Einschlagskraft aufweisen und somit eine Gefährdung für Personen und Gegenstände darstellen (Leonhartsberger et al. 2019). Beim Betrieb von KWEA in besiedelten Gebieten geht ab Temperaturen unter 1 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit größer 90 % eine Gefährdung von Personen und Sachgütern durch Vereisung der Rotorblätter und damit verbundenen Eiswurf bzw. Eisabfall aus (Cattin Heikkilä 2016). Untersuchungen der Einschlagskraft und eine Abschätzung des Risikos von Eiswurf durch KWEA, welche im Projekt „Urbane Windenergie“ (Leonhartsberger et al. 2019b) durchgeführt wurden zeigen, dass von abfallenden oder abgeworfenen Eisfragmenten ein nicht zu unterschätzendes Gefährdungspotenzial für Mensch und Umgebung ausgeht. Es wurden Eisfragmente mit einem Gewicht von 100 g bis 200 g und einer Einschlagsgeschwindigkeit von 16 m/s in einer Entfernung von 25 m gefunden. Herkömmliche Ansätze zur Eiserkennung und Vermeidung, wie beispielsweise die synoptische Eiserkennung bzw. die Beschichtung der Rotorblätter mit Nanolacken oder plasmabeschichtete Polyurethanfolien, haben sich als ineffizient oder zu teuer herausgestellt. Aus diesem Grund sind von Sachverständigen bestimmte Sicherheitsabstände gefordert, die das 1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) betragen. Daraus ergeben sich große Abstände in von bewohnten Gebieten und damit eine Erschwernis für die Integration in urbane Gebiete. Zusätzlich müssen die Anlagen bei Verdacht von Vereisung abgeschaltet werden. Untersuchungen im Energieforschungspark Lichtenegg haben daraus resultierende Jahresertragsverluste von 10 % bis 12 % ermittelt. Aus diesem Grund arbeitet die ARGE Energieforschungspark Lichtenegg auch am Thema der Vereisung, um Kleinwindkraft auch in besiedelten Gebieten als sichere Technologie zu etablieren.



Abbildung 109: Vereisungsereignisse Energieforschungspark Lichtenegg

Um Eiswurf zu vermeiden und so den Gefährdungsumkreis zu verringern, ist für KWEA in besiedelten Gebieten eine Eiserkennung mit automatischer Abschaltung einzurichten. Darüber hinaus sind weitere Sicherheitsmaßnahmen zur Risikoreduktion vorzusehen. Hierzu zählen beispielsweise der Einsatz von Anti-Eis Beschichtungen, die Thermischen Enteisung der Anlage oder das Einrichten von Schutzzonen unter der Anlage.

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens ist nachzuweisen, dass durch Eiswurf bzw. Eisabfall keine zusätzliche Gefährdung der Umgebung verursacht wird. Um Eiswurf zu unterbinden, ist es daher erforderlich, die Anlage bei Vereisung verlässlich abzustellen. Die zuverlässige Detektion der Vereisung – bereits bei Großwindkraftanlagen kein leichtes Unterfangen – stellt jedoch eine große Herausforderung für kleine Windkraftanlagen dar. Da die bei Großwindkraftanlagen verwendeten Sensoren aus Kostengründen in der Regel nicht eingesetzt werden können, wird Vereisung bei KWEA – wenn im Rahmen des Genehmigungsverfahren gefordert – mittels Temperatur- und Feuchtesensoren detektiert. Ein Auslösen der Sensoren bedeutet jedoch lediglich, dass aufgrund der meteorologischen Bedingungen Vereisung entstehen kann (meteorologische Vereisung). Die Anlage wird daher sehr oft abgeschaltet, obwohl keine (instrumentelle) Vereisung vorliegt, wodurch die Produktionszeit der KWEA unnötigerweise verringert wird. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist, dass eine automatische Freigabe nach Ende der meteorologischen Vereisung nur bedingt möglich ist, da instrumentelle Vereisung auch nach Ende der meteorologischen Vereisung bestehen kann (siehe Abbildung 110).

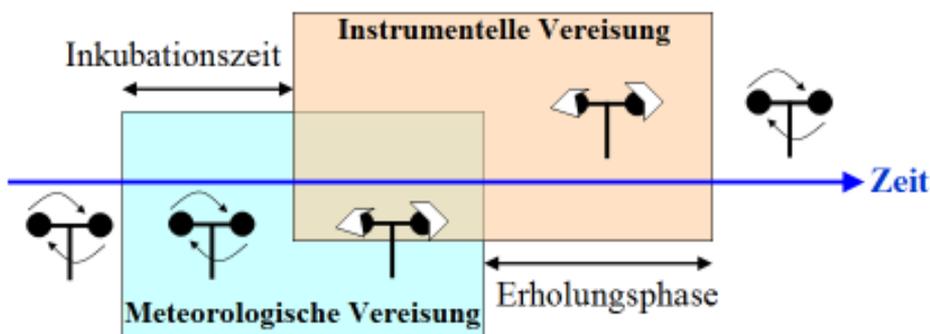


Abbildung 110: Meteorologische und instrumentelle Vereisung (Roßboth, et al. 2016)

Nach Ende der meteorologischen Vereisung muss die KWEA daher manuell z. B. nach Sichtkontrolle wieder freigegeben werden oder eine Freigabe der Anlage erfolgt automatisch nach einer den Witterungsbedingungen angepassten Wartezeit (Erholungsphase). Während die manuelle Freigabe einen erheblichen personellen Aufwand bedeuten kann, der in der Regel nicht wirtschaftlich darstellbar ist, verringert sich durch die Wartezeit bei einer automatischen Freigabe die Zeit, in der die KWEA Energie produzieren könnte, was speziell in den tendenziell windstärkeren und damit ertragsreichen Wintermonaten zu Ertragsseinbußen unbekannter Größenordnung führen kann. Dennoch ist in der Praxis der automatischen Freigabe der Vorzug zu geben, da eine manuelle Freigabe im Alltag nur schwer personell und wirtschaftlich realisierbar ist (erforderliches Monitoring: 7 Tage die Woche, 24 h am Tag). Speziell bei den jeweiligen Grenzwerten (z. B. Grenzwerte für meteorologische Vereisung, der Witterung angepasste Wartezeit / Erholungsphase) gibt es jedoch noch jede Menge Optimierungsmöglichkeiten. Da das Thema Vereisung von KWEA nicht nur in Österreich zunehmend an Bedeutung gewinnt und speziell in besiedelten Gebieten auf Dauer die Entwicklung der Kleinwindkraft behindern könnte, wären hier weitere Forschungsaktivitäten zielführend.

### **Blitzschlag und Brandentwicklung**

Gebäudemontierte KWEA ragen oft über die Blitzfangeinrichtungen der Gebäude hinaus und sind somit von Blitzschlag und in weiterer Folge auch von Brandentwicklung oder anderen Beschädigungen gefährdet. Um dies zu verhindern, sind entsprechende Blitzschutzmaßnahmen vorzusehen. Neben der Ordnungsgemäßen Erdung sämtlicher Anlagenteile können blitzableitende Vorrichtungen einen zusätzlichen Schutz bieten.

### **Wartung**

Unabhängig von der Technologie sind KWEA regelmäßig zu warten!

## **10.3. Umweltwirkungen / Nachhaltigkeit gebäudemontierter KWEA**

Um allfällige negative Auswirkungen von gebäudemontierten KWEA zu vermeiden, sollten folgende Punkte bei der Planung berücksichtigt werden:

- Abschätzung der energetischen und/oder CO<sub>2</sub>-Amortisation auf Basis von Materialdaten, Windverhältnissen am Standort und Leistungsangaben,
- Erstellung eines Recyclingkonzeptes bereit in der Anlagenplanungsphase,
- Verringerung versiegelter Flächen auf ein absolutes, für die Statik nötiges Minimum. Das bedeutet bei entsprechenden Rahmenbedingungen – positive Einstellung der Betroffenen und/oder Holzkonstruktion im Giebeldach – die Dachmontage vorzuziehen,
- Einbeziehen der Anwohner:innen/Anrainer:innen in den Planungsprozess,
- Planung von Einhausungen zum Schutz von Vögeln, Verringerung des Diskoeffekts und Erhöhung der Sicherheit,
- Planung der Masthöhe auch nach Akzeptanz und Sichtbarkeit für Anrainer:innen und Anwohner:innen,
- Reduktion von Betriebsstoffen wie Schmiermitteln und Absicherung gegen Austrag in die Umwelt.

# 11 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

## 11.1. Auswirkungen von komplexen Hindernissen auf die Strömung sowie auf die Anströmung von gebäudemontierten Kleinwindenergieanlagen

Simulationsergebnisse von Abohela et al. 2012 haben gezeigt, dass sich vor einem Hindernis wie einem Flachdachgebäude Stauzonen bilden (siehe Abbildung 111 blau), welche eine Reduktion der Windgeschwindigkeiten verursachen. Über dem Gebäude kommt es zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit (siehe Abbildung 111 orange) aufgrund einer Stauung der Strömung. Hinter dem Gebäude ergibt sich eine hoch turbulente Zone mit niedriger Windgeschwindigkeit.

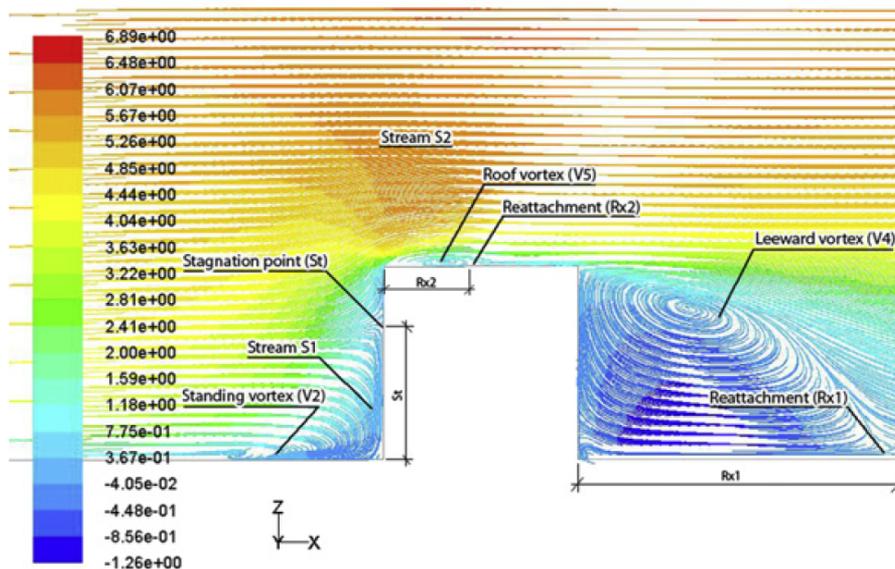


Abbildung 111: Simulationsergebnisse von Windgeschwindigkeiten bei Hindernissen (Abohela et. al 2012)

Die Messungen haben die Angaben aus Theorie und Simulation größtenteils bestätigt. Hinter dem Flachdach konnte einerseits eine turbulente Zone festgestellt werden, welche nicht wesentlich über das Hindernis hinausragt. Dessen horizontale Ausdehnung beträgt im Schnitt das Doppelte der Hindernishöhe. Die beschleunigte Zone tritt knapp über dem Flachdach auf und hat eine vertikale Ausdehnung um den Faktor 2 – daher doppelte Höhe des Flachdachs. In der Nabenhöhe, welche 7 m beträgt (Gebäudehöhe\*2,09), liegt eine Beschleunigung der Windgeschwindigkeit von 7 % vor.

Das Giebeldach zeigt im Vergleich zum Flachdach einen wesentlich größeren Einfluss auf die Nachlaufströmung. Es bilden sich knapp über dem Dach hohe Beschleunigungen der Windgeschwindigkeit aus. In Nabenhöhe, welche in 7 m liegt (Gebäudehöhe\*1,44), liegt eine durchschnittliche Erhöhung der Windgeschwindigkeit von 2 % vor. Hinter dem Gebäude liegt ergibt sich ein größerer Einfluss auf den Nachlauf. Der Einfluss hat eine horizontale Ausdehnung, welche

zumindest das 3,5-fache der Gebäudehöhe beträgt. Vertikal dehnt sich die turbulente Zone um das 1,5-fache der Gebäudehöhe aus. Es bilden sich zwei gegeneinander gerichtete Wirbel aus, die jeweils eine starke Reduktion der Windgeschwindigkeit aufweisen.

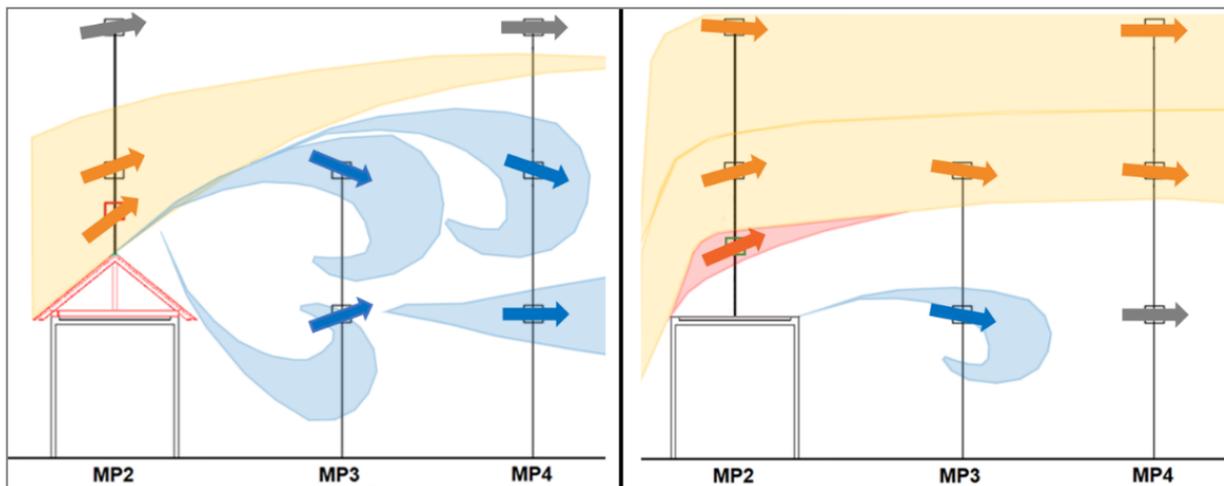


Abbildung 112: Messergebnisse und Visualisierung der Strömung

Für die Installation von KWEA bedeuten diese Ergebnisse, dass eine Aufdachmontage aus strömungstechnischer Sicht sich vorteilhaft auf den Ertrag auswirkt. Über dem Giebeldach sind die positiven Effekte tendenziell geringer als über dem Flachdach, da hier 2 % Erhöhung (Giebeldach) zu 7 % Erhöhung (Flachdach) gemessen wurden. Der Nachlauf ist bei Giebeldächern aufgrund der vertikalen Ausdehnung der turbulenten Zone als problematischer zu betrachten als bei Flachdächern. Aus diesem Grund sollte der Abstand von mehreren Giebeldächern in Hauptwindrichtung zueinander zumindest das 5-Fache der Gebäudehöhe betragen. Bei Flachdächern kann aufgrund der geringen vertikalen Ausdehnung der turbulenten Zone der Abstand reduziert sein. Eine exponierte Lage des Gebäudes im Vergleich zu anderen Objekten kann hier auch zu geringeren Abständen führen.

## 11.2. Auswirkungen dachmontierter KWEA auf deren Performance

### 11.2.1. Auswirkungen auf den Energieertrag

Abbildung 113 zeigt die berechneten Jahresenergie der untersuchten KWEA für verschiedene Montageformen. Grundsätzlich erzielen alle KWEA am Giebeldach (rechnerisch) den höchsten Ertrag.

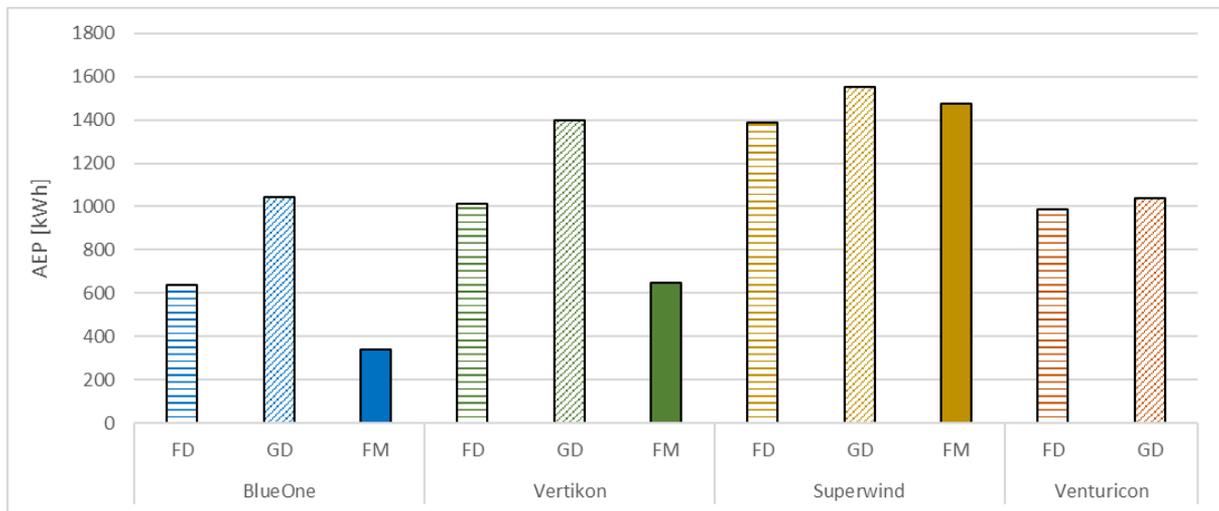


Abbildung 113: Jahresenergieproduktion (AEP) der betrachteten Anlagentypen und Montageformen

Während der Einfluss der Montageart jedoch bei der Superwind gering ausfällt, variiert dieser bei der BlueOne und der Vertikon M stärker.

Vor allem am freistehenden Mast können beide Anlagen deutlich geringere Erträge erzielen als am Giebeldach, wie in Tabelle 35 ersichtlich. Ein Blick auf die Leistungskennlinien (siehe Abschnitt 7.4) bestätigt, dass beide Anlagen am Giebeldach am besten performen.

Tabelle 35: Überblick der berechneten Jahresenergieerträge für verschiedene KWEA und Montagearten

KWEA	Montageart	Berechneter Jahresenergieertrag	Abweichung zu GD
		kWh	in %
BlueOne	Flachdach	637,6	-39,02%
	Giebeldach	1045,5	-
	Freistehender Mast	339,5	-67,52%
Vertikon	Flachdach	1013,7	-27,41%
	Giebeldach	1396,6	-
	Freistehender Mast	646,4	-53,72%
Superwind	Flachdach	1385,9	-10,66%
	Giebeldach	1551,3	-
	Freistehender Mast	1472,1	-5,10%
Venturicon	Flachdach	985,5	-4,94%
	Giebeldach	1036,7	-
	Freistehender Mast	-	-

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle untersuchten KWEA am Giebeldach die beste Performance erreichen, gefolgt vom Flachdach und dem freistehenden Mast. Der Einfluss der Montageart variiert jedoch von Anlage zu Anlage. Während bei der Superwind keine Empfehlung für eine Montageart ausgesprochen werden kann, sollte die Vertikon M nach Möglichkeit auf einem Giebeldach betrieben werden. Ein Grund für die gute Performance der Vertikon M am Giebeldach könnte die Schrägströmung sein, die durch das Giebeldach verursacht wird.

Ähnlich verhält es sich bei der BlueOne. Hier weist jedoch die am Giebeldach gemessene LK nur bis zu einer Windgeschwindigkeit von ca. 9 m/s die höchsten Leistungen auf und fällt bei höheren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zur am Flachdach bzw. am LK-Mast gemessenen Kennlinie ab. An Standorten mit geringen Windgeschwindigkeiten wäre daher eine Montage auf einem Giebeldach zu empfehlen, während an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten dem Flachdach der Vorzug zu geben ist.

### 11.2.2. Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit

Wie bereits in Abschnitt 0 ausgeführt, wurden für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit die Stromgestehungskosten basierend auf den Investitions- und Betriebskosten, dem berechneten Jahresenergieertrag sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahre berechnet. Eine Übersicht ist in Abbildung 114 verfügbar.

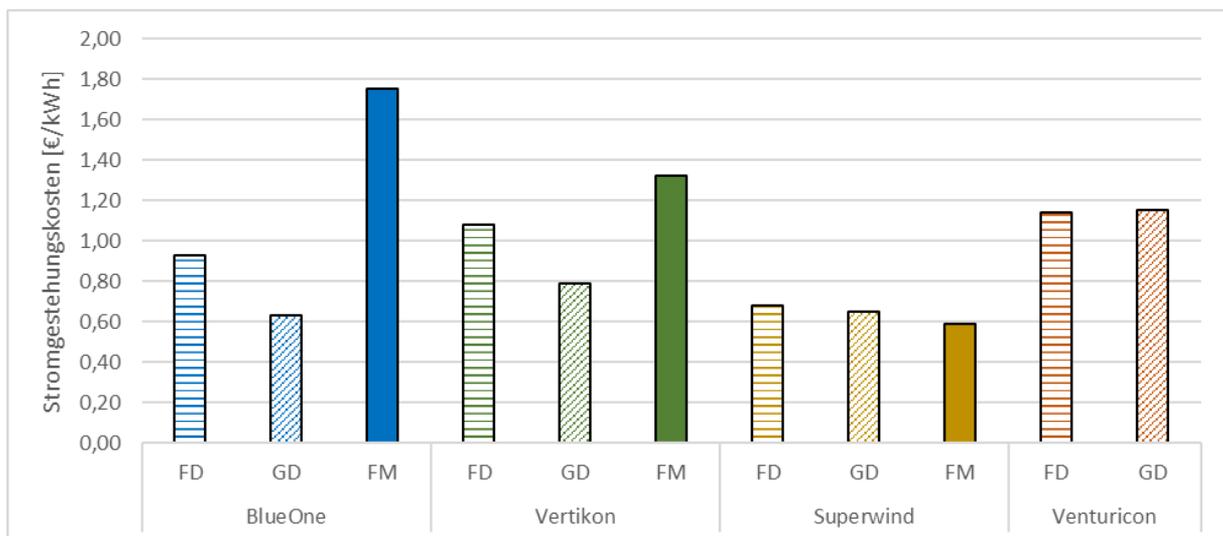


Abbildung 114: Stromgestehungskosten der betrachteten Anlagentypen und Montageformen

Obwohl Montage und Betrieb auf einem Gebäude in der Regel höhere Investitionskosten verursachen, sind die Stromgestehungskosten der BlueOne sowie der Vertikon M am Giebeldach am geringsten. Anders bei der Superwind, die bei allen drei Montagearten ähnlich hohe Erträge erzielen konnte. Hier können die zusätzlichen Investitionskosten für die Gebäudemontage nicht ausgeglichen werden. Aus wirtschaftlicher Sicht ist daher der Betrieb der Superwind auf einem freistehenden Mast empfehlenswert.

Ein wirtschaftlicher Betrieb ist jedoch – auch an einem überdurchschnittlich guten Windstandort wie dem Energieforschungspark Lichtenegg – unter den getroffenen Annahmen bei keiner der untersuchten KWEA innerhalb der Lebensdauer von 20 Jahren möglich. Mit Stromgestehungskosten

im Bereich von 0,60 EUR / kWh bzw. darüber ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage in Österreich unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten von 20,415 Cent / kWh<sup>6</sup>) selbst bei einem sehr hohen Eigenverbrauchsanteil außer Reichweite.

### **11.3. Auswirkungen unterschiedlicher, dachmontierter KWEA auf das Gebäude, dessen Bewohner und die unmittelbare Umgebung**

Wie alle rotierenden Maschinen, verursachen KWEA im Betrieb Vibrationen und Schwingungen, welche dynamische Lasten in sämtliche Komponenten als auch in das Tragwerk induzieren. Anders als bei statischen Lasten, welche mittels standardisierter Berechnungen und Programmen ermittelt werden können, werden dynamische Lasten sowohl in der Norm für Kleinwindkraftanlagen IEC 61400-2 als auch bei der Entwicklung und Dimensionierung von KWEA und deren Tragwerk oft vernachlässigt. Dieser Umstand hat in der Vergangenheit vermehrt zu Entwicklung von Körperschall und Beschädigung der Anlage bzw. des Tragwerks geführt.

Die Evaluierung der Körperschallemissionen im Gebäude haben gezeigt, dass diese Werte um 60 dBA annehmen können, was bei dauerhafter Belastung als gesundheitsschädlich eingestuft werden kann. Eine effektive Dämpfung bzw. Schwingungsentkopplung ist bei Gebäudemontage als ein wichtiger Bauteil einzustufen. Schäden am Gebäude verursacht durch die Anlagen wurden nicht festgestellt. Die bereits bestehenden Schwingungsentkopplungseinheiten haben hierbei als Schutz für das Gebäude gewirkt.

Gebäudemontierte KWEA können bei nicht-Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ein erhebliches Gefährdungspotenzial darstellen. Es sind daher Vorkehrungen zu treffen, um Eiswurf und Eisabfall sowie sich lösende Anlagenteile zu vermeiden. Da KWEA zur Kategorie elektrische Maschinen gehören, sind auch entsprechende elektrische Sicherungsmaßnahmen vorzusehen. Dies beinhaltet neben Leitungs- und Personenschutz auch ein angemessenes Blitzschutzkonzept

### **11.4. Umweltwirkungen gebäudemontierter KWEA**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass KWEAs auch im bebauten Gebiet prinzipiell das Potenzial haben, positiv zur Energiewende beizutragen. Bei Planung und Betrieb sind jedoch folgende Aspekte zu beachten.

#### **11.4.1. Auswirkungen auf Anwohner:innen/Anrainer:innen**

Eine detaillierte Erhebung der gesellschaftlichen Wahrnehmung von Kleinwind von Tatchley et al. (2016) mit 335 Teilnehmer:innen in Großbritannien weist auf eine generelle positive Einstellung der Bevölkerung zu Kleinwindkraftanlagen hin. Für die Standorte „auf Gebäuden“ und „auf Schulen“ besteht eine große Zustimmung, ebenso für „auf Feldern“. Syngellakis et al. (2006) gehen im urbanen Bereich außerdem davon aus, dass Anlagen mit horizontaler Achse auf größere Akzeptanz stoßen als jene mit vertikaler Achse, da sie im städtischen Umfeld als ästhetischer erscheinen können.

---

<sup>6</sup> <https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung>

Leicht besorgt bzw. unentschlossen sind die Befragten über die Auswirkungen auf den umgebenden Naturraum (Tiere) sowie über die Lärmbelastigung. Hier besteht nicht nur weiterer Forschungsbedarf (Park et al. 2013) sondern auch Informationsbedarf in der Bevölkerung.

Die für die Akzeptanz wichtige Lärmentwicklung blieb bei allen untersuchten Anlagen im Allgemeinen unter den für Siedlungsgebiete festgelegten Grenzwerten. Bei Windgeschwindigkeiten über 6 m/s kommt es zu Überschreitungen. Eventuell können in diesem Fall, bei Montage in Wohngebieten, Abschaltungen überlegt werden, um die Akzeptanz für die Technologie zu erhöhen.

Ob die Anwohner von Kleinwindkraftanlagen eine Lärmbelastigung empfinden oder nicht, hängt lt. Taylor et al. (2013) weniger von der Entfernung oder Sichtbarkeit der Anlage ab als von der persönlichen positiven oder negativen Einstellung zu Windkraftanlagen. Diese steht dabei in keinem Zusammenhang mit der Sichtbarkeit der Windanlagen von der Wohnung aus (Taylor et al. 2013). Es zeigt sich auch hier, dass Information und Partizipation der Anwohner:innen wichtiger Teil der Planungen sein sollten.

Vibrationen und Schwingungen werden bei Montage auf dem Dach deutlich unter den Grenzwerten auf das Gebäude selbst und damit ins Innere übertragen. Hier ist festzuhalten, dass bei Montage auf einem Giebeldach mit Holzkonstruktion eine zusätzliche Dämpfung zu erzielen ist.

Schattenwurf und Diskoeffekt nehmen mit der Länge der Rotorblätter zu. Auch wenn der Schattenwurf weniger gut beeinflusst werden kann, kann angenommen werden, dass er im dicht bebauten Gebiet nicht so störend wahrgenommen wird, wie auf weniger bebauten Arealen, wo zusätzliche Schatten deutlich sichtbar sind. Der Diskoeffekt kann durch Einhausungen der Anlage verringert werden, was jedoch Auswirkungen auf die Energiebilanz hat. Ob Bewohner:innen die Anlagen tatsächlich als visuelle Belästigung empfinden, ist noch nicht hinreichend geklärt. Bei einer Auf-Dach Befestigung könnten die Höhe des Mastes und die Platzierung auf dem Dach eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz spielen, dazu fehlt es jedoch an wissenschaftlichen Erkenntnissen (Micallef & Van Bussel 2018).

Die Sicherheit der Anlagen kann durch unterschiedliche, zusätzliche Maßnahmen wie Einhausungen und Eissensoren erhöht werden.

Die genannten Effekte spielen außerhalb von Wohngebieten, z. B. in Gewerbegebieten unter Umständen eine untergeordnete Rolle, und müssen nicht im gleichen Ausmaß bei der Planung berücksichtigt werden.

Die Wirtschaftlichkeit ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen für die Betreiber:innen einer Anlage nicht darstellbar. Speziell in Industriegebieten, wo die Strompreise geringer sind als bei privaten Personen, ist ein wirtschaftlicher Betrieb noch weniger möglich. Ein Fördersystem wie für andere Technologien im Bereich der erneuerbaren könnte hier die Weiterentwicklung und Implementierung unterstützen.

#### **11.4.2. Auswirkungen auf die Umwelt**

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die energetische Amortisation nicht bei allen Anlagen bzw. bei allen Montagearten gegeben ist. Es ist daher im Sinne eines Beitrags zu Energiewende und Klimaschutz notwendig, eine Amortisation in Bezug auf Energie oder auch CO<sub>2</sub>-äqu. jeder Anlage im Rahmen der

Planung sicherzustellen. Die gilt besonders für die Montage an freistehenden Masten, die in die Berechnungen miteinbezogen werden müssen.

Da trotz geringer Anzahl entsprechender spezifischer Studien mit Vogelschlag durch KWEA zu rechnen ist, sind entsprechende Vorkehrungen, wie z. B. Einhausungen zu treffen, um diesen zu verhindern. Dies gilt für alle Gebiete besonders aber für artenreiche Stadtränder und ländliche Siedlungsgebiete.

Die am Standort eingesetzten Chemikalien und Betriebsstoffe sind von sehr geringer Menge und nicht toxisch. Trotzdem muss das Austreten in die Umwelt verhindert werden. Um Abfälle zu reduzieren, sind Recyclingkonzepte notwendig. Mittelfristig wäre es sinnvoll, einen Mindestanteil von eingesetztem Sekundärmaterial zu definieren. Das verbessert auch die Energiebilanz.

Im Sinne von Bodenschutz und Flächennutzung sind Versiegelungen zu vermeiden. Im Falle der Kleinwindkraft bedeutet das, bevorzugt bereits versiegelte Flächen zu nutzen, bzw. Dachmontagen dem freistehenden Mast vorzuziehen.

### **11.4.3. Globale Auswirkungen**

Im Rahmen der globalen Wertschöpfungskette spielen Konfliktrohstoffe und kritische Rohstoffe eine wichtige Rolle. Hier sollte zukünftig genauer auf Herkunft von Rohstoffen, Substitutionsmöglichkeiten und Einsatz von Sekundärmaterialien geachtet werden.

Auch die Berücksichtigung von Arbeitsbedingungen entlang der Wertschöpfungskette wäre im Sinne eines künftigen Lieferkettengesetzes wünschenswert.

# 12 Verzeichnisse

## 12.1. Literaturverzeichnis

- Abohela I. et al., 2013, Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. *Renewable Energy* 50, 1106-1118
- Abohela I., Hamza N., Dudek S., 2012, Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. Newcastle.
- Adensam, H., S. Schidler, et al., 2009, Nachhaltigkeitsaspekte bei der Standortwahl von Biomasse(heiz)kraftwerken. BFW, Wien
- Bauer, K. und S. Wild, 2008, Nachhaltigkeitskriterien für Kleinwasserkraftanlagen. Kolleg Erneuerbare Energien. Wien, TGM
- Beidinger, T., 2018, Kritikalitätsbewertung des Materialbedarfs für die europäische Energiewende. Masterthesis, Fachhochschule Technikum Wien, Wien
- Bluepower GmbH, 2019, <https://www.bluepower.at/blueone/>; 20.01.2021
- BMWFJ, 2012, Anforderungskatalog für die Beurteilung von kleinen Windenergieanlagen
- Cace, J., Syngellakis, K., Niel, M., Clement, P., Heppener, R., Peirano, E., 2007, Urban Wind Turbines. Guidelines for small wind turbines in the built environment. Intelligent Energy Europe
- Cattin R., Heikkilä U., 2016, Evaluation of ice detection systems for wind turbines, Bern.
- DeTec Vision GmbH, 2015, <http://www.detec-vision.de/de/vertikon.html>; 15.12.2020
- DIN EN ISO 14044:2006, 2018, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- E-Control, 2019, Physikalische Importe und Exporte elektrischer Energie-Jahresentwicklung. <https://www.econtrol.at/statistik/strom/betriebsstatistik/jahresreihen#GES>; 14.03.2019
- Europäische Union, 2017, Verordnung (EU) 2017/821 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette für Unionseinführer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0821&qid=1495186376778&from=DE>; 28.01.2021
- European Commission, 2017, Methodology for establishing the EU list of critical raw materials. Guidelines – Study. Brussels. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-32064602>; 28.01.2021
- European Commission, 2019, Energy performance of buildings directive. [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)

- European Commission, 2020, Study on the review of the list of critical raw materials. Final Report. Brussels
- Gasch R., Kamieth R., 2016, Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 9. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Google Maps, 2019, Transportwege der LKWs und PKW mit Anhänger, <https://www.google.at/maps/dir///@47.696472,11.1045472,7z/data=!4m2!4m1!3e0?hl=de;> 07.04.2019
- Halbhuber, W., 2014, Gesamtsystem Kleinwindkraft: Anlagenkonzepte – Ertragsoptimierung - Netzeinspeisung, Diplomica Verlag, Hamburg
- Hau E., 2008, Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Heier, S., 2009, Windkraftanlagen. Systemauslegung, Netzintegration und Regelung. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Hunt, J.C.R., 1971, The effect of single buildings and structures. Phil. Trans. Roy. Lond. A. 269, 457-467
- Kals, J., 2010, Betriebliches Energiemanagement. Eine Einführung. Kohlhammer, Stuttgart
- Klöpffer, W., Grahl, B., 2009, Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH, Weinheim
- Kosasih, B., Saleh Hudin, H., 2016, Influence of inflow turbulence intensity on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model. Renewable Energy 87, 154-167
- Ledo, L. et al., 2011, Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. Renewable Energy 36, 1379-1391
- Leonhartsberger, K., Hirschl, A., Peppoloni, M., 2019a, Kleinwindkraftreport Österreich 2018. Verfügbar unter <https://www.technikum-wien.at/kleinwindkraftreport>
- Leonhartsberger, K., Peppoloni, M., Hirschl, A., Baumann-Stanzer, K., Stenzel, S., Lotteraner, C., Leeb, K., Klappacher, J., Tiefgraber, C., Zajicek, L., Drapalik, M., Reiterer, D., Teppner, R., Auer, M., 2019b, Urbane Windenergie - Entwicklung von Beurteilungsmethoden für den Einsatz von Kleinwindenergieanlagen in urbaner Umgebung. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 30/2019
- Lohs, K., Elstner, P., Stephan, U., 2009, Fachlexikon Toxikologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Lubitz, W.D., 2014, Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. Renewable Energy 61, 69-73
- Malle, S., Stortecky, S., 2018, Lebenszyklusanalysen (LCA) von Kleinwindkraftanlagen, FH Technikum Wien, Wien
- Micallef, D., & Van Bussel, G. (2018). A Review of Urban Wind Energy Research: Aerodynamics and Other Challenges. Energies, 11(9), 2204.
- Mikkelsen K., 2013, Effect of free stream turbulence on wind turbine performance. Masterthesis, Norwegian University of Science and Technology

- Nentwig W., 2005, Humanökologie. Fakten – Argumente – Ausblicke. Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Niederhofer S., 2016, Auswirkungen von turbulenten Windströmungen und Böen auf die Schallemissionen von Kleinwindenergieanlagen am Beispiel der Amperius VK 250, Wien.
- OVE/ON, 2011, ÖVE/ÖNORM EN 61400-2 Windenergieanlagen Teil 2: Sicherheit kleiner Windenergieanlagen. Österreichischer Verband für Elektrotechnik und Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- Ozmen, Y., et al., 2016, Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles. *Building and Environment* 95, 63-74
- Park, K. J., Turner, A., & Minderman, J. (2013). Integrating applied ecology and planning policy: the case of micro-turbines and wildlife conservation. *Journal of applied ecology*, 50(1), 199-204.
- Peacock, A.D. et al, 2008, Micro wind turbines in the UK domestic sector. *Energy and Buildings* 40, 1324–1333
- Pena, A., et. al., 2014, Should we really be concerned about obstacles in wind resource assessment. DTU Wind Energy, Technical University of Denmark. Verfügbar unter <http://www.ewea.org/annual2015/conference/allposters/PO142.pdf>
- Ragheb, M., 2014, Wind Turbines in the urban environment. University of Illinois at Urbana-Champaign
- Reinhold, C., et. al. (2012) Windkraft - Chancen für Österreich? Ökologische und ökonomische Aspekte der Nutzung des erneuerbaren Energieträgers Wind mit spezifischer Berücksichtigung der Verhältnisse im urbanen Raum. Wien, Juli 2012
- Reitinger, W. GmbH, 2018, Mobilkrane- Information. <https://www.w-reitinger.com/>; 24.03.2019
- Roßboth, T., Krenn, A., Tiefenbacher, K. (2016) Evaluierung von Eiserkennungssystemen. Endbericht, erstellt im Zuge der österreichischen Beteiligung beim Task 19 der IEA-Wind, Friedburg, 10. August 2016
- Schidler, S., 2003, Technikfolgen-Abschätzung der grünen Bioraffinerie. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien
- SeaRates LTD., 2019, Distance and Time, <https://www.searates.com/services/distances-time/>; 10.04.2019
- Superwind GmbH, 2015, <https://www.superwind.com/wp-content/uploads/2018/05/Superwind350-Manual-12V-24V-09-01-2016-Final.pdf>; 04.05.2020
- Syngellakis, K., Carroll, S., & Robinson, P. (2006). Small wind power: Introduction to urban small scale wind in the UK. *Refocus*, 7(2), 40-45.
- Tatchley, C., Paton, H., Robertson, E., Minderman, J., Hanley, N., & Park, K. (2016). Drivers of public attitudes towards small wind turbines in the UK. *PloS one*, 11(3), e0152033.
- Taylor, J., Eastwick, C., Lawrence, C., & Wilson, R. (2013). Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy*, 55, 120-127.
- Thomsen, K. M., Hartmann, S., Reers, H., Schauer-Weissahn, H., Lüdtkke, B., Reinhard, H., ... & Sohler, J. (2020). Berücksichtigung von Artenschutzbelangen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen. Bfn Skripten.

- Toja-Silva, F et al., 2016, An empirical–heuristic optimization of the building-roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings. *Applied Energy* 164, 769–794
- Twele, J., 2013, Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum – Ein Leitfaden, HTW Berlin, Berlin.
- Venturicon Windturbines GmbH, s.a., [http://venturicon.co.uk/wp-content/uploads/2020/05/4-2019-Technical-Details-3ZERO\\_UK\\_A5Inverter-Download.pdf](http://venturicon.co.uk/wp-content/uploads/2020/05/4-2019-Technical-Details-3ZERO_UK_A5Inverter-Download.pdf); 20.01.2021
- Verbraucherzentrale NRW, 08.03.2017, Kleine Windenergieanlagen. Stromerzeugung in eigener Hand. <https://www.verbraucherzentrale.de/windenergie>; 16.03.2018
- Walker, S.L., 2011, Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale—A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy and Buildings* 43, 1852–1862
- Warmuth, H., Zimmer, F., Prokschy, H., Leeb, K., Reiterer, D., Sterrer, R., Nanning, T., Kleinwindkraftanlagen - Qualitätssicherung, Netzeinbindung, Geschäftsmodelle und Information. Blue Globe Report Erneuerbare Energien #6/2014, <http://energieforschungspark.at/download/BGR0062014EEneueEnergien2020.pdf>
- WWEA, 2017, Small Wind World Market 2017. [http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small\\_wind\\_/SWWR2017-SUMMARY.pdf](http://www.wwindea.org/wp-content/uploads/filebase/small_wind_/SWWR2017-SUMMARY.pdf)  
[http://www.wwindea.org/download/small\\_wind\\_/SWWR2016-SUMMARYR\\_2.pdf](http://www.wwindea.org/download/small_wind_/SWWR2016-SUMMARYR_2.pdf); 14.12.2017

## 12.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luvläufer (links) und Leeläufer (rechts) (Quelle: eigene Darstellung) .....	14
Abbildung 2: vertikalachsiger Darrieus-Helix Rotor (rechts) und Funktionsprinzip (links) (Quelle: eigene Darstellung) .....	16
Abbildung 3: Savonius-Rotor (links) und Funktionsprinzip (rechts) (Quelle: eigene Darstellung).....	17
Abbildung 4: Mantelturbine (links) und Funktionsprinzip (rechts) (Quelle: eigene Darstellung).....	18
Abbildung 5: Installierte Gesamtleistung (links) sowie Anzahl (rechts) der weltweit in Betrieb befindlichen KWEA von 2010 bis 2015 (WWEA 2017) .....	19
Abbildung 6: Anzahl der Ende 2015 weltweit in Betrieb befindlichen KWEA (WWEA 2017) .....	19
Abbildung 7: Gesamtleistung der Ende 2015 weltweit in Betrieb befindlichen KWEA (WWEA 2017).	20
Abbildung 8: Anzahl sowie Gesamtleistung der in Österreich zum Stichtag 31.12.2018 in Betrieb befindlichen KWEA sowie deren Aufteilung auf die Leistungsklassen kleiner 1 kW, 1 kW bis 10 kW sowie größer 10 kW .....	21
Abbildung 9: Überblick über die Akteure des österreichischen Kleinwindkraftmarkts im Jahr 2018 ..	21
Abbildung 10: Erfahrungen aus dem Energieforschungspark Lichtenegg: gebrochener Stahlmast einer KWEA (links), gebrochener Flügel einer KWEA (Mitte links), abgestürzter Rotor (Mitte rechts), defekte KWEA Typ Windtronics (rechts) .....	26
Abbildung 11: Impressionen Energieforschungspark Lichtenegg .....	28
Abbildung 12: Impressionen Energieforschungspark Lichtenegg .....	28
Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (rechts) und Windrose (links) .....	29
Abbildung 14: Installation Vertikon M und SuperWind 1250 auf Giebel- und Flachdach .....	30
Abbildung 15: Grundriss Infrastruktur (links) und Windrose (rechts) im Energieforschungspark Lichtenegg .....	31
Abbildung 16: Messung freies Feld und Datenlogger .....	31
Abbildung 17: Messung Flachdachgarage und Giebeldachgarage.....	32
Abbildung 18: Installation Kleinwindkraftanlage und Leistungsmessung.....	32
Abbildung 19: Konfiguration der Gebäude, Szenario 1: beide Garagen mit Flachdach (links). Szenario 2: Garage links mit Giebeldach, Garage rechts mit Flachdach (rechts). .....	33
Abbildung 20: Windfeld für die Höhenschicht 3,0 bis 3,5 m bei Windrichtung 360. Szenario 1: beide Garagen mit Flachdach (links) und ausgewählte Modellgitterpunkte in MISKAM für die detaillierte Ergebnisauswertung (rechts) .....	33
Abbildung 21: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei Windrichtung 360° bei Szenario 1, Flachdach, für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018. ....	35
Abbildung 22: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 330° Windrichtung bei Szenario 1, Flachdach, für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018.....	35
Abbildung 23: Windfeld in der untersten Modellschicht 3 bis 3,5 m über Grund modelliert mit MISKAM .....	36
Abbildung 24: Vertikale Windkomponente in der untersten Modellschicht in 3 bis 3,5 m über Grund, modelliert mit MISKAM.....	36

Abbildung 25: W-Komponente in der mittleren Modellschicht 6,5 bis 7,0 m, modelliert mit MISKAM .....	37
Abbildung 26: Vergleich der modellierten und der mittleren gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 180° Windrichtung bei Szenario 1, Flachdach für den Zeitraum 03.10.2017 –11.04.2018 .....	37
Abbildung 27: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 360° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.....	38
Abbildung 28: Grundriss Infrastruktur (links): Die roten Striche hier zeigen die Windrichtung aus 360°. Der orange Kreis zeigt die Geländekante; Aufnahme vom Untersuchungsstandort mit Schneeverwehungen (rechts): der rote Pfeil bezeichnet die Anströmrichtung am Aufnahmetag, die orangen Linien verdeutlichen die Kanten der Schneeweichten .....	38
Abbildung 29: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 330° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach, für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.....	39
Abbildung 30: Windfeld in den untersten Modellschichten 3 bis 3,5 m in MISKAM bei Szenario 2 ....	39
Abbildung 31: Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten bei 180° Windrichtung bei Szenario 2, Giebeldach, für den Zeitraum 12.04.2018 –27.06.2018.....	40
Abbildung 32: Vergleich zwischen Messungen und Modellergebnissen: Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Giebeldach und Flachdach bei 330° Windrichtung.....	41
Abbildung 33: Vergleich der Modellergebnisse für 360° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).....	42
Abbildung 34: Vergleich der Modellergebnisse bei 330° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).....	43
Abbildung 35: Vergleich der Modellergebnisse bei 180° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 1 (Flachdach).....	43
Abbildung 36: Vergleich der Modellergebnisse bei 360° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).....	44
Abbildung 37: Vergleich der Modellergebnisse bei 330° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).....	44
Abbildung 38: Vergleich der Modellergebnisse bei 180° Windrichtung am Punkt MP2/KWEA bei Szenario 2 (Giebeldach).....	45
Abbildung 39: Anordnung der Windsensoren im Energieforschungspark Lichtenegg .....	46
Abbildung 40: Windgeschwindigkeit MP2 über Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zum freien Feld (site calibration) .....	47
Abbildung 41: Windgeschwindigkeit MP4 hinter Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zum freien Feld (site calibration) .....	48
Abbildung 42: Turbulenzintensität MP2 über Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zur Windgeschwindigkeit MP2.....	48
Abbildung 43: Turbulenzintensität MP4 hinter Giebel-(a) und Flachdach(b) in Bezug zur Windgeschwindigkeit MP4.....	49
Abbildung 44: Schematische Darstellung des Untersuchungsgebiets und der Messpunkte Punkte MP1 bis MP6, an welchen Vergleiche zwischen Messungen und Modellergebnissen durchgeführt wurden. ....	51

Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung an MP1 während der Messungen der KWEA (Messzeiträume siehe Tabelle 7).....	57
Abbildung 46: Installationspunkte BlueOne.....	58
Abbildung 47: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der BlueOne .....	58
Abbildung 48: Installationspunkte Vertikon M .....	60
Abbildung 49: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Vertikon M .....	60
Abbildung 50: Installationspunkte Superwind 1250 .....	62
Abbildung 51: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Superwind.....	62
Abbildung 52: Installationspunkte Venturicon.....	64
Abbildung 53: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Venturicon .....	64
Abbildung 54: Leistungskennlinien BlueOne.....	67
Abbildung 55: cp-Kennlinien BlueOne.....	68
Abbildung 56: Leistungskennlinien Vertikon M .....	69
Abbildung 57: cp-Kennlinien Vertikon M .....	70
Abbildung 58: Leistungskennlinien Superwind .....	70
Abbildung 59: cp-Kennlinien Superwind .....	71
Abbildung 60: Leistungskennlinien Venturicon.....	72
Abbildung 61: cp-Kennlinien Venturicon .....	72
Abbildung 62: Vergleich des Schalldruckpegels bei 20 m Entfernung .....	74
Abbildung 63: Energetischer Mittelwert Infraschall & akustischer Schall in Gebäuden.....	75
Abbildung 64: Ordnungsanalyse der Vertikon M Basis am Giebeldach.....	76
Abbildung 65: Flicker-Werte der untersuchten KWEA.....	79
Abbildung 66: Vier Schritte der Klimabilanz nach ISO 14044:2006.....	81
Abbildung 67: Gewählte Systemgrenze für den Lebenszyklus der KWEA, adaptiert nach Klöpffer und Grahl (2009).....	82
Abbildung 68: Veränderung der Kritikalität von Rohstoffen durch die europäische Energiewende – Abschätzung für 2030 (Beidinger 2018) .....	85
Abbildung 69: Konstruktionszeichnung der KWEA Superwind 1250 (Superwind GmbH 2016) .....	89
Abbildung 70: Materialzusammensetzung der KWEA Superwind 1250 in Masseprozent .....	89
Abbildung 71: Konstruktionszeichnung der KWEA Vertikon M/Basis (DeTec Vision GmbH 2015) .....	90
Abbildung 72: Materialzusammensetzung der KWEA Vertikon M/Basis in Masseprozent.....	91
Abbildung 73: Konstruktionszeichnung der KWEA Venturicon (adaptiert nach Venturicon Windturbines GmbH s.a.) .....	92
Abbildung 74: Materialzusammensetzung der KWEA Venturicon in Masseprozent.....	92
Abbildung 75: Konstruktionszeichnung KWEA Bluepower BlueOne (adaptiert nach Bluepower GmbH 2019).....	93
Abbildung 76: Materialzusammensetzung der KWEA Bluepower BlueOne in Masseprozent .....	94

Abbildung 77: Energetische Amortisationsdauer der vier Windturbinen in Jahren .....	96
Abbildung 78: Energetische Amortisationsdauer der KWEA inkl. Wechselrichter und Mastsysteme..	97
Abbildung 79: CO <sub>2</sub> -Amortisationsdauer der vier Windturbinen in Jahren.....	98
Abbildung 80: CO <sub>2</sub> -Amortisationsdauer der vier KWEA inkl. Wechselrichter und Mastsystem .....	99
Abbildung 81: Ausprägungen der an den KWEAs (Giebeldach) untersuchten Kriterien .....	105
Abbildung 82: Ausprägungen der bewerteten Kriterien der KWEA Superwind (links) und der KWEA Vertikon (rechts).....	108
Abbildung 83: Ausprägungen der bewerteten Kriterien der KWEA Bluepower (links) und der KWEA Venturicon (rechts).....	109
Abbildung 84: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Superwind. ....	110
Abbildung 85: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Vertikon M. ....	111
Abbildung 86: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (links) und über Flachdach (rechts) für die KWEA BlueOne .....	112
Abbildung 87: Vergleich des gemessenen und des aufgrund von Strömungssimulationen berechneten Ertrages über Giebeldach (oben) und über Flachdach (unten) für die KWEA Venturicon.....	113
Abbildung 88: Leistungskennlinien der betrachteten KWEA und Montageformen .....	115
Abbildung 89: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA BlueOne im Messzeitraum .....	116
Abbildung 90: Soll-/Ist-Ertrag der Vertikon M im Messzeitraum.....	117
Abbildung 91: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA Superwind im Messzeitraum.....	118
Abbildung 92: Soll-/Ist-Ertrag der KWEA Venturicon im Messzeitraum .....	119
Abbildung 93: Jahresenergieproduktionen (AEP) BlueOne.....	121
Abbildung 94: Stromgestehungskosten BlueOne.....	122
Abbildung 95: Jahresenergieproduktionen (AEP) Vertikon M .....	123
Abbildung 96: Stromgestehungskosten Vertikon M .....	123
Abbildung 97: Jahresenergieproduktionen (AEP) Superwind .....	124
Abbildung 98: Stromgestehungskosten Superwind .....	124
Abbildung 99: Jahresenergieproduktionen (AEP) Venturicon .....	125
Abbildung 100: Stromgestehungskosten Venturicon .....	125
Abbildung 101: Gegenüberstellung des Schwingungsverhaltens der Vertikon M am Giebeldach gemessen am Rotor (oben) und unter dem Entkoppler (unten) .....	127
Abbildung 102: Erfahrungen aus dem Energieforschungspark Lichtenegg: gebrochener Stahlmast einer KWEA (links), gebrochener Flügel einer KWEA (Mitte links), abgestürzter Rotor (Mitte rechts), defekte KWEA Typ Windtronics (rechts) .....	136
Abbildung 103: Schäden durch Vibrationen und Schwingungen .....	138
Abbildung 104: Planungsrichtwerte hinsichtlich zulässiger Immissionsgrenzwerte für verschiedene Widmungskategorien unter Berücksichtigung der einschlägigen Gesetze der Länder (ÖNORM S5021, Teil1).....	140
Abbildung 105: Schallimmissionskarte für Vertikalläufer VK250 (Quelle: www.amperius.de) .....	140

Abbildung 106: Turbulenzinduzierte Schallemissionen – Auswirkung der Turbulenz auf die Ergebnisse des immissionsrelevanten Schalleistungspegels (Niederhofer 2016).....	141
Abbildung 107: Risse an Schweißnähten aufgrund von Resonanzschwingungen .....	143
Abbildung 108: Beschädigung eines Betonfundaments aufgrund von Resonanzschwingungen (links) sowie weitere Schadensbilder aus dem Energieforschungspark Lichtenegg (Mitte und rechts) .....	143
Abbildung 109: Vereisungsereignisse Energieforschungspark Lichtenegg .....	145
Abbildung 110: Meteorologische und instrumentelle Vereisung (Roßboth, et al. 2016).....	145
Abbildung 111: Simulationsergebnisse von Windgeschwindigkeiten bei Hindernissen (Abohela et. al 2012).....	147
Abbildung 112: Messergebnisse und Visualisierung der Strömung.....	148
Abbildung 113: Jahresenergieproduktion (AEP) der betrachteten Anlagentypen und Montageformen .....	149
Abbildung 114: Stromgestehungskosten der betrachteten Anlagentypen und Montageformen.....	150

## 12.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Windgeschwindigkeiten in den Messmonaten mit Zuordnung zur jeweils vor Ort befindlichen Dachkonfiguration .....	41
Tabelle 2: Zu- und Abnahme der Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität, Schrägströmung über Giebel- und Flachdach .....	50
Tabelle 3: Daten der KWEA BluePower Blue One .....	54
Tabelle 4: Daten der KWEA Venturicon 3.Zero Windturbine .....	54
Tabelle 5: Daten der KWEA Vertikon M .....	55
Tabelle 6: Daten der KWEA SuperWind 1250 .....	55
Tabelle 7: mittlere Windgeschwindigkeiten im Messzeitraum der KWEA .....	56
Tabelle 8: Anlagenlogbuch Bluepower BlueOne .....	57
Tabelle 9: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der BlueOne .	58
Tabelle 10: Anlagenlogbuch Vertikon M .....	59
Tabelle 11: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Vertikon M .....	61
Tabelle 12: Anlagenlogbuch Superwind 1250 .....	61
Tabelle 13: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Superwind .....	63
Tabelle 14: Anlagenlogbuch Venturicon .....	63
Tabelle 15: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum der Venturicon .....	65
Tabelle 16: Gemessener Ist- sowie berechneter Soll-Ertrag im Untersuchungszeitraum für die KWEA BlueOne, Vertikon M, Superwind und Venturicon .....	65
Tabelle 17: Zusammenfassung maximale Frequenz- und Spannungsabweichung .....	79
Tabelle 18: Life Cycle Analysis (LCA) – KWEA .....	83
Tabelle 19: Sachbilanz der gleichen Bauteile der untersuchten KWEA .....	88
Tabelle 20: Transportmittel und Transportleistung der Einzelbauteile der drei Mastssysteme .....	89
Tabelle 21: Transportmittel und Transportleistung der Einzelbauteile der KWEA Superwind 1250 ....	90
Tabelle 22: Transportmittel und Transportleistung der KWEA Vertikon M/Basis .....	91
Tabelle 23: Transportmittel und Transportleistung der KWEA Venturicon .....	93
Tabelle 24: Transportmittel und Transportleistung der KWEA BlueOne .....	94
Tabelle 25: Umweltwirkung der KWEA Superwind 1250 und Vertikon M/Basis .....	95
Tabelle 26: Umweltwirkung der KWEA Venturicon und Bluepower BlueOne .....	95
Tabelle 27: Kriterienliste für die Technikfolgenabschätzung .....	101
Tabelle 28: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für BlueOne .....	116
Tabelle 29: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Vertikon M .....	117
Tabelle 30: Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Superwind .....	118
Tabelle 31 Soll-/Ist-Vergleich der Erträge im Messzeitraum für Venturicon .....	119
Tabelle 32: Investitionskosten in EUR (inkl. MWSt.) .....	120
Tabelle 33: Finalisierter Kriterienkatalog .....	129

Tabelle 34: Zusammenfassende Darstellung der Soll- und Ist-Erträge für verschiedene KWEA .....	141
Tabelle 35: Überblick der berechneten Jahresenergieerträge für verschiedene KWEA und Montagearten .....	149

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)