

Ringversuch "Auswertung von Windmessdaten 2018/2019"

des Windgutachterbeirates des Bundesverbandes Windenergie e.V.

Zusammenfassender Bericht der statistischen Auswertungen und ihrer Ergebnisse





Impressum

Bundesverband WindEnergie e.V. Neustädtische Kirchstraße 6 10117 Berlin 030 21234121 0 info@wind-energie.de www.wind-energie.de

Foto

Unsplash/Nikola Johnny Mirkovic

Haftungsausschluss

Die in diesem Papier enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt. Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

Ansprechpartner

Anne Lepinski Fachreferentin Planung und Umwelt a.lepinski@wind-energie.de

Datum

August 2019, Layout Oktober 2019



Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	4
	Tabellenverzeichnis	5
1	Ringversuch Windmessungen – Kontext des vorliegenden Berichtes	6
2	Liste der Teilnehmer	7
3	Aufgabenstellung, Inhalt und Umfang der Ergebnisrückmeldungen	8
4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	14
	4.1 Datenauswertung	14
	4.2 Dateninterpretation	17
5	Danksagung	27



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messmast Sonnenbühl/Hohfleck (links), Messhöhen 138.5 m, 108 m, 78 m (rechts)	8
Abbildung 2: Verworfene Datensätze zu mittlerer Windgeschwindigkeit und mittlerer Windleistungsdichte	. 15
Abbildung 3: Mittlere Windgeschwindigkeit Phase 1	. 18
Abbildung 4: Mittlere Windgeschwindigkeit Phase 2	. 18
Abbildung 5: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte Phase 1	. 20
Abbildung 6: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte Phase 2	. 20
Abbildung 7: Mittlere Abweichung und Standardabweichung Windgeschwindigkeit nach Langzeitdatensatz	. 21
Abbildung 8: Mittlere Abweichung Windleistungsdichte und Standardabweichung nach Langzeitdatensatz	. 21
Abbildung 9: Mittlere Abweichung Windgeschwindigkeit und Standardabweichung nach	
Abbildungsalgorithmus	. 22
Abbildung 10: Mittlere Abweichung Windleistungsdichte und Standardabweichung nach	
Abbildungsalgorithmus	. 22
Abbildung 11: Vergleich des in Phase 1 auf den langen Zeitraum extrapolierten Energieertrags und dessen	
Unsicherheitsbereich mit dem in Phase 2 ermittelten Energieertrag	. 23
Abbildung 12: Windstärkerose Aufgabe A 108 m, Phase 2	. 24
Abbildung 13: Windstärkerose Aufgabe C, Phase 2	. 24
Abbildung 14: Windstärkerose Aufgabe D 108 m, Phase 2	. 25
Abbildung 15: Windgeschwindigkeit (links) und mittlere Windleistungsdichte (rechts) für unterschiedliche	
Tageszeiträume jeweils für Aufgabe B der Phase 1 und Aufgabe A der Phase 2 für 78 m	. 26



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Produktion bei Standardluftdichte, Phase 2	16
Tabelle 2: Produktion bei gemessener Luftdichte, Phase 2	16
Tabelle 3: Mittlere Turbulenzintensität, Phase 1 [%]	17
Tabelle 4: Mittlere Turbulenzintensität, Phase 2 [%]	17
Tabelle 5: Mittlere Windgeschwindigkeit, Phase 1 [m/s]	19
Tabelle 6: Mittlere Windgeschwindigkeit, Phase 2 [m/s]	19
Tabelle 7: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 1 [W/m²]	19
Tabelle 8: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 2 [W/m²]	19



1. Ringversuch Windmessungen – Kontext des vorliegenden Berichtes

In den Jahren 2005, 2008 und 2013 hat der Windgutachterbeirat des BWE e.V. Ringvergleiche zur Herstellung des Langzeitbezugs von WEA-Betriebsdaten durchgeführt und publiziert. Zudem wurde im Jahre 2015 ein Vergleich der Verfahren und Spannbreite der Ergebnisse bei der Erstellung von Windgutachten durchgeführt.

Im Jahr 2018 wurde ein weiterer Ringversuch zur Auswertung von Windmessdaten gestartet und im Jahr 2019 abgeschlossen. Wichtige Aspekte hierbei waren, dass in der Praxis oft eine Messreihe, die weniger als ein Jahr umfasst, ausgewertet und auf einen langen Zeitraum bezogen wird. Auch erfolgen Messungen oft nicht in Nabenhöhe, so dass eine vertikale Extrapolation notwendig wird. Der Ringversuch war in zwei Arbeitsphasen aufgeteilt, um einerseits die Qualität einer zeitlichen Extrapolation auf einen unbekannten Zeitraum mit tatsächlich gemessenen Daten zu validieren. Andererseits wurden die Daten der obersten Messhöhe den Teilnehmern nicht zur Verfügung gestellt, so dass auch die vertikale Extrapolation schließlich anhand tatsächlich gemessener Daten überprüft werden konnte.

Die Vorbereitungs- und Auswertungsgruppe des Ringversuchs, das Organisationsteam, bestand aus den folgenden Personen:

Carsten Albrecht, AL-PRO GmbH & Co.KG

Michael Friedrich, Lahmeyer International GmbH (jetzt Tractebel Engineering GmbH)

Andreas Köhl, Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH

Anne Lepinski, Bundesverband Windenergie e.V.

Susanne Strauß, renerco plan consult GmbH

Sabine Theunert, Meteorologisches Beratungsbüro Theunert

Günter Vahlkampf, SOWITEC development GmbH





2. Liste der Teilnehmer

Folgende Firmen nahmen am Ringversuch teil:

ABO Wind AG

AL-PRO GmbH & Co. KG

anemos GmbH

Deutsche WindGuard GmbH

EWS Consulting GmbH

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

IEL GmbH

Ingenieurbüro Kuntzsch GmbH

Lahmeyer International GmbH

Meteorologisches Beratungsbüro

MeteoServ GbR

Pavana GmbH

PLANKon Ingenieurbüro

ProfEC Ventus GmbH

Ramboll CUBE GmbH

renerco plan consult GmbH

RES Deutschland GmbH

RSC GmbH

SOWITEC development GmbH

TÜV Süd Industrie Service GmbH

UL International GmbH

Wind-Consult GmbH

WINDTEST Grevenbroich GmbH

wpd europe GmbH

Anmerkung: Die Teilnehmer sind nach der Spalte 'Firma' alphabetisch geordnet. Die Reihenfolge der Teilnehmer steht nicht im Zusammenhang mit den bei der Anonymisierung der Ergebnisse vergebenen Teilnehmer-ID's.



3. Aufgabenstellung, Inhalt und Umfang der Ergebnisrückmeldungen

Als Datenbasis für die Durchführung des Ringversuchs stellte die Firma SOWITEC development GmbH freundlicherweise die Daten einer Windmessung zur Verfügung. Diese Messung am Standort Sonnenbühl / Hohfleck in Baden-Württemberg erfolgte an einem Gittermast in den Höhen 78 m, 108 m und 138,5 m.









 $Abbildung\ 1: Messmast\ Sonnenbühl/Hohfleck\ (links),\ Messhöhen\ 138.5\ m,\ 108\ m,\ 78\ m\ (rechts)$

Für den Ringversuch wurden verschiedene Aufgaben zur Extrapolation von den niedrigen Messhöhen auf die oberste Messhöhe sowie von einem kurzen Zeitraum auf den gesamten Messzeitraum bzw. auf einen festgelegten Langzeitraum definiert. Die Windmessdaten wurden hierfür von dem Organisationteam aufbereitet und auf Eignung sowie Plausibilität geprüft.

Der Ringversuch gliederte sich in zwei Phasen, im Folgenden als "Phase 1" und "Phase 2" bezeichnet. In der Phase 1 wurden die Windmessdaten einer verkürzten Periode (6 Monate) untersucht und u.a. auf den tatsächlichen, längeren Messzeitraum von zwei Jahren sowie auf einen Langzeitraum extrapoliert. Zudem



erfolgte die Extrapolation der Windmessung auf das Messniveau 138,5 m unter Zuhilfenahme der Messdaten in 78 m und 108 m Höhe, wobei den Teilnehmern die Messdaten der Messhöhe (138,5 m) nicht zur Verfügung gestellt wurden.

Grundlage der Phase 2 waren die gesamten Messdaten über zwei Jahre. Diese Phase beinhaltete mit Ausnahme der Extrapolation der Kurzzeitdaten auf den zweijährigen Messzeitraum dieselben Aufgaben wie Phase 1. Durch dieses zweistufige Verfahren konnten die Extrapolationen der Teilnehmer mit den tatsächlich gemessenen Werten verifiziert werden sowie Rückschlüsse auf das Verhalten kürzerer im Vergleich zu längeren Messzeitreihen gezogen werden. Es standen Daten über die beiden folgenden Zeiträume zur Verfügung:

· Kurzer Zeitraum: Phase 1: 22.02.2016 – 22.08.2016

Langer Zeitraum: Phase 2: 23.08.2014 – 22.08.2016

Den Teilnehmer wurden hierbei die folgenden Datensätze (10-Minuten Mittelwerte) für die Teilnehmer bereitgestellt:

- · Ungefilterte Rohdaten
- · Vorgefilterte Rohdaten

Die Daten umfassten Windfeldparameter sowie Temperatur und Luftfeuchte in verschiedenen Messniveaus. Die Daten der oberen Messhöhe (138,5 m) für beide Phasen sowie die des zweijährigen Messzeitraums für Phase 1 wurden den Teilnehmern nicht zur Verfügung gestellt.

Folgenden Unterlagen wurden zur Verfügung gestellt:

- Installationsprotokoll
- Kalibrierprotokolle
- · Logbuch der Messung
- · Berechnete Leistungskennlinie der V126 3.3 MW.

Die insgesamt fünf Grundaufgaben (A, B, C, D, E) waren in beiden Phasen identisch, lediglich die Aufgabe B entfiel in der Phase 2, da sich mit dem Vorliegen der kompletten Messung Extrapolationen von kürzeren auf längere (Mess-) Zeiträume erübrigen.

• Definition der Grundaufgaben

	Aufgabenstellung
Aufgabe A	Filterung der Rohdaten der Messhöhen 78 m und 108 m
Aufgabe B	Extrapolation der bereitgestellten vorbereiteten kurzen Zeitreihen der Messhöhen 78 m und
(nur Phase 1)	108 m des Zeitraums 22.02.2016 – 22.08.2016 zurück auf den gesamten (langen)
(Hai i Hase 1)	Messzeitraum bis Messbeginn 23.08.2014, unter Einbeziehung der entsprechend
	vorgegebenen Datenlücken
Aufgabe C	Vertikalextrapolation der bereits vorbereiteten Zeitreihen auf die nicht gelieferte obere
	Messhöhe (138,5 m) für denselben Zeitraum der vorbereiteten Zeitreihe
Aufgabe D	Langzeitextrapolation der bereits vorbereiteten Zeitreihen in den Höhen 78 m und 108 m
	auf die Bezugsperiode 2000 – 2015
Aufgabe E	Unsicherheitsbetrachtung zu den Aufgaben A - D



Im Zusammenhang mit diesen Grundaufgaben wurde eine Vielzahl von Einzelparametern zur detaillierten Evaluierung der einzelnen Teile ermittelt, diese von den Teilnehmern in vorbereitete Exceltabellen eingefügt und an den BWE übersandt.

Diese Parameter sind im Folgenden aufgabenspezifisch aufgeführt:

• Richtungsabhängige Parameter

		Aufgabe A (Höhen 78 m und 108 m)	Aufgabe B (Höhen 78 m und 108 m)	Aufgabe C 138,5 m	Aufgabe D (Höhen 78 m und 108 m)
Anzahl verworfener Datensätze		X			
Anzahl veränderter Datensätze		Х			
Mittlere Turbulenzintensität [%]		Х			
Windscherung alpha (78 – 108 n	n)	×			
mittlere Windgeschwindigkeit [n	n/s]	Х	Х	Х	Х
Windleistungsdichte ("Energiege Standardluftdichte [W/m²]	ehalt") bei	х	Х	Х	х
	<=5 [m/s]	Х	х	Х	Х
Quantile der	>5 [m/s] und <=10 [m/s]	x	Х	Х	х
Geschwindigkeitsverteilung [%]	>10 m/s und <=15 [m/s]	X	х	Х	Х
	>15 [m/s]	Х	х	Х	Х
Mittlere Luftdichte [kg/m³]		Х	X	Х	Х
Jahresertrag aus tabellarischer Verteilung bei Standardluftdichte [MWh/a]		x	х	Х	х
Jahresertrag aus tabellarischer Verteilung bei gemessener Luftdichte [MWh/a]		х	х	Х	Х
Jahresertrag auf Zeitreihenbasis bei zeitschrittscharfer Luftdichtekorrektur in [MWh/a]			x		х

Bei den Aufgaben B und D wurden darüber hinaus der Abbildungsalgorithmus sowie die verwendeten Langzeitdatenquellen abgefragt.



• Richtungsabhängige Parameter (sektoriell, 30°-Sektoren)

	Aufgabe A (Höhen 78 m und 108 m)	Aufgabe B (Höhen 78 m und 108 m)	Aufgabe C 138,5 m	Aufgabe D (Höhen 78 m und 108 m)
Häufigkeit pro Sektor [%]	Х	X	Х	Х
Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	Х	х	х	X
Windleistungsdichte bei Standardluftdichte [W/m²]	х	x	х	х
Mittlere Turbulenzintensität [%]	Х			
Windscherung alpha (78 - 108m)	Х			
Quantile der Geschwindigkeitsverteilung	Х			

Parameter unterschiedlicher Tageszeiträume

		Zeitraum Tag (11:00 Uhr bis 15:00 Uhr)	Zeitraum Nacht (23:00 Uhr bis 3:00 Uhr)
Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]		A - D	A - D
Windleistungsdichte bei Standardlu	ftdichte [W/m²]	A - D	A - D
	<=5 [m/s]	A - D	A - D
Quantile der	>5 [m/s] und <=10 [m/s]	A - D	A - D
Geschwindigkeitsverteilung [%]	>10 m/s und <=15 [m/s]	A - D	A - D
	>15 [m/s]	A - D	A - D
Mittlere Luftdichte [kg/m³]		A - D	A - D
Jahresertrag aus tabellarischer Verteilung bei gemessener Luftdichte [MWh/a]		A - D	A - D



• Unsicherheiten (Aufgabe E)

zu Aufgabe A	zu Aufgabe B	zu Aufgabe C	zu Aufgabe D
108 m	78 m + 108 m	138,5 m	78 m + 108 m
Messunsicherheiten	Unsicherheiten der Extrapolation auf den Langzeitraum in %, bezogen auf den Energieertrag	Unsicherheit der Vertikalextrapolation in %, bezogen auf den berechneten Energieertrag	Unsicherheiten der Extrapolation auf Periode 2000 bis 2015 in %, bezogen auf den Energieertrag
Unsicherheiten in m/s:	Konsistenz der Langzeitdatensätze		Konsistenz der Langzeitdatensätze
Anemometerkalibration	Abbildungsalgorithmus		Abbildungsalgorithmus
Operational Characteristic	Länge des Abgleich- zeitraums		Länge des Abgleich- zeitraums
Montageeffekte	Repräsentanz der Langzeitdaten für den Standort		Repräsentanz des Bezugszeitraums in der Vergangenheit
Datenlogger			Projektion Bezugszeitraum auf zukünftigen Betriebszeitraum von 20 Jahren
Datenqualität			Repräsentanz der Langzeitdaten für den Standort
Resultierende			
Messunsicherheit			
Unsicherheit in %			
Angewendet auf Energieertrag			

Nach der Abgabe von Phase 1 zeigte sich, dass einige wenige Parameter von den Teilnehmern mit unterschiedlichen Einheiten in die Ergebnistabellen des Auswertetools eingetragen wurden. So wurden zum Beispiel prozentuale Werte als 4,0 % oder als 0,04 angegeben. Weiterhin waren einige Werte im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Teilnehmer nicht plausibel oder die summarische Häufigkeit ergab bei richtungsabhängigen Parametern über alle Sektoren nicht 100 Prozent. Den Teilnehmern wurde daraufhin die Möglichkeit gegeben, entsprechende Fehler zu korrigieren und die Ergebnisblätter nochmals abzugeben.

Die auf den eingereichten und ggf. überarbeiteten Ergebnissen basierenden Auswertungen des Ringvergleichs sind in den folgenden Kapiteln dargestellt. Das Organisationsteam hat aus den vorliegenden Messdatensätzen für Aufgabe A, B und C jeweils eine Musterlösung erarbeitet, um den Vergleich mit den Teilnehmerergebnissen



zu ermöglichen. Teilweise wurde auch der Median oder der Mittelwert der Teilnehmerergebnisse als Vergleichswert herangezogen.

Im vorliegenden zusammenfassenden Bericht sind die wichtigsten Ergebnisse und Auswertungen dargestellt.

• Zusammengefasster Zeitablaufplan

Vorbereitung, bis Ende Mai	Datenprüfung
2018	Formulierung Teilnahmebedingungen
	Definition Fragestellungen, Design Formulare
Durchführung Phase 1	Versand Teilnahmeunterlagen, Rechnungslegung (BWE)
22.05. – 30.07.2018	Anonymisierung, Harmonisierung
Durchführung Phase 2	Versand Teilnahmeunterlagen
17.08. – 30.10.2018	Anonymisierung
08.11.2018	Nachlieferung Phase 1
ab 09.11.2018	Harmonisierung der Ergebnisse, tabellarische Zusammenfassung
27.05.2019	Verteilung der Ergebnisse als Kurzbericht an die Teilnehmer
ab 05.06.2019	Workshop über eine Stunde am 05.06.2019 in Kassel
	Präsentation der Ergebnisse und Diskussion für Teilnehmer und
	Veranstalter (BWE)
bis Mitte Oktober 2019	Erstellung des Abschlussberichts





4. Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In dem durchgeführten Ringversuch wurden umfangreiche Aufgabenstellungen zur Auswertung von Windmessungen abgefragt, die sich im Wesentlichen in die beiden Themenblöcke Datenauswertung und Dateninterpretation aufgliedern lassen. Dem ersten Block ist beispielsweise die reine Aufbereitung und Auswertung vorliegender Messdaten hinsichtlich diverser Zielparameter wie Windgeschwindigkeit, Windleistungsdichte, Turbulenz etc. zuzuordnen. In den Bereich Dateninterpretation fallen Teilaufgaben wie die Extrapolation auf einen anderen – typischerweise langzeitrepräsentativen – Zeitraum, auf eine andere Messhöhe usw. Der vorliegende Ringversuch zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass aufgrund des verfügbaren Datenumfangs sowohl für die zeitliche Extrapolation als auch für die Höhenextrapolation Aufgabenstellungen möglich waren, bei denen das tatsächliche Ergebnis vorliegt, den Teilnehmern aber zum Zeitpunkt der Bearbeitung nicht bekannt war. Diese komfortable Situation ist, insbesondere hinsichtlich der Extrapolation auf andere/längere Zeiträume, nur selten gegeben.

Es erscheint daher angebracht, die Zusammenfassung in die genannten beiden Themenblöcke aufzugliedern. In den nachfolgenden Tabellen und Abbildungen, bis auf Abb. 7-10, werden teilnehmerbezogene Ergebnisse statistisch oder grafisch als Einzelergebnisse, ggf. farbig gekennzeichnet, dargestellt.

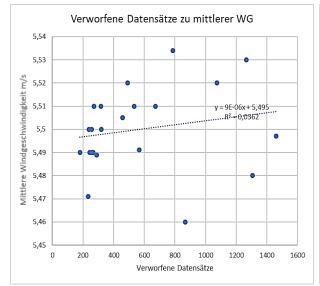
4.1 Datenauswertung

Hinsichtlich des wichtigen Zielparameters der mittleren Windgeschwindigkeit und seiner Richtungsabhängigkeit ergibt sich hier ein bemerkenswert einheitliches Bild, obwohl es offenbar durchaus unterschiedliche Herangehensweisen bei der Datenfilterung gibt. Alle Gutachter ermitteln nahezu dieselbe Windgeschwindigkeit in beiden Phasen, die Standardabweichung ist äußerst gering. Das Ergebnis ist nahezu unabhängig vom Umfang der Datenfilterungen, die die einzelnen Teilnehmer vorgenommen haben. Es zeigt sich auch, dass die Ergebnisse der Teilnehmer sehr nah an der Musterlösung liegen und die ermittelte mittlere Windgeschwindigkeit bei allen Teilnehmern unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheit (± absolute einfache Unsicherheit) im Bereich der Musterlösung liegt.

Es wäre denkbar, dass sich die ermittelte mittlere Windgeschwindigkeit und/oder die mittlere Windleistungsdichte in Abhängigkeit von der Anzahl der verworfenen Datensätze ändert. Dies könnte dann der Fall sein, wenn vornehmlich Datensätze mit meteorologischen Situationen verworfen werden, die zu systematisch höheren bzw. niedrigeren Windgeschwindigkeiten/Windleistungsdichten geführt hätten, zum Beispiel Vereisungssituationen. Wie die folgenden Abbildungen zeigen ist eine solche Abhängigkeit, wenn überhaupt, nur mit viel Mühe zu erkennen.



 Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit (WG) und mittleren Windleistungsdichte (WLD) von der Anzahl verworfener Datensätze



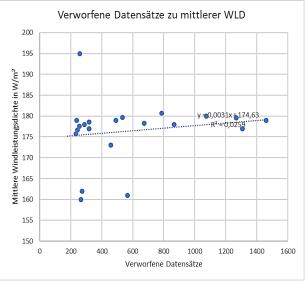


Abbildung 2: Verworfene Datensätze zu mittlerer Windgeschwindigkeit und mittlerer Windleistungsdichte

Erwartungsgemäß werden die Abweichungen bei allen Auswertungen größer, welche die im Wind enthaltene Leistung beinhalten. Hier kommen die unterschiedlichen Auftrittshäufigkeiten der Windgeschwindigkeit zum Tragen. Für einzelne Richtungssektoren wie bspw. SSO, OSO sowie WNW sind deutliche Abweichungen in der Häufigkeit der einzelnen Windgeschwindigkeitsklassen auszumachen. Dies wirkt sich sowohl bei der mittleren Windleistungsdichte als auch bei den Energieerträgen der vorgegebenen WEA aus. Hinsichtlich der WEA-Produktion hat es offenbar, vornehmlich in Phase 1, unterschiedliche Interpretationen der Aufgabenstellung gegeben, die zu zwei Ergebnisgruppen geführt haben. In Phase 2 war dies, bis auf einen Teilnehmer, nicht mehr der Fall, hier wird der sich direkt aus den Messdaten ergebende Energieertrag bei Standardluftdichte von allen Teilnehmern mit einer Standardabweichung unterhalb von 4 % reproduziert. An diesem Bild ändert sich auch nichts, wenn die gemessene Luftdichte als zusätzlicher Parameter hinzukommt.



Produktion bei Standardluftdichte, Phase 2 [MWh/a]						
	Aufgabe A, 78 m	Aufgabe A, 108 m	Aufgabe C 138 m	Aufgabe D, 78m	Aufgabe D, 108m	
Mittelwert	7888	9321	10545	8457	9988	
Median	7841	9318	10469	8428	9976	
Standardabweichung	387	350	316	426	376	
Minimum	7100	8540	9798	7541	9030	
Maximum	9052	10129	11366	9460	10727	

Tabelle 1: Produktion bei Standardluftdichte, Phase 2

Produktion bei gemessener Luftdichte, Phase 2 [MWh/a]						
	Aufgabe A, 78	Aufgabe A,	Aufgabe C	Aufgabe D,		
	m	108 m	138 m	78m	Aufgabe D, 108m	
Mittelwert	7366	8743	9917	7915	9383	
Median	7313	8711	9858	7875	9371	
Standardabweichung	367	339	299	429	380	
Minimum	6579	7912	9223	7019	8445	
Maximum	8432	9476	10640	8848	10066	

Tabelle 2: Produktion bei gemessener Luftdichte, Phase 2

Weniger einheitlich fällt das Ergebnis bei der Auswertung der Turbulenzintensität aus. Hier werden hinsichtlich Phase 1 zwei, bei Phase 2 möglicherweise sogar drei Ergebnisgruppen sichtbar, die auf unterschiedliche Herangehensweisen bei der Auswertung hindeuten. Die Spannweite der Ergebnisse beträgt beispielsweise bei Phase 2 Aufgabe A in 108m Höhe 3,4%. Diesem Umstand sollte angesichts der Wichtigkeit dieses Parameters auf den Grund gegangen werden.



Mittlere Turbulenzintensität, Phase 1 [%]				
	Aufgabe A, 108 m			
Mittelwert	13,7	12,2		
Median	14,3	12,9		
Standardabweichung	1,4	1,1		
Minimum	10,0	10,2		
Maximum	15,1	13,4		

Tabelle 3: Mittlere Turbulenzintensität, Phase 1 [%]

Mittlere Turbulenzintensität, Phase 2 [%]						
	Aufgabe A, 78 m	Aufgabe A, 108 m				
Mittelwert	13,1	11,6				
Median	13,0	12,0				
Standardabweichung	1,5	1,1				
Minimum	11,0	9,6				
Maximum	16,0	13,0				

Tabelle 4: Mittlere Turbulenzintensität, Phase 2 [%]

4.2 Dateninterpretation

Erwartungsgemäß treten größere Ergebnisunterschiede auf, sobald es zur Weiterverarbeitung der Messdaten kommt. Dies war im vorliegenden Ringversuch bei der Extrapolation auf eine größere Messhöhe (Aufgabe C), sowie auf unterschiedliche Betriebszeiträume der Fall (Aufgaben B und D).

Bei der Höhenextrapolation (Aufgabe C) ergibt sich noch ein recht einheitliches Ergebnisbild. Bei Phase 1 haben bis auf zwei Ausreißer alle Teilnehmer die tatsächliche mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe 138 m mit geringen Abweichungen reproduziert, für Phase 2 gilt dies ohne die genannten beiden Ausreißer. Bemerkenswerterweise gelingt die recht einheitliche Reproduktion der Messhöhe 138m mit einer spürbar größeren Streubreite des Windgradienten, wie sie von den Teilnehmern angegeben werden - hier sollten ggf. die verfahrenstechnischen Grundlagen weitergehend betrachtet werden Es fällt eine leichte Tendenz zur Überschätzung der tatsächlichen mittleren Windgeschwindigkeit auf. Diese Tendenz ist bei der mittleren Windleistungsdichte nicht mehr zu beobachten.



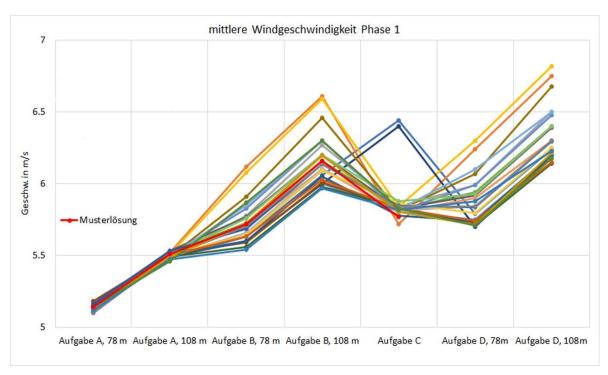


Abbildung 3: Mittlere Windgeschwindigkeit Phase 1

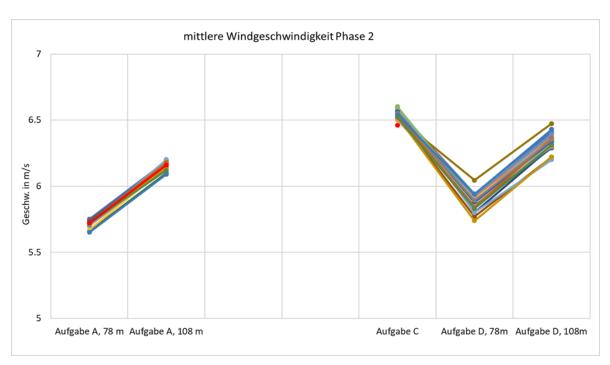


Abbildung 4: Mittlere Windgeschwindigkeit Phase 2



	Aufgabe A,	Aufgabe A,	Aufgabe B,	Aufgabe B,	Aufgabe C	Aufgabe D,	Aufgabe D,
	78 m	108 m	78 m	108 m	138 m	78m	108m
Mittelwert	5,13	5,50	5,73	6,18	5,87	5,88	6,35
Median	5,13	5,50	5,70	6,14	5,83	5,84	6,30
Standardabweichung	0,02	0,02	0,15	0,18	0,17	0,16	0,19
Minimum	5,10	5,46	5,54	5,97	5,72	5,70	6,14
Maximum	5,18	5,53	6,12	6,61	6,44	6,30	6,82

Tabelle 5: Mittlere Windgeschwindigkeit, Phase 1 [m/s]

	Aufgabe A,	Aufgabe A,	Aufgabe C,	Aufgabe D,	Aufgabe D,
	78 m	108 m	138 m	78m	108m
Mittelwert	5,71	6,16	6,55	5,88	6,34
Median	5,72	6,16	6,55	5,88	6,34
Standardabweichung	0,02	0,03	0,03	0,06	0,06
Minimum	5,65	6,09	6,50	5,74	6,20
Maximum	5,75	6,20	6,60	6,05	6,47

Tabelle 6: Mittlere Windgeschwindigkeit, Phase 2 [m/s]

Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 1 [W/m²]								
	Aufgabe A,	Aufgabe A, Aufgabe A, Aufgabe B, Aufgabe B, Aufgabe C Aufgabe D, Aufgabe						
	78 m	108 m	78 m	108 m	138 m	78m	108m	
Mittelwert	135,9	173,4	197,8	256,2	213,2	204,8	265,3	
Median	139,6	178,0	197,9	256,3	213,2	205,1	267,5	
Standardabweichung	12,9	16,6	33,4	45,6	28,6	32,0	43,7	
Minimum	82,2	101,3	105,3	131,0	122,0	114,0	141,8	
Maximum	156,0	195,0	250,0	327,8	298,5	261,5	342,8	

Tabelle 7: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 1 [W/m²]

Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 2 [W/m²]							
	Aufgabe A, 78 m	Aufgabe A, 108 m	Aufgabe C 138 m	Aufgabe D, 78m	Aufgabe D, 108m		
Mittelwert	202,9	259,8	316,9	208,0	269,1		
Median	213,3	273,5	331,0	217,5	279,5		
Standardabweichung	28,4	37,6	46,7	29,4	40,5		
Minimum	110,8	138,9	169,8	121,4	153,9		
Maximum	232,0	291,0	362,0	249,0	344,0		

Tabelle 8: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte, Phase 2 [W/m²]



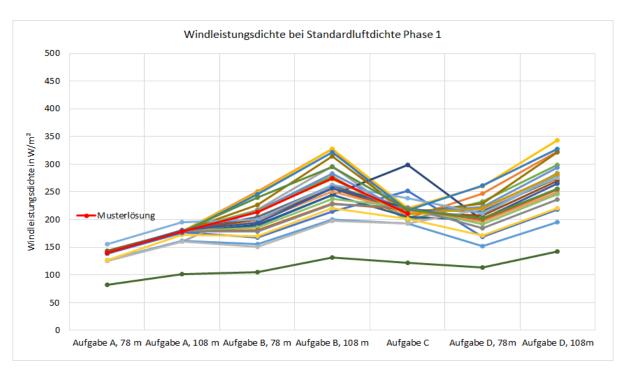


Abbildung 5: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte Phase 1

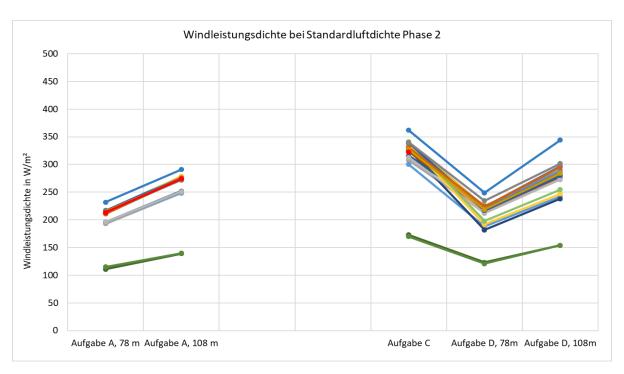


Abbildung 6: Windleistungsdichte bei Standardluftdichte Phase 2

Erheblich größere Streuungen ergeben sich erwartungsgemäß bei der Extrapolation der Messdaten auf andere Zeiträume, insbesondere bei Aufgabe B, bei welcher der bereits gefilterte Datensatz der halbjährigen Messphase 1 (Spätwinter 2016 bis zum Sommerende des Jahres) auf den zweijährigen Messzeitraum der



Phase 2 zu extrapolieren war. Weitere Datenfilterungen waren nicht mehr vorzunehmen, daher sind die Ergebnisabweichungen ausschließlich auf die unterschiedlichen Extrapolationsmethoden zurückzuführen.

Die mittlere Windgeschwindigkeit wird von den Teilnehmern im Mittel gut getroffen und entspricht dem tatsächlich gemessenen Wert. Dies ist hinsichtlich der mittleren Windleistungsdichte nicht mehr der Fall, die im Mittel deutlich unterschätzt wird. Bekanntermaßen tendieren viele Methoden zur Langzeitextrapolation zur Unterschätzung der Leistung bei gleichzeitig guter Wiedergabe der Windgeschwindigkeit. Es gibt aber auch hinsichtlich der Windleistungsdichte durchaus Ergebnisse, die dem tatsächlichen Wert nahekommen.

• Abhängigkeit der Langzeitextrapolation von der verwendeten Datenquelle

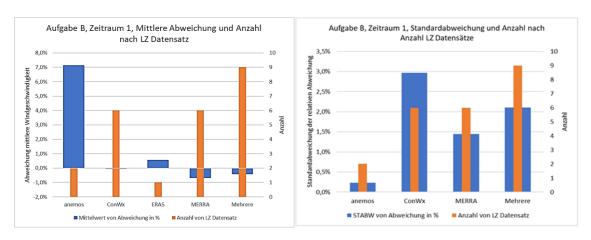


Abbildung 7: Mittlere Abweichung und Standardabweichung Windgeschwindigkeit nach Langzeitdatensatz

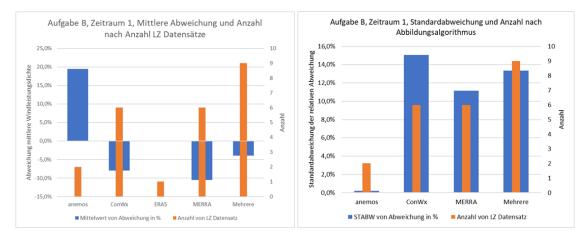


Abbildung 8: Mittlere Abweichung Windleistungsdichte und Standardabweichung nach Langzeitdatensatz

Um systematische Unterschiede in dieser Hinsicht zu prüfen, wurde die Verwendung bestimmter Abbildungsalgorithmen und/oder Langzeitdatenquellen untersucht. Hierbei ergibt sich, dass der anemos-Windatlas "anemos D-3km.M2" im vorliegenden Fall zu einer deutlichen Überschätzung führte. Weiterhin erzielten die Teilnehmer, die ausschließlich MERRA-Daten verwendet haben, Ergebnisse mit deutlich geringerer Streuung, als dies mit ConWx-Daten der Fall war, wobei in beiden Fällen das Ergebnis im Mittel gut getroffen wird.



Hinsichtlich der Abbildungsalgorithmen bestätigt sich die bekannte Tatsache, dass insbesondere Methoden, die auf linearen Regressionen basieren, oft zu einer Unterschätzung der Windleistungsdichte tendieren, während gleichzeitig die Windgeschwindigkeit gut wiedergegeben wird. Wie die hohe Standardabweichung zeigt, sind diese Ergebnisse aber keineswegs einheitlich. Es gelingt einigen Teilnehmern durchaus, auch mit einem auf linearer Regression basierenden Ansatz die tatsächliche mittlere Windleistungsdichte gut zu reproduzieren. Hinsichtlich aller übrigen verwendeten Methoden ist eine Aussage angesichts der jeweils geringen Anzahl an Teilnehmern nicht belastbar möglich.

Abhängigkeit der Langzeitextrapolation vom Abbildungsalgorithmus

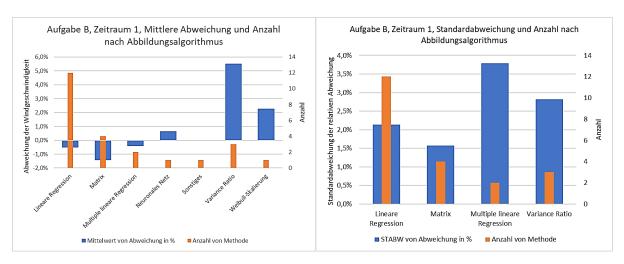


Abbildung 9: Mittlere Abweichung Windgeschwindigkeit und Standardabweichung nach Abbildungsalgorithmus

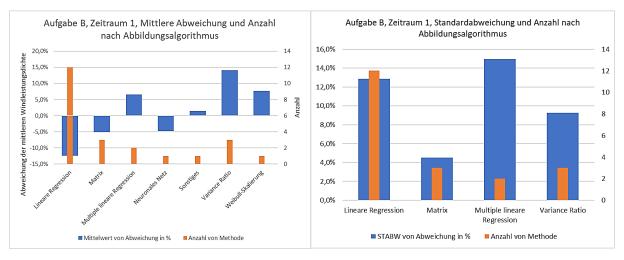


Abbildung 10: Mittlere Abweichung Windleistungsdichte und Standardabweichung nach Abbildungsalgorithmus

Das Ergebnisbild in Phase 1 ist hinsichtlich der Aufgabenstellung B, für die das tatsächliche Ergebnis vorliegt und Aufgabenstellung D, bei dem es um die Extrapolation auf einen realistischen Langzeit-Zeitraum ging, ausgesprochen vergleichbar. Insbesondere gilt dies für die nahezu identische Streubreite der Ergebnisse. Es kann daher durchaus davon ausgegangen werden, dass auch die übrigen Ergebnisse aus der Aufgabenstellung



B auf diejenigen der Aufgabenstellung D übertragbar sind, auch wenn dort der tatsächliche Wert nicht bekannt ist.

Die Ergebnisse zur Unsicherheitsanalyse zeigen zudem, dass ca. zwei Drittel der Teilnehmer beim ermittelten Energieertrag und dessen Unsicherheit für Phase 1 im Bereich des jeweils von ihnen in Phase 2 ermittelten Energieertrags liegen. Zusätzlich liegen wiederum zwei Drittel der Teilnehmer mit ihrem nach der Extrapolation auf den langen Messzeitraum ermittelten Energieertrag (Phase 1) unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Extrapolation im Bereich des in Phase 2 bestimmten mittleren Energieertrags aller Teilnehmer (vgl. Abbildung).

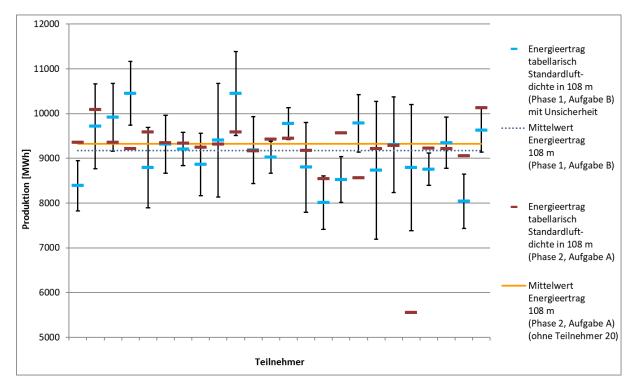


Abbildung 11: Vergleich des in Phase 1 auf den langen Zeitraum extrapolierten Energieertrags und dessen Unsicherheitsbereich mit dem in Phase 2 ermittelten Energieertrag

In diesem Zusammenhang fällt besonders auf, dass sich die Standardabweichung und somit die Streuung der Ergebnisse hinsichtlich der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen der Phase 1, bei der die Teilnehmer über einen, bezüglich der Jahreszeiten günstig liegenden Halbjahreszeitraum verfügten, und Phase 2, in der ein Zeitraum von zwei Jahren vorlag, um den Faktor 3 vermindert. Man darf sicherlich mit einiger Berechtigung davon ausgehen, dass das Teilnehmerfeld die fachliche Expertise repräsentativ wiedergibt. Somit ist dieses Ergebnis eine klare Bestätigung der in den einschlägigen Richtlinien erhobenen Forderung von hinreichend langen Messzeiträumen (mindestens ein Jahr), um zu einem ausreichend stabilen Langzeitbezug zu kommen.

Die Analyse der Windstärkerose zeigt, dass für die Aufgaben A und C das Teilnehmercluster bis auf einige Ausreißer noch recht dicht beieinander und durchaus auch nahe der jeweiligen Musterlösung liegt. Dagegen driften die richtungsabhängigen Ergebnisse bei Einsatz der Langzeitkorrekturen stark auseinander, wobei ihre Streuung bei der Phase 1 etwas größer erscheint. Eine Untersuchung, ob die ausgewiesenen Ergebnisse eine Abhängigkeit vom verwendeten Abbildungsprozess für die Langzeitkorrektur oder den Langzeitquellen



aufweisen, zeigt keine Zusammenhänge. Als Beispiel sind hier im Vergleich für Phase 2 die Windstärkerose der Aufgaben A und D für die Messhöhe 108 m aufgeführt.

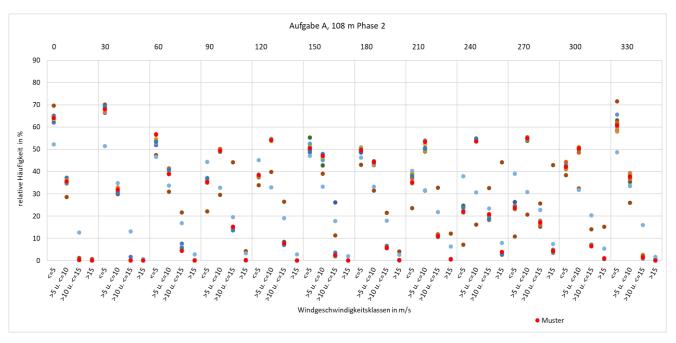


Abbildung 12: Windstärkerose Aufgabe A 108 m, Phase 2

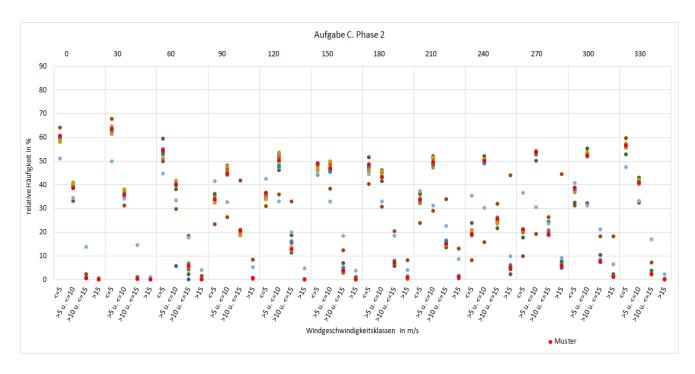


Abbildung 13: Windstärkerose Aufgabe C, Phase 2



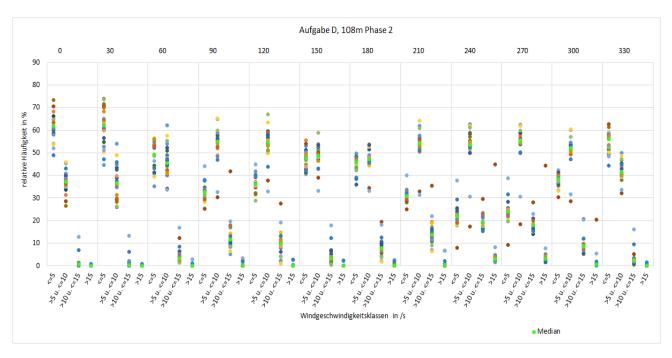


Abbildung 14: Windstärkerose Aufgabe D 108 m, Phase 2

Ein weiterer Untersuchungspunkt waren unterschiedliche Tageszeiten. In der folgenden Abbildung die mittlere Windgeschwindigkeit sowie die mittlere Windleistungsdichte über den 2-jährigen Zeitraum verglichen. Die Resultate für Phase 1 Aufgabe B und Phase 2 Ausgabe A werden jeweils für die einzelnen Teilzeiträume gegenübergestellt.



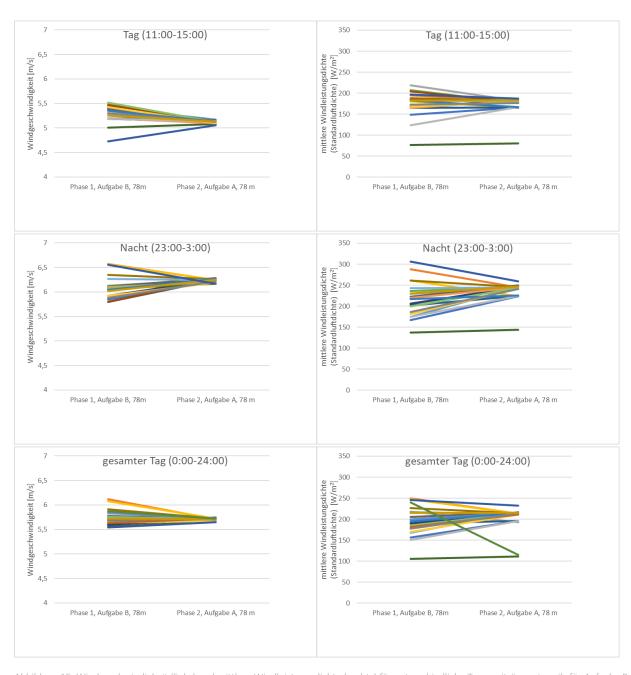


Abbildung 15: Windgeschwindigkeit (links) und mittlere Windleistungsdichte (rechts) für unterschiedliche Tageszeiträume jeweils für Aufgabe B der Phase 1 und Aufgabe A der Phase 2 für 78 m

Ein Großteil der Unterschiede zwischen Aufgabe B im Vergleich zu Aufgabe A mag insbesondere auf die unterschiedliche Einschätzung der Bewertung der nächtlichen Strömungssituation zurückzuführen sein, zumindest treten hier deutlich die größten Unterschiede bei der Windgeschwindigkeit und ihrer Häufigkeit sowie der Leistungsdichte auf. Dieser Aspekt sollte noch weitergehend untersucht werden. Hierbei ist berücksichtigen, dass eine einfache Zuordnung auf Basis der Langzeitdatensätze für eine Interpretation nicht ausreicht, sondern tiefergehend methodische Ansätze z.B. zur Höhenextrapolation, thermischen Stabilität der Atmosphäre oder auch Änderungen in der Richtungsverteilung zu berücksichtigen sind.



5. Danksagung

Die mit der Organisation des Ringversuchs Messdatenauswertung betraute Arbeitsgruppe dankt

- den im BWE-Windgutachterbeirat vertretenen Unternehmen für das erwiesene Vertrauen,
- der Abteilung Fachgremien und Energierecht des Bundesverband Windenergie e.V. für die organisatorische Unterstützung und
- den 26 Teilnehmern am Ringvergleich für ihre Bereitschaft zur kostenpflichtigen Teilnahme und den 24 Teilnehmern für den mit der Lösung der Aufgabenstellungen verbundenen Aufwand.

Die Organisatoren des Ringvergleichs, am 09.10.2019.