

Windentwicklung in Deutschland Teil 1

geschrieben von Admin | 24. Januar 2024

Von Dr. Konrad Voge

Vorbemerkung

Am 30. April 2023 ist hier ein Beitrag zur Entwicklung der Niederschlagsmengen in Deutschland veröffentlicht worden. In diesem Zusammenhang wurde von Herrn Limburg der Hinweis gegeben, doch auch die Windentwicklung zu betrachten.

Seit 1981 betreibe ich Windsurfen und hatte den Eindruck, dass der Wind im Laufe der Jahre abnahm. Man musste immer häufiger zu größeren Segeln greifen. Von dieser Seite her ist für mich auch die Beschäftigung mit diesem Thema von zusätzlichem Interesse.

Der folgende Beitrag beschäftigt sich aus statistischer Sicht mit der Windentwicklung in Deutschland. In diesem Zusammenhang ist auch wieder, wie bei dem Artikel zu den Niederschlagsmengen, der Ausbau von Windkraftanlagen (WKA) mitbetrachtet. Es wird untersucht, ob ein statistischer Zusammenhang zwischen Windentwicklung und installierter Leistung von WKA vorliegt. Es wird hier jedoch darauf hingewiesen, dass eine Korrelation keine Kausalität bedeuten muss.

Meßstationen

Für die Analyse der Windentwicklung in Deutschland wurden 1250 Meßstationen des Deutschen Wetterdienstes nach vorhandenen Zeitreihen bezüglich Meßwerten [1] zum Wind abgefragt.

Bundesland	Zeitreihen Gesamt	Vor 2000	Nach 2000	Vor und nach 2000	Vollständig Vor und nach 2000
Baden-Württemberg	25	19	6	15	7
Bayern	40	36	33	29	19
Brandenburg/Berlin	15	14	12	11	7
Bremen/Hamburg	7	5	6	5	2
Hessen	18	18	11	11	3
Mecklenburg-Vorpommern	15	13	13	11	8
Niedersachsen	27	25	20	19	9
Nordrhein-Westfalen	19	18	11	11	6
Rheinland-Pfalz	10	10	7	7	2
Saarland	2	2	2	2	2

Sachsen	13	11	12	10	7
Sachsen-Anhalt	7	6	7	6	4
Schleswig-Holstein	24	21	15	12	6
Thüringen	8	8	6	6	2
Summe	230	206	161	155	84

Tabelle 1 Anzahl der Meßstationen, die Zeitreihen zur Windentwicklung aufgenommen haben

Es handelt sich bei den zur Verfügung gestellten Werten um Tageswerte. Von den 1250 Meßstationen blieben 230 Stationen übrig, die überhaupt Zeitreihen zu Windstärken anbieten.

In der Tabelle 1 ist die Anzahl der Meßstationen für die Bundesländer zusammengefasst, die Zeitreihen zu den gemessenen Windwerten enthalten. In der Spalte „Zeitreihen Gesamt“ ist die Zahl der Meßstationen aufgeführt, die unabhängig von Beginn und Ende der Messung Windwerte aufgenommen haben. Da für die weitere Auswertung das Jahr 2000 eine Rolle spielt, ist in der Tabelle 1 unterschieden, ob es Zeitreihen gibt, die vor 2000 endeten, ob sie nach 2000 aufgenommen wurden oder ob sie Daten der Zeit vor und nach 2000 enthalten. Die letzte Spalte der Tabelle 1 enthält die Anzahl der Meßreihen, die keine bzw. weniger als fünf Fehlstellen der Monatswerte über dem gesamten Meßzeitraum aufweisen. Letztlich bleiben die Daten von 155 Meßstationen übrig, die zur Untersuchung der Windentwicklung geeignet sind. Der Endpunkt der Zeitreihen ist November 2022. Die längste Zeitreihe kommt von der Meßstation Hohenpeißenberg (Bayern). Seit Januar 1939 liegen Windmeßwerte von dieser Station vor. Die hier betrachteten Meßstationen liegen zwischen 47,3984° und 55,0110° nördlicher Breite bzw. 6,0839° und 14,9510° östlicher Länge.

Datenqualität

Wie oben bereits erwähnt, werden Tageswerte der Meßstationen bekanntgegeben. Diese werden hier zu Monatswerten und Jahreswerten verdichtet (arithmetisches Mittel). Für die weitere Auswertung werden nur die Jahreswerte verwendet. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, gibt es von den 230 Datensätzen nur 84, die kontinuierliche Messungen vor und nach 2000 aufweisen. Jedoch sind die unvollständigen Datensätze (Zeitreihen vor bzw. nach 2000) für die Feststellung von Tendenzen der Windgeschwindigkeit verwertbar. Kleinere Fehlstellen in den Datensätzen, wie das Fehlen einiger Monatswerte, sind durch Interpolation ausgeglichen worden.

Einige Zeitreihen enthalten Sprungstellen bei den ausgewiesenen Windstärken. Diese können auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sein. Ein Beispiel dazu zeigt Bild 1. Der Sprung zwischen den Jahren 2007 bis 2010 ist möglicherweise auf Meßfehler zurückzuführen.

Meßstation	Bundesland	Sprungfaktor
Oberstdorf	Bayern	2,65
Lautertal-Oberlauter	Bayern	2,36
Regensburg	Bayern	2,02
Dörrmoschel-Felsbergerhof	Rheinland-Pfalz	2,00
Friedrichshafen	Baden-Württemberg	1,97
Müncheberg	Brandenburg	1,93
Göttingen	Niedersachsen	1,90
Hohenpeißenberg	Bayern	1,87
Chemnitz	Sachsen	1,79
Brocken	Sachsen-Anhalt	1,78
Dörrmoschel-Felsbergerhof	Rheinland-Pfalz	1,75
Faßberg	Niedersachsen	1,66

Tabelle 2 Meßreihen mit den größten Sprungstellen

Die Meßreihen mit den größten Sprungstellen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Für die Regressionsfunktionen der Meßreihen wurden jedoch auch diese Werte mit verwendet, da es nicht klar ist, ob es sich um Meßfehler (Ausreißer) oder tatsächlich gemessene Werte handelt.

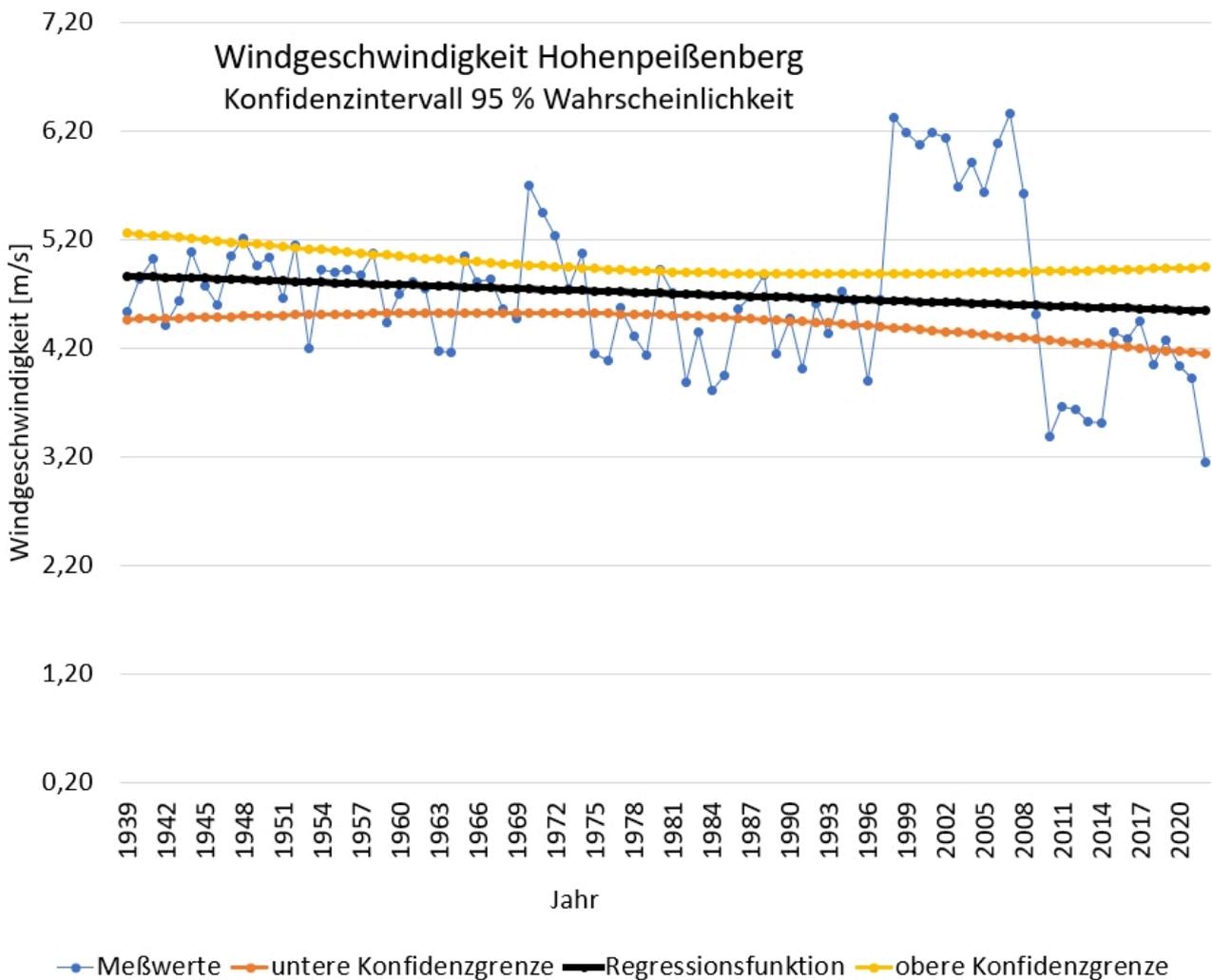


Bild 1 Zeitreihe der Windgeschwindigkeit an der Meßstation Hohenpeißenberg mit Regressionsfunktion

Verläufe Windgeschwindigkeit

Für die Meßreihe jeder Station wurde eine Regressionsanalyse mit der Ansatzfunktion

$$f(v) = a_0 + a_1 v [1]$$

durchgeführt, wobei v die Windgeschwindigkeit bedeutet. Dabei wurde die jeweilige Meßreihe in je einen Zeitbereich vor 2000 und nach 2000 geteilt. Bild 2 zeigt als Beispiel die Zeitreihe an der Station Angermünde (Brandenburg) mit der Aufteilung in die beiden Bereiche. Von weiterem Interesse ist der Anstiegskoeffizient a_1 der Regressionsfunktionen. Positive Koeffizienten bedeuten eine Zunahme der Windgeschwindigkeit, Negative Koeffizienten weisen auf eine Abnahme der Windgeschwindigkeit hin.

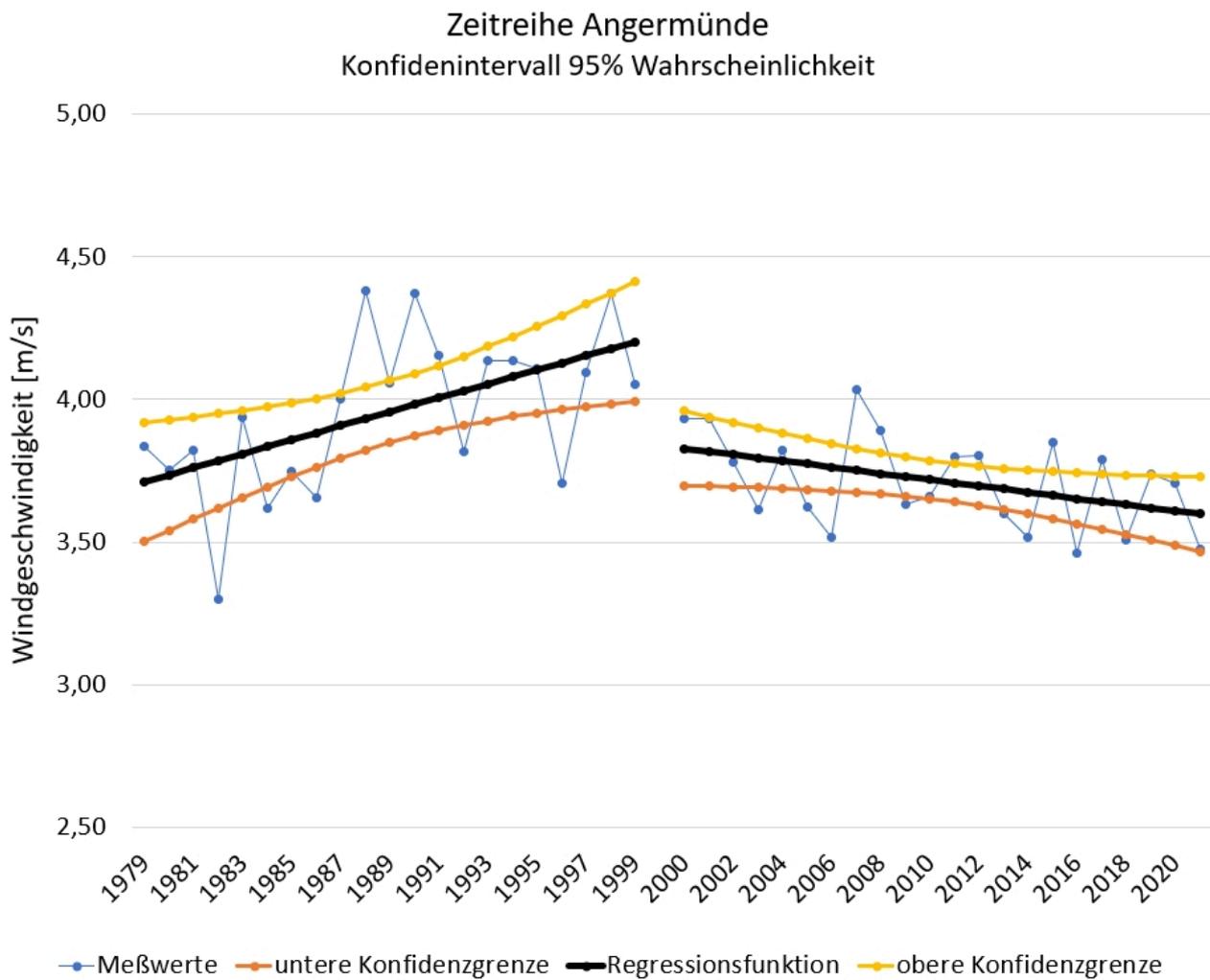


Bild 2 Zeitreihe der Meßstation Angermünde mit Regressionsfunktionen für die Werte vor und nach 2000

Zeit	Abnahme Windgeschwindigkeit ($a_1 < 0$)	Zunahme Windgeschwindigkeit ($a_1 > 0$)
vor 2000	122	84
nach 2000	121	58

Tabelle 3 Anzahl der Zeitreihen mit Abnahme (Anstieg a_1 negativ) und Zunahme (Anstieg a_1 positiv) der Windgeschwindigkeit

In Tabelle 3 ist die Anzahl der Zeitreihen zusammengestellt, die eine Abnahme oder Zunahme der Windgeschwindigkeit aufweisen.

In der Anzahl der Meßreihen, die eine Abnahme der Windgeschwindigkeit aufweisen, gibt es keinen Unterschied zwischen der Zeit vor 2000 und nach 2000. Dieser liegt dann bei den Meßreihen nach 2000 vor. Während an 84 Meßstationen vor 2000 noch eine Zunahme der Windgeschwindigkeit vorliegt, betrifft dies nach 2000 nur noch 58 Meßstationen. . Es ist also an 31 % der Stationen eine Abnahme der Windgeschwindigkeit zwischen 2000 und 2022 gemessen worden.

Windparks

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit Windkraftanlagen die Windgeschwindigkeit beeinflussen, werden alle Windparks [2], [3], [4], [5] zwischen den Koordinaten 14,9967° und 54,9819° nördlicher Breite sowie 0,1489° und 14,9967° östlicher Länge betrachtet. Das heißt in der Nord- Süd-Richtung von Flensburg bis Oberstdorf und in West-Ost Richtung von der Nordsee bis zur Oder. In diesem Rechteck befinden sich 4529 Windparks mit einer installierten Leistung von 108,69 GW, verteilt auf 37361 Anlagen. Davon sind 832 Einzel- und 599 Doppelanlagen. In Tabelle 4 sind die Daten der Windparks nach Gebieten zusammengefasst. Wegen der geographischen Lage sind auch einzelne Windparks aus den Niederlanden, Belgien und England (Nordsee) in die Betrachtung einbezogen.

Gebiet	Anzahl Windparks	Installierte Leistung [MW]	Anzahl Anlagen	Max. installierte Leistung eines Windparks [MW]
Baden-Württemberg	189	1862	807	55
Bayern	339	2679	1174	53
Brandenburg	279	8633	3987	254
Saarland	50	541	217	25
Hessen	215	2632	1198	64
Mecklenburg-Vorpommern	206	3822	1883	203
Niedersachsen	936	13201	6365	291
Nordrhein-Westfalen	770	7628	3756	160

Rheinland-Pfalz	292	4051	1801	91
Sachsen	168	1375	888	59
Sachsen-Anhalt	226	5634	2826	256
Schleswig-Holstein	394	8650	3298	317
Thüringen	99	1822	872	159
Belgien	74	942	469	32
Niederlande	203	4679	1677	429
Ostsee Deutschland	7	2752	413	927
Nordsee Deutschland/England	66	32793	4795	2604
Offshore Belgien	8	2262	399	487
Offshore Niederlande	8	2730	536	752
Summe	4529	108690	37361	

Tabelle 4 Daten der zur Auswertung zur Verfügung stehenden Windparks

Der Windpark Hornsea I – III vor der englischen Küste ist mit 5208 MW installierter Leistung und 648 Anlagen der größte Windpark in dieser Betrachtung. Die Bundesländer Niedersachsen, Brandenburg und Schleswig-Holstein weisen die höchsten installierten Leistungen unter den Bundesländern auf, wie Bild 3 verdeutlicht.

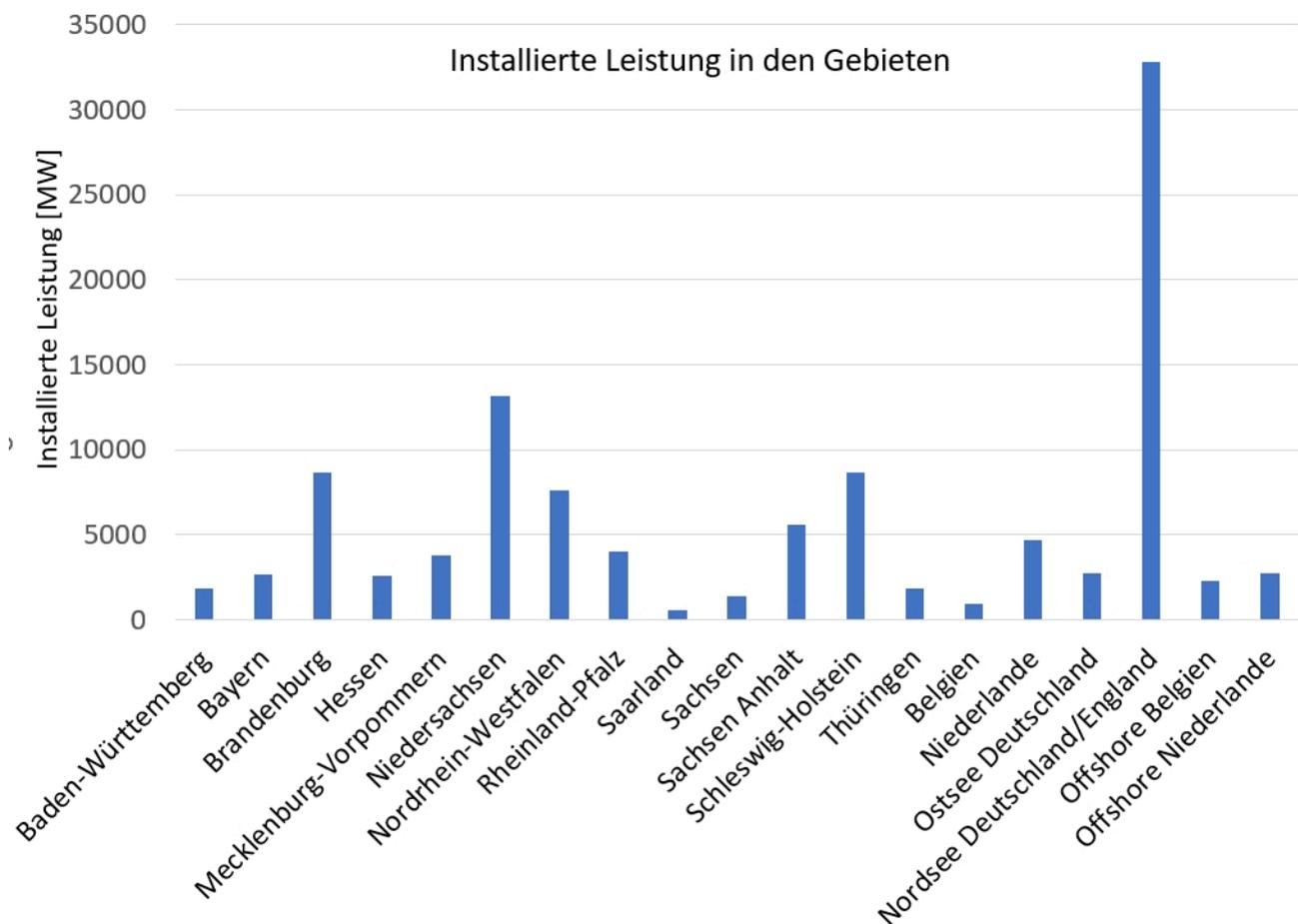


Bild 3 Installierte Leistung der WKA in den Bundesländern, zusätzlich teilweise in Belgien, Niederlande und Offshore England

Einteilung in Quadranten

Zur Beantwortung der Frage, ob ein Zusammenhang zwischen der installierten Leistung von Windparks und der Beeinflussung der Windgeschwindigkeit statistisch nachgewiesen werden kann, werden zwei Modelle untersucht. Einmal ist das Untersuchungsgebiet (Deutschland, Niederlande, Belgien und Offshore England) in Hälften und Quadranten gemäß Tabelle 5 aufgeteilt. In einem zweiten Modell ist das untersuchte Gebiet in Ost-West-Streifen gegliedert. Die Zeitreihen aller 230 Meßstationen sind gemäß Bild 2 in die Abschnitte vor und nach 2000 unterteilt und die Regressionsfunktionen berechnet. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 5 enthalten und in Bild 4 grafisch dargestellt. In Tabelle 6 sind die installierten Leistungen und die Verhältnisse von Windzunahme zu Windabnahme zusammengestellt. Es ist deutlich zu sehen, daß eine Tendenz von Nord nach Süd und von Ost nach West vorliegt. Im Norden und Osten gibt es in der Windentwicklung vor und nach 2000 einen deutlichen Unterschied zu den übrigen Gebieten.

Gebiet	Wind Abnahme vor 2000	Wind Zunahme vor 2000	Wind Abnahme nach 2000	Wind Zunahme nach 2000
Nord	62	43	68	25
Süd	59	41	54	33
Ost	47	31	59	17
West	74	53	63	41
Nord-Ost	20	20	18	6
Nord-West	40	21	31	19
Süd-Ost	27	12	25	11
Süd-West	35	31	31	22

Tabelle 5 Windverhalten an den Meßstationen des jeweiligen Gebietes – Ergebnis der Regressionsrechnungen – Anzahl der Zeitreihen im jeweiligen Gebiet

Am deutlichsten ist das Verhältnis im Quadranten Nord-Ost sichtbar. Während vor 2000 die gleiche Anzahl von Zeitreihen mit Windzunahme und Windabnahme zu verzeichnen ist, wurde nach 2000 nur an 6 Stationen eine Zunahme des Windes gemessen, während an 18 Stationen eine Abnahme festzustellen ist. In diesen Quadranten fällt auch die Meßstation Angermünde (Bild 2), in deren Nähe ich die in der Vorbemerkung gemachte intuitive Windabnahme festgestellt habe.

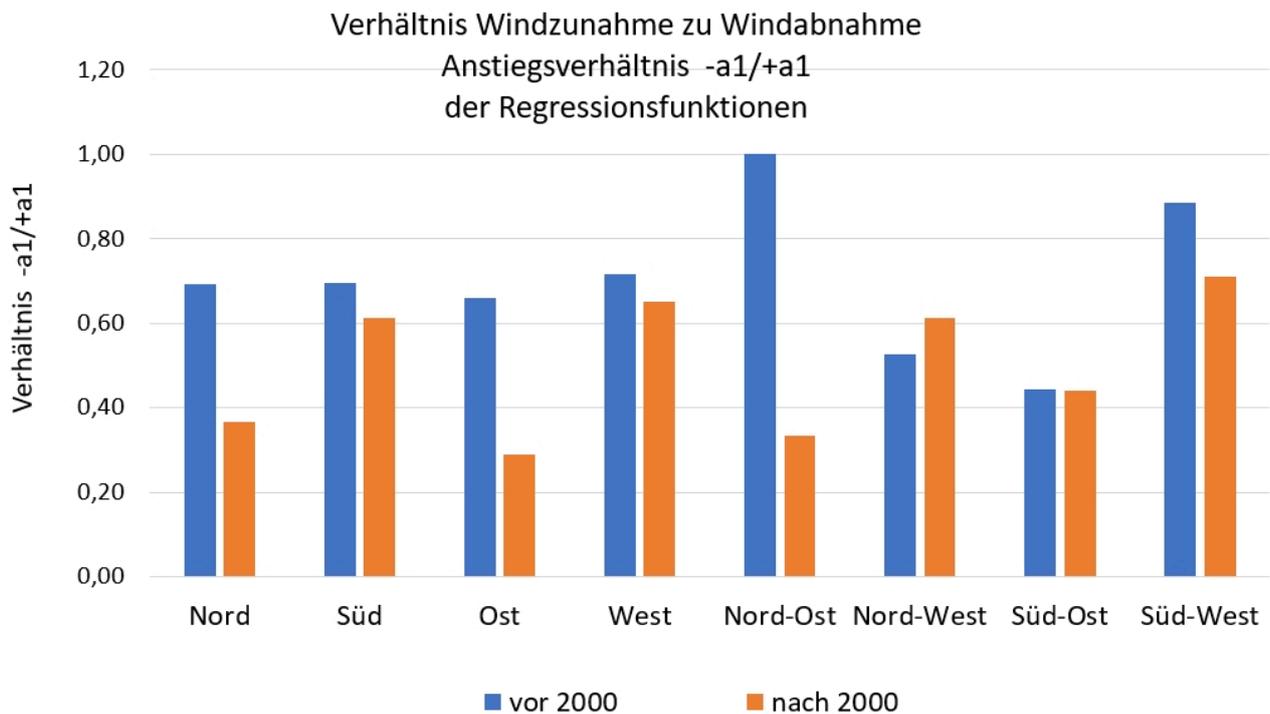


Bild 4 Verhältnis der Windzunahme zur Windabnahme nach Gebieten

Gebiet	1	2	3	4
Nord	88915	29404	0,69	0,37
Süd	19775	7955	0,69	0,61
Ost	57512	25474	0,66	0,29
West	51178	11885	0,72	0,65
Nord-Ost	46065	20252	1,00	0,33
Nord-West	42850	9152	0,53	0,61
Süd-Ost	11447	5222	0,44	0,44
Süd-West	8328	2733	0,89	0,71

Spalte 1 Installierte Leistung [MW]

Spalte 2 Anzahl der installierten Anlagen

Spalte 3 Verhältnis Windzunahme / Windabnahme vor 2000

Spalte 4 Verhältnis Windzunahme / Windabnahme nach 2000

Tabelle 6 Verhältnis Windzunahme/Windabnahme (Verhältnis der Regressionskoeffizienten $+a_1/-a_1$)

In Tabelle 6 ist die installierte Leistung der Gebiete mit der Windentwicklung kombiniert. Besonders in den Gebieten Nord, Ost und Nord-Ost ist eine starke Abnahme der Windgeschwindigkeit nach 2000 festzustellen. Dort sind gemäß Tabelle 6 auch die größten installierten Leistungen von WKA errichtet.

Verhältnis Windzunahme / Windabnahme über der installierten Leistung der WKA

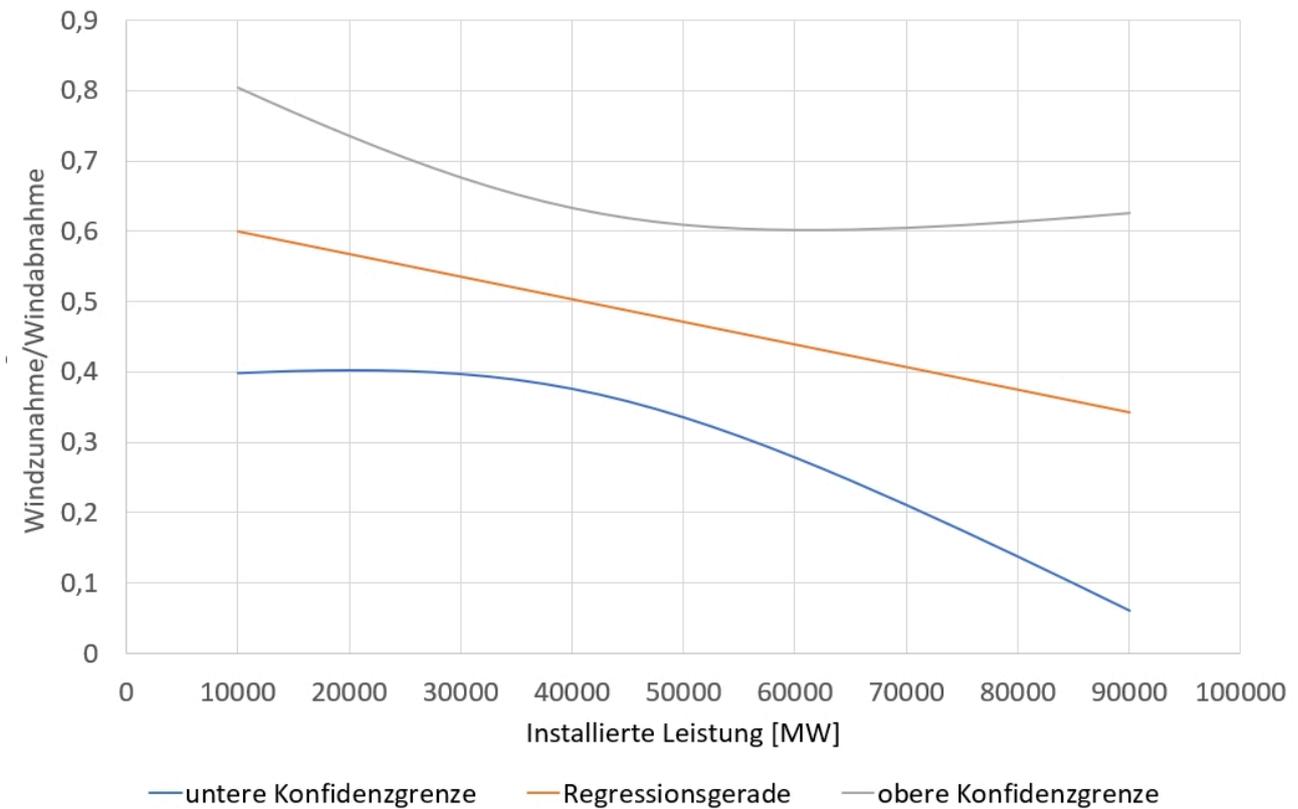


Bild 5 Verhältnis Windzunahme/Windabnahme über der installierten Leistung – Konfidenzintervall für 95% Wahrscheinlichkeit

Den Zusammenhang des Verhältnisses Windzunahme zu Windabnahme zur installierten Leistung zeigt Bild 5. Unter der Voraussetzung, es handle sich bei den Größen des Bildes 5 um unabhängige Zufallsvariable, kann ein Korrelationsfaktor berechnet werden. Diese Voraussetzung ist für die Variable „installierte Leistung“ als gegeben anzusehen, da die Installation der WKA prinzipiell als zufällig angesehen werden kann. Der berechnete Korrelationskoeffizient $r = 0,53$ schließt einen Zusammenhang zwischen der installierten

Zusammenfassung Teil 1

Im vorstehenden Artikel wird der Frage nachgegangen, ob eine Beeinflussung der Windstärke durch die Installation von Windturbinen statistisch nachweisbar ist. Es wurden dazu alle Wettermeßstationen des Deutschen Wetterdienstes auf vorhandene Meßreihen zur Windstärke betrachtet. Letztlich wurden 230 Wetterstationen gefunden, die die Windgeschwindigkeit über mehrere Jahre aufgezeichnet haben. Von Interesse waren besonders die Zeitreihen, die Werte vor und nach 2000 enthielten. Das Jahr 2000 wurde gewählt, da zu dieser Zeit die verstärkte Errichtung von WKA zur Stromerzeugung begann.

Der Teil 1 des Artikels enthält die Ergebnisse der Entwicklung der

Windgeschwindigkeit, wenn Deutschland in größere Gebiete, hier in Hälften und Viertel, aufgeteilt wird und der Einfluss von Windparks (installierte Leistung) in diesen Gebieten statistisch untersucht wird. Es zeigt sich in den nord-östlichen Gebieten eine deutliche Abnahme der Windgeschwindigkeit ab dem Jahr 2000.

Im zweiten Teil des Artikels wird Deutschland in Streifen aufgeteilt und in den Streifen der Zusammenhang von Windentwicklung und installierter Leistung von Windparks untersucht.

Quellen

[1] Deutscher Wetterdienst

https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/

[2] Liste der Windkraftanlagen in Deutschland

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Windkraftanlagen_in_Deutschland

[3] Liste der Offshore Windparks

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Offshore-Windparks

[4] Liste der Windkraftanlagen in Belgien

<https://resdm.com/wind-farms-in-bel>

[5] Liste der Windkraftanlagen der Niederlande

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Windkraftanlagen_in_den_Niederlanden

Über den Autor

Lehre und Arbeit als Stahlbauschlosser. Abitur in der Abendschule; Studium der Fördertechnik an der TU Dresden; Assistent am Lehrstuhl Fördertechnik der TU; Promotion auf dem Gebiet der Schüttgutmechanik – Fließverhalten kohäsiver Schüttgüter in Bunkern; dann angestellt bei Fördertechnik Freital und Zusammenarbeit mit der TU Dresden auf dem Gebiet der pneumatischen Dichtstromförderung; Prüfstelle für Lastaufnahmemittel und Hebezeuge Berlin – da Statik und Stahlbau; Sachverständiger für Aufzüge beim TÜV Berlin-Brandenburg, später dann TÜV Rheinland.

Mit der Statistik kam er während der Bearbeitung der Dissertation in Berührung. Er hatte einen Haufen Versuche gemacht und hatte keine Ahnung wie man vernünftige Planung und Auswertung macht. Da ergab es sich, daß ich von der Existenz einer „Arbeitsgemeinschaft Mathematische Statistik“, zugehörig zur Mathematischen Gesellschaft der DDR, erfuhr und dort dann bis zur Auflösung nach der Wende Mitglied war. Die Leitung

hatte Prof. Rasch aus Rostock.