

Der Windatlas Baden-Württemberg 2019 und der bayerische Windatlas 2021 im direkten Vergleich entlang der Landesgrenze

Dipl.-Ing. (FH) Jörg Saur, Dipl.-Ing. Willy Fritz und Prof. Dr. Michael Thorwart

(Stand 6. Dezember 2023)

In dieser Studie vergleichen wir die Datenprognosen zur mittleren Windgeschwindigkeit und zur mittleren gekappten Windleistungsdichte aus den beiden Windatlassen des Landes Baden-Württemberg 2019 und des Freistaates Bayern 2021 entlang der baden-württembergisch-bayerischen Landesgrenze. Für einen Standort vergleichen wir zwei geographische Punkte jeweils auf beiden Seiten der Landesgrenze, die nur wenige Meter voneinander entfernt und auf vergleichbarer Meereshöhe liegen. Beide Windatlas nutzen denselben Bezugswert von 160 m Nabenhöhe und die identische Kappgeschwindigkeit von 15 m/s. Wir finden drastische Unterschiede in der mittleren Windgeschwindigkeit und der mittleren gekappten Windleistungsdichte. Teilweise unterscheiden sich die Kenngrößen um fast den Faktor 2 an einem Standort. Messdaten zur mittleren Windgeschwindigkeit des Deutschen Wetterdiensts beim Passieren der Landesgrenze weisen keine Unstetigkeiten der Kennzahlen auf. Dies deutet auf eine inhärente Inkonsistenz der Ergebnisse der Windatlas hin. Die Verwendung eines Windatlases als Planungsgrundlage für Baden-Württemberg erscheint im Licht unserer Ergebnisse mehr als fragwürdig.

Einleitung

Im Jahr 2019 stellte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg einen neuen Windatlas vor, der den Vorgänger aus dem Jahr 2012 ersetzt. Er wurde maßgeblich erstellt durch die Firma AL-PRO GmbH & Co. KG aus dem niedersächsischen Großheide. Es wurden flächendeckende elektronische Kartendaten zur mittleren Windgeschwindigkeit und zur mittleren gekappten Windleistungsdichte zur Verfügung gestellt, die punktgenau abgerufen werden können. Erstmals wurde die mittlere gekappte Windleistungsdichte als Kenngröße für die Güte eines Standorts benutzt. Eine dafür notwendige Kappgeschwindigkeit wurde auf den Wert von 15 m/s festgesetzt. Der Windatlas Baden-Württemberg dient als Planungsgrundlage für Behörden und Entscheider. Wenngleich auch ein Projektierer immer noch eine separate Windmessung an einem geplanten Standort durchzuführen hat, orientieren sich im Jahr 2023 und 2024 die Suchläufe der mit der Windenergieplanung beauftragten Regionalverbände an den Prognosekarten des Windatlases. So gilt nach einer Empfehlung des Umweltministeriums Baden-Württemberg derzeit eine mittlere gekappte Windleistungsdichte von 215 w/m^2 als Mindestschwelle für die Eignung als Windenergiestandort.

Im Jahr 2021 wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie des Freistaates der bayerische Windatlas vorgestellt. Erstellt wurde dieser durch die anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH. Der Windatlas verwendet dieselben Kennzahlen wie sein baden-württembergisches Pendant (weitere methodische Details sind im Anhang wiedergegeben).

In der vorliegenden Studie untersuchen wir nun die Prognosedaten der beiden Windatlasse entlang der baden-württembergisch-bayerischen Landesgrenze. Aus physikalischer Sicht ist zu erwarten, dass in einem geographisch zusammenhängenden Gebiet, durch das eine politische Landesgrenze verläuft, die Kennzahlen aus beiden Windatlassen sich nicht signifikant unterscheiden sollten. Salopp formuliert: Der Wind kann nicht an einer Landesgrenze schlagartig beschleunigt oder abgebremst werden, wenn sich die Landschaftsbedingungen nicht ändern.

Um diese Hypothese zu untersuchen, haben wir nun in der vorliegenden Studie Standorte entlang der baden-württembergisch-bayerischen Landesgrenze ausgehend von Süden nach Norden ausgewählt. An jedem Standort haben wir zwei Punkte dies- und jenseits der Landesgrenze im Abstand von wenigen Metern und auf vergleichbarer Meereshöhe ausgewählt und für beide Punkte die Kenngrößen jeweils aus dem baden-württembergischen und dem bayerischen Windatlas ausgelesen. Aus physikalischer Sicht sollten die jeweiligen Kennzahlen sich bis auf statistische Abweichungen nicht unterscheiden. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass wir drastische Unterschiede für die Standorte verzeichnen. Im Folgenden präsentieren wir die Einzelheiten zur Vorgehensweise, der Ergebnisse und das Fazit. Weitere Einzelheiten sind im Anhang aufgeführt.

Vorgehensweise

Entlang der Landesgrenze von Kressbronn am Bodensee bis Sontheim an der Brenz (südliche Hälfte) und von Giengen a.d. Brenz bis Mudau (nördliche Hälfte) wurden in beiden interaktiven Windatlassen jeweils 10 Standorte im Abstand von einigen Kilometern ausgewählt (südliche Hälfte 9 – 23 km, nördliche Hälfte 8 – 34 km). An jedem Standort wurden zwei benachbarte geographische Punkte gesucht, die diesem einem Ort zugeordnet sind. Die beiden Punkte eines Standorts liegen jeweils dies- und jenseits der Landesgrenze und in einer Entfernung von einigen Dutzend bis wenigen hundert Metern. Zur leichteren Orientierung bezeichnen wir die Standorte mit den jeweiligen Namen von in der Nähe liegenden Orten. Relevant für den konkreten Vergleich sind allein die angegebenen geographischen Koordinaten im UTM32-Gitter oder in Dezimalgrad. Sowohl für die baden-württembergische wie für die bayerische Seite wurden die geographischen Koordinaten der Windatlas im UTM32-Gitter festgehalten, sowie die jeweilige Höhe über NN bestimmt. Der direkte Abstand der beiden Punkte wurde ermittelt.

In Tabellen 1 und 2 sind von Süd nach Nord (um der besseren Lesbarkeit willen in zwei Teile aufgeteilt) die untersuchten Orte aufgelistet, zusammen mit den geographischen Koordinaten in UTM32 sowie in Dezimalgrad, die Höhe in Meter über NN und dem

Abstand der beiden Punkte in Metern zwischen der württembergischen und der bayerischen Seite. Besonderes Augenmerk bei der Analyse der nachfolgenden Tabellen sei gelegt auf die nahezu gleiche Höhe ü. NN sowie **insbesondere auf den räumlichen Abstand** der Standorte. Diese Objektinformationen wurden für jeden Standort als Bilddatei der Angaben der Windatlanten gesichert.

Baden-Württemberg			Bayern		Entfernung
Ort	Geograph. Daten	Höhe ü. NN [m]	Geograph. Daten	Höhe ü. NN [m]	[m]
Kressbronn Bodensee	<u>UTM:</u> 548616,16 / 5272390,70 <u>Dez.-Grad:</u> 47,603100859674 / 9,6467863144544	488	<u>UTM:</u> 547958 / 5272340 <u>Dez.-Grad:</u> 47,6026937325045 / 9,63802521240533	491	628
Wangen im Allgäu	<u>UTM:</u> 560192,19 / 5277021,47 <u>Dez.-Grad:</u> 47,643791778867 / 9,8014156100157	554	<u>UTM:</u> 559817 / 5277375 <u>Dez.-Grad:</u> 47,6470072280646 / 9,79646907701733	542	503
Isny i. Allgäu	<u>UTM:</u> 580911,91 / 5276784,77 <u>Dez.-Grad:</u> 47,639403923949 / 10,077196104328	1052	<u>UTM:</u> 580533 / 5276660 <u>Dez.-Grad:</u> 47,6383287201081 / 10,0721295486356	1012	382
Leutkirch	<u>UTM:</u> 580000,06 / 5293049,19 <u>Dez.-Grad:</u> 47,785833258834 / 10,06804446274	727	<u>UTM:</u> 580317 / 5293094 <u>Dez.-Grad:</u> 47,7861969208321 / 10,0722833122206	719	306
Aitrach (A96)	<u>UTM:</u> 582144,11 / 5310423,83 <u>Dez.-Grad:</u> 47,941861229281 / 10,099965382859	590	<u>UTM:</u> 582230 / 5310554 <u>Dez.-Grad:</u> 47,9430211682509 / 10,1011401590126	592	154
Berkheim (A7)	<u>UTM:</u> 584004,73 / 5320675,73 <u>Dez.-Grad:</u> 48,033840556885 / 10,126881380003	566	<u>UTM:</u> 584225 / 5320597 <u>Dez.-Grad:</u> 48,0331033328627 / 10,1298201136701	561	226
Kirchberg a.d.Iller	<u>UTM:</u> 582526,09 / 5331691,60 <u>Dez.-Grad:</u> 48,133125217717 / 10,109178600006	539	<u>UTM:</u> 582595 / 5331550 <u>Dez.-Grad:</u> 48,1318425438209 / 10,1100771367334	537	157
Illerrieden	<u>UTM:</u> 578780,20 / 5348511,13 <u>Dez.-Grad:</u> 48,284897000456 / 10,061965507530	500	<u>UTM:</u> 578576 / 5348738 <u>Dez.-Grad:</u> 48,2869631243979 / 10,0592555614228	502	301
Elchingen A8 (Ulm)	<u>UTM:</u> 576386,71 / 5367437,14 <u>Dez.-Grad:</u> 48,455432597886 / 10,033144866738	565	<u>UTM:</u> 576401 / 5367446 <u>Dez.-Grad:</u> 48,4555105585695 / 10,0333397264461	564	16

Sontheim a. d. Brenz	<u>UTM:</u> 596892,96 / 5378546,92 <u>Dez.-Grad:</u> 48,552530767814 / 10,313007005317	441	<u>UTM:</u> 597368 / 5378795 <u>Dez.-Grad:</u> 48,5546883994817 / 10,3195005757997	437	523
-------------------------	--	-----	--	-----	-----

Tabelle 1: Liste der untersuchten Standorte mit jeweils zwei Punkten dies- und jenseits der Landesgrenze (südliche Hälfte)

Nördliche Hälfte bis zur Grenze nach Hessen (Tabelle 2):

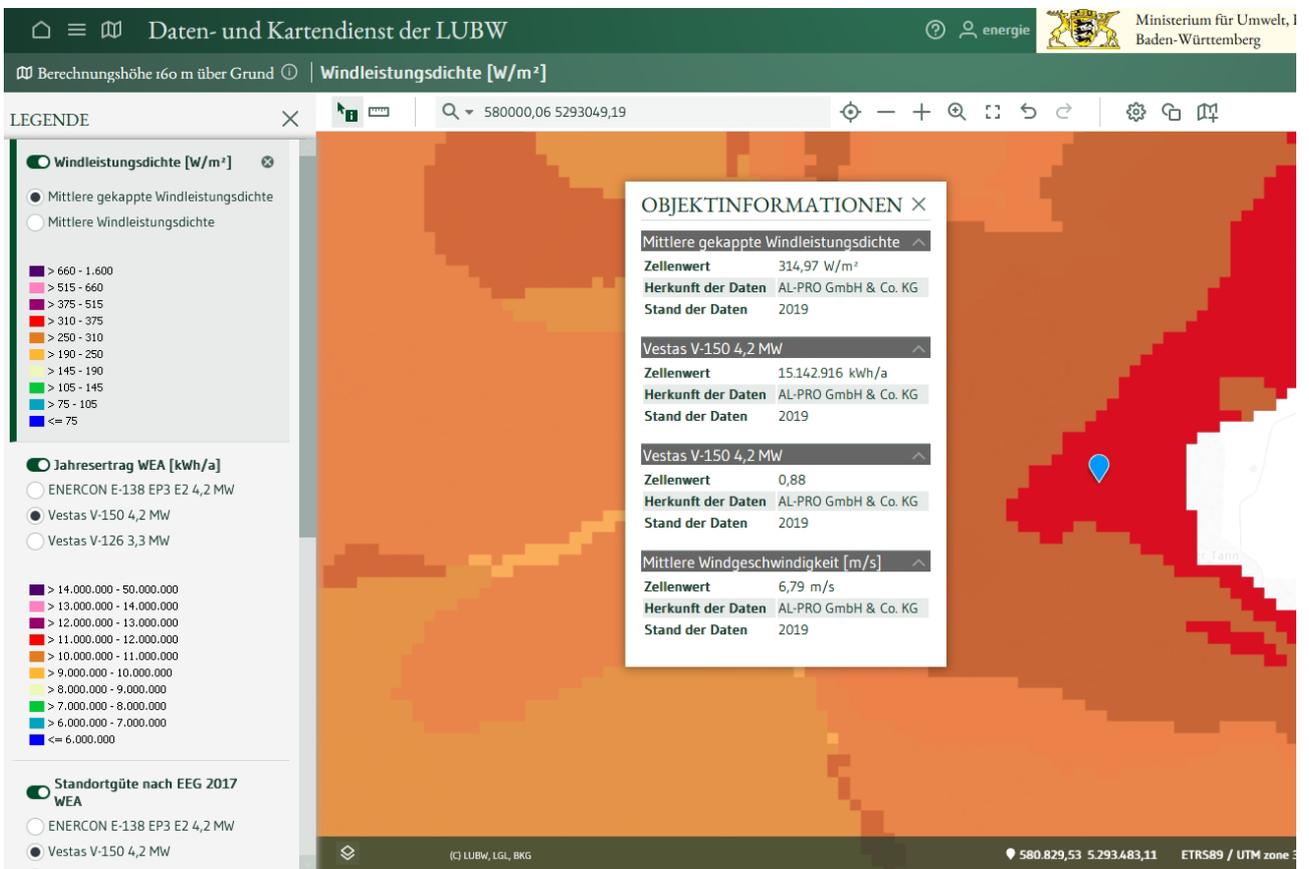
Baden-Württemberg			Bayern		Entfernung
Ort	Geograph. Daten	Höhe ü. NN [m]	Geograph. Daten	Höhe ü. NN [m]	[m]
Giengen a. d. Brenz	<u>UTM:</u> 595176,14 / 5387144,50 <u>Dez.-Grad:</u> 48,63012 / 10,291718	499	<u>UTM:</u> 595450 / 5387240 <u>Dez.-Grad:</u> 48,630937 / 10,295456	499	282
Neresheim	<u>UTM:</u> 605088,65 / 5401428,39 <u>Dez.-Grad:</u> 48,756992 / 10,429842	578	<u>UTM:</u> 604976 / 5401471 <u>Dez.-Grad:</u> 48,757394 / 10,42832	584	118
Riesbürg	<u>UTM:</u> 606167,06 / 5408939,25 <u>Dez.-Grad:</u> 48,824355 / 10,44645	505	<u>UTM:</u> 606198 / 5408901 <u>Dez.-Grad:</u> 48,824006 / 10,446862	506	49
Tannhausen	<u>UTM:</u> 602908,07 / 5424635,97 <u>Dez.-Grad:</u> 48,966065 / 10,406017	513	<u>UTM:</u> 602953 / 5424884 <u>Dez.-Grad:</u> 48,968288 / 10,406693	535	252
Satteldorf (A6)	<u>UTM:</u> 582423,87 / 5450536,35 <u>Dez.-Grad:</u> 49,202078 / 10,131489	473	<u>UTM:</u> 582290 / 5450391 <u>Dez.-Grad:</u> 49,200789 / 10,129622	474	196
Creglingen	<u>UTM:</u> 581196,50 / 5484776,00 <u>Dez.-Grad:</u> 49,510171 / 10,121625	350	<u>UTM:</u> 581231 / 5484666 <u>Dez.-Grad:</u> 49,509177 / 10,122079	352	115
Gerchsheim (A81)	<u>UTM:</u> 558807,41 / 5507016,96 <u>Dez.-Grad:</u> 49,712785 / 9,815719	393	<u>UTM:</u> 558692 / 5507022 <u>Dez.-Grad:</u> 49,712842 / 9,814119	390	115
Freudenberg	<u>UTM:</u> 526239,53 / 5505895,39 <u>Dez.-Grad:</u> 49,704998 / 9,363909	359	<u>UTM:</u> 526286 / 5505682 <u>Dez.-Grad:</u> 49,703076 / 9,36454	362	219
Walldürn	<u>UTM:</u> 520672,62 / 5498135,84 <u>Dez.-Grad:</u> 49,635422 / 9,286295	459	<u>UTM:</u> 520617 / 5498193 <u>Dez.-Grad:</u> 49,635938 / 9,285527	460	79

Mudau	<u>UTM:</u> 507504,74 / 5491676,38 <u>Dez.-Grad:</u> 49,577628 / 9,10381	548	<u>UTM:</u> 507428 / 5491686 <u>Dez.-Grad:</u> 49,577716 / 9,102749	539	76
-------	---	-----	--	-----	----

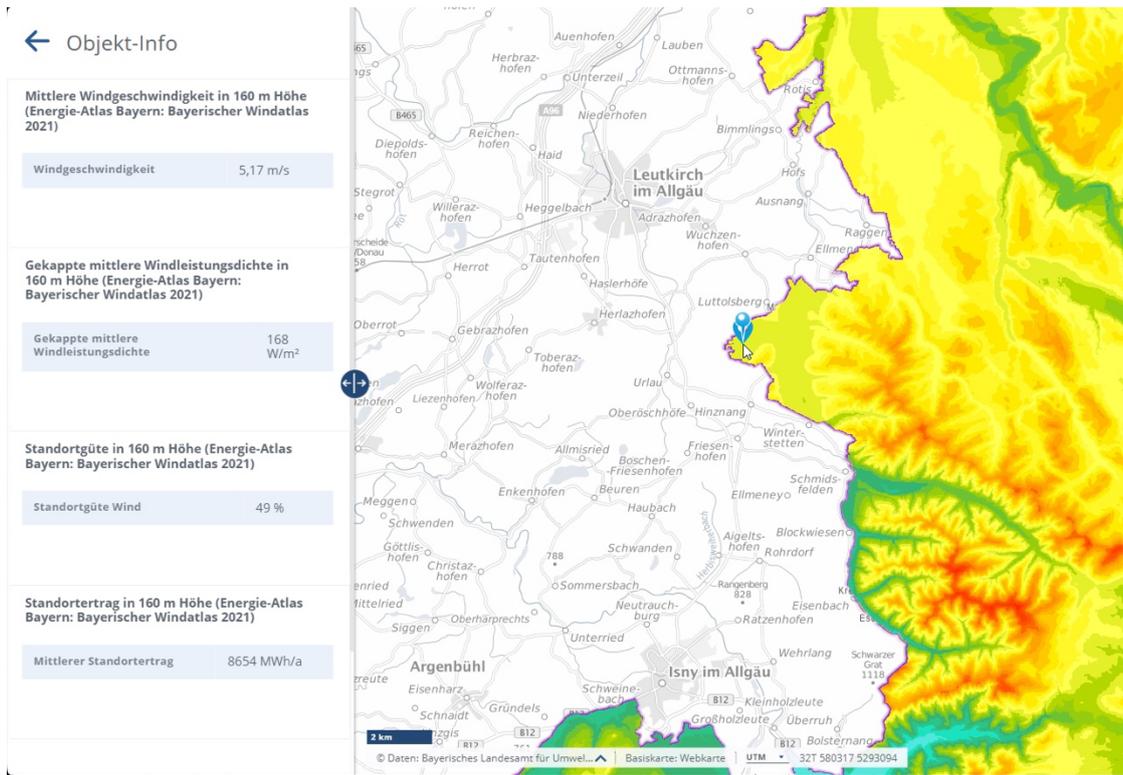
Tabelle 2: Liste der untersuchten Standorte mit jeweils zwei Punkten dies- und jenseits der Landesgrenze (nördliche Hälfte)

Als Beispiel für einen Standort reproduzieren wir hier Bildschirmfotos für den Standort Leutkirch im Allgäu aus beiden Windatlassen:

Baden-Württembergischer Windatlas (blaue Markierung, UTM Daten ganz unten rechts):



Korrespondierender Auszug aus dem bayerischen Windatlas (blaue Stecknadel, UTM-Daten unten am Rand):



Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der 20 Standorte dargestellt, wiederum jeweils aufgeteilt in die südliche (Tabellen 3 und 5) und die nördliche Hälfte (Tabellen 4 und 6).

Mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere gekappte Windleistungsdichte (160 m)

Zunächst untersuchen wir die mittlere Windgeschwindigkeit und die mittlere gekappte Windleistungsdichte in 160 Metern Höhe. Die Kappgeschwindigkeit ist in beiden Windatlassen auf den Wert 15 m/s gesetzt worden.

Es ist festzuhalten, dass die lokalen Bedingungen (nahezu gleiche geographische Höhe, sehr geringer räumlicher Abstand, identische Höhe (160 m) über Grund) zu nahezu gleichen Kennzahlen für die mittlere Windgeschwindigkeit in m/s, die mittlere gekappte Windleistungsdichte in W/m², die Standortgüte in % und den Jahresertrag der Mustermaschinen in MWh/a führen müssen.

Es ergibt sich folgendes Bild. Tabelle 3 enthält die Ergebnisse für die südliche Hälfte der Landesgrenze, Tabelle 4 entsprechend für die nördliche Hälfte.

Baden-Württemberg			Bayern		
Ort	Mittlere Windgeschw. [m/s]	Mittlere gekappte WLD [W/m ²]	Mittlere Windgeschw. [m/s]	Mittlere gekappte WLD [W/m ²]	Entfernung [m]
Kressbronn Bodensee	5,06	199,47	3,88	97	628
Wangen im Allgäu	5,54	214,92	4,02	95	503
Isny i. Allgäu	7,71	433,77	6,12	266	382
Leutkirch	6,79	314,97	5,17	168	306
Aitrach (A96)	6,10	265,01	5,11	166	154
Berkheim (A7)	5,70	229,52	5,25	183	226
Kirchberg a.d.Iller	5,69	224,25	5,23	175	157
Illerrieden	5,94	252,00	5,13	169	301
Elchingen A8 (Ulm)	6,06	257,91	5,61	205	16
Sontheim a. d. Brenz	5,73	238,33	5,18	169	523

Tabelle 3: Mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere gekappte Windleistungsdichte ausgewertet für 10 Standorte (südliche Hälfte) wie angegeben.

Baden-Württemberg			Bayern		
Ort	Mittlere Windgeschw. [m/s]	Mittlere gekappte WLD [W/m ²]	Mittlere Windgeschw. [m/s]	Mittlere gekappte WLD [W/m ²]	Entfernung [m]
Giengen a. d. Brenz	5,77	245,53	5,54	191	282
Neresheim	5,61	210,83	6,14	246	118
Riesbürg	5,49	223,82	6,05	251	49
Tannhausen	5,43	206,83	6,46	291	252
Satteldorf (A6)	5,96	226,02	6,38	273	196
Creglingen	5,82	236,58	6,34	285	115
Gerchsheim (A81)	6,30	264,60	6,57	295	115
Freudenberg	5,91	228,26	6,24	260	219
Walldürn	6,25	284,08	6,45	274	79
Mudau	6,49	292,29	6,68	300	76

Tabelle 4: Mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere gekappte Windleistungsdichte ausgewertet für 10 Standorte (nördliche Hälfte) wie angegeben.

Die Unterschiede sind auffallend groß. Dies erkennt man u.a. am Beispiel Isny im Allgäu. Hier findet sich eine Differenz von 1,6 m/s in der Windgeschwindigkeit im Vergleich zum 382 m weiter östlich auf der bayerischen Seite gelegenen Messpunkt. Noch deutlicher zeigt sich das in der mittleren gekappten Windleistungsdichte von 433,77 W/m² zu 266 W/m². Hier ergibt sich ein **um 63 Prozent höherer Wert** auf der baden-württembergischen Seite im Vergleich zum Messpunkt auf der bayerischen Seite.

Ein anderes Beispiel liefert Leutkirch mit einer mittleren gekappten Windleistungsdichte von 314,97 W/m² auf baden-württembergischer Seite und von 168 W/m² im Abstand von 306 m weiter östlich auf bayerischer Seite, ein **um 87 Prozent höherer Wert**.

Es treten aber nicht nur zu große Werte der Kenngrößen auf der baden-württembergischen Seite auf, sondern es tritt auch der umgekehrte Fall ein, wie man am Beispiel Riesbürg sehen kann: Bei einem Abstand von 49 m weist der baden-württembergische Windatlas eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5,49 m/s aus, der bayerische Windatlas hingegen den Wert 6,05 m/s. In Bezug auf die mittlere gekappte Windleistungsdichte finden wir die Werte 223,82 W/m² für Baden-Württemberg und 251 W/m² für Bayern.

Eine physikalisch-geographisch plausible Erklärung dieser Diskrepanzen ist aufgrund des Prinzips der Energieerhaltung unwahrscheinlich.

Brutto-Standortgüte

Folgerichtig schlägt sich diese Beobachtung auch im Brutto-Jahresertrag („JE“) und in der Brutto-Standortgüte eines Standorts nieder, wie die nachfolgenden Tabelle 5 und 6 zeigen.

Dem Brutto-Jahresertrag im bayerischen Windatlas liegt eine leicht leistungsstärkere Mustermaschine mit einer Nennleistung von 5 MW mit einem Rotordurchmesser von 148 m zugrunde. Der baden-württembergische Windatlas verwendet als Mustermaschine eine Vestas V150-4,2 mit 4,2 MW-Nennleistung. Dafür weist diese einen geringfügig größeren Rotordurchmesser von 150 m auf. Bei den an diesen Standorten auftretenden Windgeschwindigkeiten ist der Leistungsunterschied als vernachlässigbar einzustufen, so dass beide Jahreserträge aus den Windatlassen sehr gut vergleichbar sind.

Baden-Württemberg			Bayern		
Ort	Brutto-Standortgüte [%]	Mittl. JE Vestas V150-4,2 MW [MWh/a]	Brutto-Standortgüte [%]	Mittl. JE 5,0 MW [MWh/a]	Entfernung [m]
Kressbronn Bodensee	53	9.385,6	29	5.097	628
Wangen im Allgäu	61	10.797,3	30	5.210	503
Isny i. Allgäu	103	17.663,3	66	11.693	382
Leutkirch	88	15.143	49	8.652	306

Aitrach (A96)	72	12.706,7	48	8.544	154
Berkheim (A7)	64	11.344,2	52	9.215	226
Kirchberg a.d.Iller	64	11.308,7	51	9.041	157
Illerrieden	69	12.210,8	49	8.727	301
Elchingen A8 (Ulm)	72	12.589,2	59	10.451	16
Sontheim a. d. Brenz	65	11.522,6	51	8.960	523

Tabelle 5: Brutto-Jahreserträge und Brutto-Standortgütern eines Standorts, gemessen dies- und jenseits der Landesgrenze wie angegeben (südliche Hälfte).

Baden-Württemberg			Bayern		
Ort	Brutto-Standortgüte [%]	Mittl. JE Vestas V150-4,2 MW [MWh/a]	Brutto-Standortgüte [%]	Mittl. JE 5,0 MW [MWh/a]	Entfernung [m]
Giengen a. d. Brenz	68	11.634,2	57	10.095	282
Neresheim	64	10.947,2	70	12.288	118
Riesbürg	62	10.708,2	68	12.046	49
Tannhausen	61	10.443,3	76	13.492	252
Satteldorf (A6)	71	12.179,4	76	13.413	196
Creglingen	69	11.848,7	77	13.555	115

Gerchsheim (A81)	79	13.558,6	82	14.429	115
Freudenberg	70	12.104,4	75	13.203	219
Walldürn	77	13.310,4	79	13.954	79
Mudau	82	14.155,6	84	14.872	76

Tabelle 6: Brutto-Jahreserträge und Brutto-Standortgüten eines Standorts, gemessen dies- und jenseits der Landesgrenze wie angegeben (nördliche Hälfte).

Genauso wie für die Kennzahlen der mittleren Windgeschwindigkeit und der mittleren gekappten Windleistungsdichte sind die Unterschiede der Brutto-Standortgüte und des prognostizierten Brutto-Jahresertrags drastisch. Beispielhaft schauen wir uns Wangen im Allgäu an. Der Windatlas Baden-Württemberg weist eine rund doppelt so hohe Brutto-Standortgüte (61 % zu 30 %) auf bei rund doppelt so hohem Brutto-Jahresertrag (10.797 Mwh/a zu 5.210 Mwh/a) im Vergleich zum bayerischen Windatlas, und dies bei einem räumlichen Abstand von lediglich 503 Metern. In der nördlichen Hälfte sei beispielhaft der Standort Tannhausen genannt, mit einem Abstand von 252 m zwischen den beiden Messpunkten. Es ergeben sich eine Brutto-Standortgüte in Baden-Württemberg von 61 %, und, im Gegensatz dazu, in Bayern mit 76 %, denen sich Brutto-Jahreserträge von 10.443,3 MWh/a und 13.492 MWh/a gegenüberstehen.

Stetigkeit der Windgeschwindigkeiten aus DWD Windmessdaten

Die signifikante Änderung der mittleren Windgeschwindigkeiten und der mittleren gekappten Windleistungsdichte an der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern kann nicht auf der Basis von physikalisch-technischen Sachargumenten erklärt werden. Dies erkennt man auch, wenn man die amtlichen Daten des Deutschen Wetterdienstes aus den Messungen der mittleren Windgeschwindigkeit entlang der Landesgrenze auf beiden Seiten auswertet.

Dazu verwenden wir die Messdaten des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 1981 bis 2000 aus dem DWD Windatlas, angegeben in 100 m Höhe als Referenz. Wir lesen die Kennzahlen an denselben Standorten wie oben angegeben auf beiden Seiten der Landesgrenze entlang einer von Westen nach Osten verlaufenden Verbindungslinie der beiden Punkte aus. Auf der Linie geben wir die Werte zwischen -600 m und +600 m relativ zum Mittelpunkt der Linie an. Der Mittelpunkt der Linie ist identisch mit dem Auslesepunkt aus den vorigen Abschnitten. Die Stetigkeit der Windströmung ändert sich nicht, wenn

man die Windgeschwindigkeiten von 100 m auf eine Nabenhöhe von 160 m skaliert. Die Daten sind in Tabelle 7 dargestellt.

Man erkennt die Stetigkeit der Windgeschwindigkeit entlang der Linie beim Übergang zwischen Baden-Württemberg und Bayern. Die gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten bei Grenzübergang ändern sich (bis auf die inhärenten geringen statistischen Fluktuationen) nicht.

Daran erkennen wir, dass sich die wahren, gemessenen physikalischen Windverhältnisse beim Passieren der Landesgrenze nicht ändern. Demzufolge muss es sich bei den signifikanten Änderungen, wie sie aus dem Vergleich der beiden Windatlas folgen, um Artefakte der Windatlas handeln.

Ort	Windmessdaten Deutscher Wetterdienst 100 m Höhe, West - Ost						
	-600m	-400m	-200m	Zentrum	+200m	+400m	+600m
Kressbronn Bodensee BW	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Kressbronn Bodensee BY	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Wangen im Allgäu BW	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Wangen im Allgäu BY	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Isny i. Allgäu BW	7,4	7,4	7,3	7,3	7,1	6,9	6,6
Isny i. Allgäu BY	7,3	7,4	7,4	7,4	7,3	7,3	7,1
Leutkirch BW	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Leutkirch BY	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9
Aitrach (A96) BW	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6	5,6	5,6
Aitrach (A96) BY	5,4	5,5	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6
Berkheim (A7) BW	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Berkheim (A7) BY	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Kirchberg a.d.Iller BW	5,3	5,5	5,5	5,5	5,3	5,4	5,4
Kirchberg a.d.Iller BY	5,5	5,5	5,5	5,3	5,4	5,4	5,4
Illerrieden BW	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,0	4,9
Illerrieden BY	5,0	5,0	5,0	5,0	5,1	5,0	5,0
Elchingen A8 (Ulm) BW	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Elchingen A8 (Ulm) BY	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Sontheim a. d. Brenz BW	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2
Sontheim a. d. Brenz BY	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1
Giengen a. d. Brenz BW	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Giengen a. d. Brenz BY	5,6	5,6	5,6	5,6	5,5	5,6	5,4
Neresheim BW	5,9	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,7
Neresheim BY	5,9	5,9	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Riesbürg BW	5,3	5,3	5,4	5,6	5,4	5,5	5,5
Riesbürg BY	5,3	5,4	5,6	5,4	5,5	5,5	5,5
Tannhausen BW	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1
Tannhausen BY	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1

Satteldorf (A6) BW	5,7	5,7	5,7	5,7	5,8	5,9	5,9
Satteldorf (A6) BY	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,8	5,9
Creglingen BW	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Creglingen BY	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,4
Gerchsheim (A81) BW	5,6	5,6	5,3	5,3	5,2	5,1	5,0
Gerchsheim (A81) BY	5,6	5,6	5,6	5,3	5,3	5,2	5,1
Freudenberg BW	5,9	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9	5,8
Freudenberg BY	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,8
Walldürn BW	5,1	5,3	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8
Walldürn BY	5,4	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Mudau BW	6,2	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0	5,9
Mudau BY	6,2	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0	5,9

Tabelle 7: Mittlere Windgeschwindigkeiten des Deutschen Wetterdiensts gemessen in den Jahren von 1981 bis 2000 für die oben definierten Messpunkte („Zentrum“) in Baden-Württemberg („BW“) und Bayern („BY“) westlich und östlich der Landesgrenze.

Mögliche Ursachen der Diskrepanz zwischen den beiden Windatlassen

Da es sich ja offenbar um ein Problem zwischen den beiden Länderatlanten handelt, beschränkt sich die nachfolgende Analyse auf die beiden Länderatlasse. Laut Beschreibung verwenden beide Windatlasse dieselbe Methodik mit ähnlichen Simulationsketten.

Innerhalb der Simulationskette wird nun zunächst mit einem sogenannten Mesoskalen Modell (MC-Modell) die überregionale Windsituation ermittelt. Bei Mesoskalenmodellen handelt es sich um atmosphärische Wetter- und Klimamodelle, die beispielsweise zur Wettervorhersage eingesetzt werden. Sie ermitteln großräumig (Mitteleuropa oder ganze Nordhalbkugel) Zeitreihen mit einzelnen Wetterzuständen. Diese Zeitreihen werden durch eine Gewichtung über die Häufigkeit ihres Auftretens zusammengefasst. So entsteht für jede Region eine Windrose mit 30° Sektoren, in der die einzelnen Windrichtungen mit ihrer Häufigkeit und ihrer Intensität erfasst werden. Auf diese Weise werden großräumige Wetterphänomene wie Sommer, Winter, Hochdruck- und Tiefdruckeinflüsse, Föhn über die Alpen, Kanal und Düsenwirkung von z. B. der oberrheinischen Tiefebene erfasst. Allerdings haben diese Modelle nur eine Auflösung von bestenfalls 2 km x 2 km und können somit den Effekt der Orographie (Beschleunigung und Verzögerung der Windströmung durch Berge und Hügel, Stauwirkung von Hügelketten, Verwirbelung durch Berge usw.) nicht genau genug darstellen. Dies erfolgt durch die Kopplung mit einem sogenannten Mikroskalenmodell.

Hier werden die durch das Mesoskalenmodell erzeugten einzelnen Wetterzustände für eine bestimmte Region mit einer Feinauflösung der Oberfläche „nachbearbeitet“. Dies erfolgt bei komplexem Gelände durch eine numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD), was mittlerweile als „State of the Art“ gilt, ausgereift ist und dementsprechend weltweit eingesetzt wird. Allerdings ist dieser Zugang nicht unbedingt für

so große Gebiete wie für ein gesamtes Bundesland geeignet, sondern wird häufig für räumlich begrenzte Gebiete verwendet. Ebenso sind die einzelnen Bausteine entsprechend ausgetestet und werden ständig verbessert und weiterentwickelt. Dennoch können eben in der gesamten Prozesskette Fehler durch inhärente Ungenauigkeiten entstehen, sich entsprechend fortpflanzen und/oder verstärken und sich so zu einem durchaus erheblichen Gesamtfehler aufaddieren. Fehler sind in diesem Zusammen nicht in dem Sinne von „falsch ausgeführt“ zu verstehen, sondern im Sinn von „ungenau“. Es ist zum Beispiel bekannt, dass diese Mesoskalenmodelle (Wetter- und Klimamodelle) gewisse Mängel haben und zudem bei der groben Geländeauflösung, die sie verwenden, schon eine gewisse Ungenauigkeit an die CFD-Modelle als Anfangs- oder Randbedingung weitergeben, so dass sich die Ungenauigkeit fortpflanzt. Sowohl der bayerische Windatlas als auch der Windatlas Baden-Württemberg verwenden laut ihrer Endberichte dieselbe CFD-Methode, nämlich Meteodyn. Somit treffen die nachfolgenden Betrachtungen für beide Atlasse zu.

Die CFD-Modelle lösen die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Da die Gleichungen zu komplex für eine geschlossene Lösung sind, müssen sie durch eine numerische Approximation gelöst werden. Hierzu wird der kontinuierliche dreidimensionale Raum über dem Gelände durch eine diskrete Anzahl von Punkten repräsentiert. Die Gesamtzahl der Punkte bildet dann ein numerisches Gitter oder Netz, wie in der nachfolgenden Abbildung beispielhaft dargestellt ist:

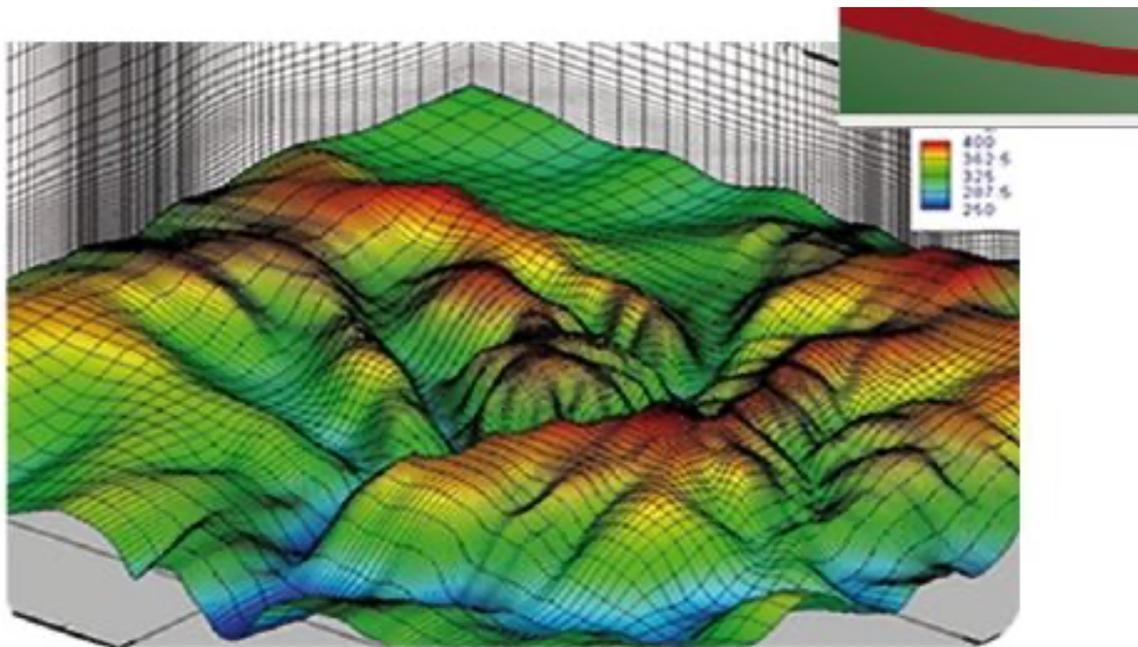


Abb. 1: Räumliches Gitter für eine generische Geländekontur. (Aus AL Pro Prospekt). Die unterschiedlichen Farbflächen sind nach der Höhe eingefärbt von blau nach rot mit zunehmender Höhe.

Man erkennt, wie die Oberfläche durch eine bestimmte Anzahl von Punkten repräsentiert ist, deren Verbindungslinien ein regelmäßiges Gitter bilden. Jede Netzlinie hat genauso viele

Punkte wie ihre benachbarte Netzlinie. Hier erkennt man bereits, dass die Punkte nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern an Stellen mit entsprechenden Details verdichtet sind. Die Feinheit des Gitters ist begrenzt durch die Begrenzung der Speichergröße auf dem Computer.

An den Seitenwänden des in Abb. 1 dargestellten Ausschnitts erkennt man die räumliche Aufteilung in die Vertikale von unten nach oben. Die vertikalen Netzlinien sind hier einfache gerade Linien, ausgehend von den entsprechenden Netzpunkten an der Oberfläche. Zusammen mit den Seitenflächen bildet das Rechnernetz eine quaderförmige Box die oben noch durch einen Deckel, dem sogenannten Fernfeldrand, geschlossen wird. An den Seitenwänden erkennt man, dass die Punkteverteilung (Auflösung) in vertikaler Richtung nicht gleichmäßig ist, sondern die Netzpunkte in der Nähe der Oberfläche stark konzentriert sind und die Punkteabstände mit zunehmendem Abstand zunehmen. Diese quaderförmige Gitterbox definiert das numerische Modell, das im Rechner behandelt wird.

Nun wird nicht ganz Baden-Württemberg oder ganz Bayern in so einer Box dargestellt, sondern einzelne Teile (Regionen), die dann getrennt durchgerechnet werden und die Ergebnisdaten ständig über die Blockgrenzen hinweg ausgetauscht werden. Damit können mehrere Rechner gleichzeitig das Problem im Austausch bearbeiten (Parallelisierung).

Hier sieht man bereits, dass durch geschickte oder ungeschickte Punkteverteilung z.B. Änderungen in der Geländekontur entstehen, d.h. man kann abhängig von der Diskretisierung verschiedene Lösungen bekommen.

Der Windatlas Baden-Württemberg hat eine minimale Auflösung von 30 m x 30 m, der bayerische Windatlas eine solche von 10 m x 10 m, kann also deutlich feinere Details auflösen. Wie aber aus Bild 1 folgt, heißt das nicht unbedingt, dass überall die Auflösung feiner ist.

Wesentlich wichtiger als die laterale Auflösung ist aber die vertikale Auflösung, da damit die Behandlung der viskosen Effekte gesteuert wird. (Die Reibungskräfte, bzw. die viskosen Schubspannungen hängen von den Ableitungen der Geschwindigkeit normal zur Strömungsrichtung ab.) Grundsätzlich gilt bei Strömungen an der Oberfläche die Haftungsbedingung, d.h. die Geschwindigkeit an einer festen Wand ist gleich Null. Dann nimmt sie mit zunehmendem Abstand von der Wand zu. Normalerweise gilt, dass die erste Netzzelle noch innerhalb der laminaren Unterschicht liegen sollte. Bei Windströmungen ist die laminare Unterschicht nur wenige Millimeter dick, darüber beginnt dann die turbulente Prandtl Schicht. Ferner sollte die Maschenweite der ersten 10 Zellen konstant sein, dann entsprechend einer geometrischen Reihe mit einem Streckungsfaktor von 1,2 wachsen.

Das ist bei Windströmungen in einem Gelände nicht machbar, zudem hat man im Gelände üblicherweise kaum eine glatte Oberfläche. Man umgeht das Problem, indem man in den Randbedingungen für feste Oberflächen eine Rauheitshöhe verwendet. Das ist diejenige Höhe über Grund, in der die mittlere Geschwindigkeit bereits gleich Null wird. Ist z. B. bei rauem unebenem Gelände die Rauheitshöhe 0,4 m, so bedeutet dies, dass vom Boden bis zu dieser Höhe die Geschwindigkeit gleich Null ist. Das heißt wiederum für die Numerik, dass

die erste Zelle innerhalb dieser Höhe liegen sollte, also die Maschenweite dieser ersten Zelle etwa 0,5 m sein sollte.

Nun wird im Windatlas Baden-Württemberg, der von der Fa. AL-Pro erstellt wurde, angegeben, dass der Flow Solver auch bei einer Zelldicke von wenigen Metern noch stabile Ergebnisse erzeugen würde (bei einer Veranstaltung der Fa. AL-Pro in Potsdam war die Rede von einer Zelldicke von 6 m, was mehr als das Zehnfache der eigentlich notwendigen Maschenweite von 0,5 m ist). Damit kann man eigentlich nur numerisch stabile Ergebnisse erhalten, wenn sogenannte Wandfunktionen (wall functions) verwendet werden, was wiederum nur für anliegende Strömungen geeignet ist (normalerweise wird innerhalb des Lösungsalgorithmus ein konstanter Wert für die Strömungsvariablen innerhalb einer Zelle angenommen. Um also saubere Gradienten zu erhalten, benötigt man ein entsprechend feines Netz. Verwendet man nun Wandfunktionen, wird in Wandnähe ein bestimmter Verlauf der Funktion angenommen bzw. vorgegeben. Damit wird das Ablöseverhalten der Strömungen unterbewertet, die Strömung wird dadurch zu sehr reibungsfrei. Das wiederum führt gerade bei konvexen Konturverläufen zu Übergeschwindigkeiten in den Simulationen.

Dies dürfte der Hauptgrund für die grundsätzlich zu optimistischen Ergebnisse des Windatlas Baden-Württemberg sein. Im Windatlas Bayern werden keine Angaben über die Dicke der ersten Zelle gemacht (im Fachgebiet ist dies bei der Vorstellung von CFD-Ergebnissen eigentlich unerlässlich). Grundsätzlich werden einige wichtige Charakteristika des Gitternetzes wie Anzahl der Punkte in den drei Koordinatenrichtungen, die Dicke der ersten Zelle, die größte Maschenweite, die kleinste Maschenweite, bezogen auf eine charakteristische Länge bezogen, angegeben.

Wie im Windatlas Baden-Württemberg erwähnt, endet das Rechengebiet an der Landesgrenze nicht schlagartig, sondern es wird noch ein benachbarter Bereich hinzugenommen. Allerdings ist die dann verwendete Datenbasis für die Geländemodellierung nicht 5 m x 5 m, sondern dann nur 30 m x 30 m. Damit können Details in der Geländedarstellung verwischt werden, dies könnte gerade im Allgäu und im Bereich Odenwald sich deutlich auswirken.

Wie erwähnt besteht der Rechenraum aus einem Quader mit sechs Seitenflächen: einer Einströmfläche, einer gegenüberliegenden Ausströmfläche, zwei Seitenflächen, der Grundfläche und dem oberen „Deckel“, der Fernfeldfläche. An all diesen Randflächen müssen für die numerische Lösung entsprechende Randbedingungen vorgegeben werden.

Die Grundfläche ist die Geländekontur, hier gilt die sogenannte no-slip condition, d.h. die Haftbedingung zusammen mit der o.g. Rauheitshöhe. Für den oberen Fernfeldrand können die Werte aus der Lösung des Mesoskalenmodells genommen werden. An der Eintrittsfläche wird ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben, welches ebenfalls aus dem Mesoskalenmodell stammt. Schwieriger sind die Seitenwände. Die numerische Lösung entwickelt sich ja iterativ und es können transiente Zwischenstände auftreten. Hier muss man zulassen, dass Störungen aus dem Feld hinaus wandern können und nicht einfach feste Werte aus der Lösung des Mesoskalenmodells setzen. Dasselbe gilt für die Austrittsrandbedingungen.

Auch hier muss man zulassen, dass Störungen aus dem Rechengebiet hinauslaufen können und nicht etwa reflektiert werden (nicht reflektierende Randbedingungen).

Betrachtet man nun bei den vorherrschenden westlichen Windrichtungen die Grenze zu Bayern, tritt folgendes Problem auf: Für Baden-Württemberg ist die Landesgrenze eine Austrittsrandbedingung mit den erwähnten Herausforderungen und eines kritischen Einflusses der Randbedingungen auf die zu berechnenden Windverhältnisse. Aus Sicht der bayerischen Seite liegt eine Eintrittsfläche mit relativ einfachen Randbedingungen vor. Wenn vor allem die Austrittsrandbedingung nicht genau genug implementiert ist, kann es durchaus zu markanten Unterschieden kommen. In den frei verfügbaren Beschreibungen zu Meteodyn wird dieses wichtige Problem „gelöst“ durch einen Hinweis auf eine sogenannte „Automatic Generation of Boundary Conditions“, ohne dass weitere Details zu diesem kritischen Aspekt angegeben werden. Lediglich als Käufer der Software erhält man ausführliche Handbücher.

Das Problem des Übergangs zwischen der Mikroskala und der Mesoskala ist in der Fachliteratur bekannt. So schreibt zum Beispiel Stefan Emeis in *Windenergie-Meteorologie* (Springer Vieweg, Cham 2022) zum Problem der Lücke zwischen der Meso- und der Mikroskala: „Zwischen der Mikroskala (Größenordnung von weniger als 1 m bis etwa 100 m) und der Mesoskala (Größenordnung von mehreren Hundert Metern bis zu mehreren Hundert Kilometern) gibt es eine Lücke, für die weder mikroskalige Modelle noch mesoskalige Modelle vollständig geeignet sind. Wyngaard (Toward Numerical Modeling in the “terra Incognita”, J. Atmos. Sci. **61**, 1816 (2004)) hat diese Lückenregion, in der die energie- und flusshaltige Skala der Turbulenz kleiner ist als das, was in mesoskaligen Modellen aufgelöst werden kann, und größer als das, was in mikroskaligen Modellen aufgelöst werden kann, als „terra incognita“ bezeichnet.“ (S. 222, Kap. 7.3.4).

Konsequenzen und offene Fragen

Die Diskrepanzen zwischen den Kennzahlen beider Windatlas im Grenzgebiet können nicht durch physikalische oder geographische Ursachen plausibel erklärt werden. Da die Landesregierung Baden-Württemberg den Windatlas 2019 als Grundlage für die Suchräume für den Ausbau der Windenergie im Land ausgibt, bestehen offensichtliche Zweifel an der Zuverlässigkeit der Planungen, wenn diese auf der Basis eines Windatlases ausgeführt werden, der inhärente Inkonsistenzen enthält. Es wäre in der Verantwortung der Landesregierung, eine zuverlässige Planungsgrundlage zu schaffen oder die drastischen Unterschiede und Inkonsistenzen im Windatlas zu erklären.

Fazit

Der Vergleich der Kennzahlen aus den beiden Windatlassen dies- und jenseits der baden-württembergisch-bayerischen Landesgrenze zur Windhöffigkeit der untersuchten Standorte weist drastische Unterschiede auf. Einzelne Kennzahlen von Standorten unterscheiden sich um fast einen Faktor 2. Eine sachlich-physikalisch-geographische Erklärung kann nicht plausibel gegeben werden. Dies wird deutlich anhand der Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeiten gemessen vom Deutschen Wetterdienst, welche eine Stetigkeit der Kennzahl an einem Standort beim Passieren der Landesgrenze aufweisen. Es stellt sich die Frage, ob in den Ergebnissen der Windatlasse eine zu große systematische Ungenauigkeit vorliegt. Damit könnten grundsätzlich und prinzipiell überall im Land systemische Mängel unbekannter Größe im Windatlas vorhanden sein. Damit erscheinen der Windatlas Baden-Württemberg 2019, der damit verknüpfte Potentialatlas des Landes mit den Vorranggebieten und die Feststellung der Flächen zum Erreichen des 1,8 -%-Ziels der laufenden Bestrebungen der Landesregierung zum forcierten Ausbau der Windenergie insgesamt fragwürdig. Offenbar erweist sich die zentrale Stütze der Argumentation, die Windhöffigkeit über die mittlere gekappte Windleistungsdichte anhand des Windatlas festzustellen, als äußerst fragwürdig.

Die Verfasser

Dipl.-Ing. (FH) Jörg Saur hat Elektrische Energietechnik mit Schwerpunkt Antriebs- und Regelungstechnik studiert und arbeitete über 30 Jahre lang überwiegend als Entwickler für die Leistungsregelung an Verbrennungsmotoren bei einem großen Automobilhersteller in Stuttgart. In einer Studie zum Windatlas Baden-Württemberg untersuchte er auch die Zuverlässigkeit der Prognosen in einem Realitätscheck.

Dipl.-Ing. Willy Fritz hat an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik studiert, mit u.a. den Studienschwerpunkten Aerodynamik, Gasdynamik, numerische Strömungsmechanik, Thermodynamik, Reaktionskinetik, Stofftransport und Verbrennung, numerische Methoden; Diplomarbeit auf dem Gebiet der Gebäudeaerodynamik (Abschluss Diplom-Ingenieur). Während seiner 40jährigen Berufstätigkeit arbeitete er 30 Jahre lang in der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie auf dem Gebiet der numerischen Strömungssimulation. Dabei erwarb er sich im Rahmen nationaler und internationaler Verbundprojekte umfassende Kenntnisse sowohl in der Entwicklung als auch in der Anwendung von hochwertigen numerischen Rechenmethoden zur Behandlung von hochturbulenten Strömungen um Luftfahrzeuge im Hochanstellwinkel Bereich (manövrierende Kampfflugzeuge, Wiedereintrittsprobleme, Zwei-Phasen-Strömungen mit Verbrennung in Triebwerken) als auch Strömungen im Niedergeschwindigkeitsbereich wie Landekonfigurationen mit Klappenausschlägen und ausgefahrenen Fahrwerken. Insbesondere war er an der Entwicklung von Turbulenzmodellen für Navier-Stokes Methoden, wie sie auch im Windatlas verwendet werden, beteiligt. Er war Senior Mitglied beim AIAA (American Institute for Aeronautics and Astronautics) und dort im Panel Applied Aerodynamics mehrere Jahre als Chairman für die Organisation internationaler Konferenzen mit zuständig. Unter anderem für das Reviewing von Konferenzpapieren aus aller Welt. Er hat zu verschiedenen Windkraftprojekten Wirtschaftlichkeitsanalysen erstellt.

Prof. Dr. Michael Thorwart erhielt sein Diplom in Physik 1996 an der Universität Tübingen nach einem Forschungsaufenthalt an der University of Illinois. 2000 promovierte er an der Universität Augsburg im Bereich der Quantenstatistik. Nach Postdoc-Aufenthalten an der Technischen Universität Delft (Niederlande) und am NTT Basic Research Laboratory in Japan arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent an der Universität Düsseldorf, wo er sich in 2006 habilitierte. Von 2007 bis 2010 leitete er eine Junior-Forschungsgruppe am Freiburg Institute for Advanced Study an der Universität Freiburg. Seit 2010 ist er Professor am I. Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg. Er ist Mitglied im DFG-Exzellenzcluster CUI/AIM Advanced Imaging of Matter in Hamburg und im DFG-Schwerpunkt „Skyrmionics“. Für zahlreiche internationale Forschungsorganisationen und Fachjournale arbeitet er weltweit als Gutachter. Seine Arbeitsgebiete sind Theoretische Quantenphysik und u.a. auch die grundlegenden Energiesammelprozesse der Photosynthese. Erstmals 2014 organisierte er den Energietag Zollernalb gemeinsam mit renommierten Experten aus dem Bereich der Energiewirtschaft. Er untersuchte auch die Prognosefähigkeit des Windatlas Baden-Württemberg.

Anhang

Für den Leser stellen wir in diesem Anhang Leitsätze und Kernaussagen der beiden Windatlas im wörtlichen Zitat zusammen.

1) Auszüge aus dem Bayerischen Windatlas des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Vorwort (Zitat):

„...Der Bayerische Windatlas nutzt modernste Berechnungsverfahren und gibt einen Überblick über die Windverhältnisse in ganz Bayern. Standortspezifisch zeigt er in hoher Auflösung mit verschiedenen Wind- und Energieertragskarten die Chancen der Windenergienutzung auf und ist dadurch eine gute Orientierungshilfe bei der Planung neuer Windenergieanlagen.“

Kapitel 1 Der Bayerische Windatlas (Zitat):

„...Durch die Aktualisierung des Bayerischen Windatlas konnte im Vergleich zum Windatlas von 2014 eine deutliche Qualitätsverbesserung erreicht werden. Die Datengrundlage des Bayerischen Windatlas bilden hochaufgelöste Zeitreihen, auf deren Basis die Berechnungen für die Karten durchgeführt wurden.“

Kapitel 2 Was der Bayerische Windatlas leistet (Zitat):

„Der Bayerische Windatlas gibt Auskunft über die Windverhältnisse in Bayern, er umfasst dabei die mittlere Windgeschwindigkeit, die gekappte mittlere Windleistungsdichte, die mittlere Turbulenzintensität, den möglichen Standortertrag (standortspezifischer Jahresertrag) und die Standortgüte einer Windenergieanlage. Die Karten im Bayerischen Windatlas zeigen die Ergebnisse für diese Größen in 10 m (nur Windgeschwindigkeit), 100 m, 120 m, 140 m, 160 m, 180 m und 200 m Höhe über Grund. Sie vermitteln einen detaillierten Eindruck der Windverhältnisse in typischen Planungshöhen von WEA. Im Bayerischen Windatlas 2021 werden Verbesserungen im Hinblick auf das Modellsystem,

die Berechnungsmethoden und die Datenbasis zur Verifikation im Vergleich zu seinem Vorläuferprodukt aus dem Jahr 2014 umgesetzt. Für die 20-jährige Wetter-Simulation wird das für Windenergieanwendungen am meisten angewandte mesoskalige Modell WRF (Weather Research and Forecasting Model) mit einer hochauflösenden CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) gekoppelt. Somit können die Windverhältnisse genauer analysiert werden als zum Beispiel mit einer Berechnung auf Basis von Mittelwerten. Zusätzlich wird im Rahmen des mikroskaligen Downscaling das bereits bei **anemos** bewährte Remodelling Verfahren (Optimierung des Windgeschwindigkeitsfeldes mittels Windmessungen) angewendet. Dieses berücksichtigt mikroskalige Korrekturen und minimiert vor allem systematische Differenzen durch eine Anpassung der Modell- mit Beobachtungsdaten. Der neue Bayerische Windatlas hat über das gesamte Bundesland Bayern eine horizontale Gitterauflösung von 10 m x 10 m und bietet damit eine erweiterte Informationsbasis gegenüber der Vorgängerversion.“

Kapitel 3 Wie der Bayerische Windatlas genutzt werden kann (Zitat):

„...Im Allgemeinen gibt er einen detaillierten Überblick über das Vorkommen des Wind- und Ertragspotenzials in Bayern. Zusätzlich können weitere Informationen wie die mittlere Turbulenzintensität, die **gekappte mittlere Windleistungsdichte und die Standortgüte** herangezogen werden....Um das Produktionsverhalten von Windenergieanlagen wiederzugeben, wird die gekappte mittlere Windleistungsdichte aufgrund der zusätzlichen Berücksichtigung von Luftdichte, Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und Abregelung der Leistung der WEA bei Nennwindgeschwindigkeit herangezogen. Die **Standortgüte** dient als erste Einschätzung des anzulegenden Wertes für die Vergütung (**EEG 2021**), welcher je nach Standortgüte mit einem Korrekturfaktor multipliziert wird. Anhand der Qualitätssicherung des Bayerischen Windatlas, der Verifikation, können die Interessenten einschätzen, ob die Zuverlässigkeit der ermittelten Windgeschwindigkeiten ihren Anforderungen entspricht.“

Kapitel 5 Vorgehen und Datengrundlage (Zitat):

„Die Karten des Bayerischen Windatlas beruhen auf Berechnungen von 20-jährigen Zeitreihen mit 10-minütiger Auflösung eines mesoskaligen Wettermodells, das die qualitativ hochwertigen, globalen meteorologischen ERA5 Wetterdaten auf regionale Bedingungen weniger Kilometer verfeinert. Unter einem mesoskaligen Wettermodell versteht man ein thermodynamisches, vierdimensionales (drei Raumrichtungen plus die zeitliche Achse) atmosphärisches Modell. Dieses berechnet die räumlich und zeitlich hochaufgelösten Zeitreihen, welche das Wettergeschehen der letzten 20 Jahre detailliert abbilden, wodurch es sich von statistischen Modellen deutlich unterscheidet. Mit Hilfe der Kopplung mit einem CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics) können die Windverhältnisse mit einer Auflösung von 10 Metern dargestellt werden. Zusätzlich enthält dieser Schritt ein Optimierungsverfahren für die standortspezifische Anpassung.

Methodik

In den meisten Ländern der Welt werden Wetterbeobachtungen durchgeführt und anschließend an einer zentralen Stelle gesammelt. Diese weltweiten Daten werden vor allem für die Wettervorhersage aufbereitet und in die Wettermodelle eingepflegt. Daneben werden auch Simulationen des Wetters der Vergangenheit durchgeführt. Diese

sogenannten Reanalyse-Daten werden von Klimazentren bereitgestellt. **Der derzeit qualitativ beste Datensatz der Vergangenheit ist die ERA5 Reanalyse des Europäischen Zentrum für Mittelfristvorhersage (EZMWF). In diesem Datensatz fließen z. B. auch Windgeschwindigkeiten des DWD Messnetzes in Deutschland ein.**

Die Windgeschwindigkeiten sollen als ein 20-jähriges Mittel der Jahre 2001 – 2020 gebildet werden. Um das Wettergeschehen der letzten 20 Jahre so genau wie möglich abzubilden, **wird der 20-jährige Zeitraum vollständig simuliert.** ... Die Prozesskette setzt sich demnach aus der Kopplung einer mesoskaligen und mikroskaligen Modellierung und eines daraus abgeleiteten empirischen mikroskaligen Downscaling inklusive Optimierungsverfahren (Remodelling) zusammen. Das mesoskalige Modell wird dabei von dem globalen Datensatz ERA5 (Reanalysedaten) angetrieben. In der Abbildung 16 (von oben nach unten) ist beispielhaft für das Jahr 2019 das Windfeld für Bayern, wie es sich in den ERA5 Daten darstellt, nach dem dynamischen Downscaling mit einem Mesoskala-Modell (WRF) und nach dem anschließenden mikroskaligen Downscaling (CFD) inklusive Remodelling gezeigt.

Bei dem mesoskaligen bzw. dynamischen Downscaling wurden die globalen Reanalysedaten ERA5 mit grober räumlicher (~ 30 km) und zeitlicher (1 Stunde) Auflösung mittels des Mesoskala-Modells WRF (Weather Research and Forecasting Model) auf eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung verfeinert (3 x 3 km² und 10 Minuten). Dabei wurden der Zielauflösung entsprechend die Charakteristiken der Erdoberfläche (Orographie und Rauigkeit) mit entsprechender Auflösung berücksichtigt.

Vorgehen

Das WRF-Modell ist ein „state of the art“-Wettervorhersagesystem (gekoppeltes Atmosphären-Landoberflächen Modell) und ist im Bereich der Wetter- und Klimaforschung **eines der am häufigsten und besten validierten Wettermodelle.**

In den letzten Jahren hat sich das WRF-Modell zu dem führenden Mesoskala-Modell in der Windbranche etabliert und wird in einem breiten Spektrum für die verschiedensten Aufgabengebiete angewendet.

Die Windgeschwindigkeitszeitreihen, die mit dem WRF-Modell auf dem 3 km Raster berechnet wurden, werden in dem nächsten Schritt auf das Zielraster von 10 Meter verfeinert. Zusätzlich wird in diesem Schritt das Windgeschwindigkeitsfeld optimiert. Der Optimierungsprozess wird zwischen der deutschlandweiten und der regionalen Anpassung für Bayern unterschieden.

Die deutschlandweite Anpassung besteht aus dem Remodelling Verfahren basierend auf homogen verteilten Windmessungen in Deutschland. In dem Remodelling Verfahren werden mithilfe dieser Windmessungen gültige Skalierungsfaktoren für ganz Deutschland entwickelt, die systematische Fehler in Deutschland minimieren sollen. Insofern wird unter anderem der Bias der mittleren Windgeschwindigkeit, der Jahresgang und das Vertikalprofil korrigiert.

Die folgenden speziell für den Bayerischen Windatlas entwickelten Optimierungsschritte führen zu einer weiteren signifikanten Verbesserung:

Kopplung mit Meteodyn Universe (CFD-Solver)

Im Rahmen des Remodelling-Verfahrens wurde eine standortspezifische Geländehöhen- und Rauigkeitskorrektur mithilfe von CFD Simulationen an verschiedenen, komplexen Messstandorten entwickelt.

Hierfür wurde das Modell Meteodyn Universe 1.4.1 verwendet. Anschließend konnte der Bayerische Windatlas mithilfe der empirischen Geländehöhen- und Rauigkeitskorrektur und den bestmöglichen DGM Datensätzen auf ein 10 x 10 m² Raster skaliert werden. Die Korrekturfunktion wurde beim Auslesen der Zeitreihen der Windgeschwindigkeit auf jeden Zeitschritt angewendet.

Verwendete Daten

Für die Validierung und Anpassung des Bayerischen Windatlas wurden unterschiedliche Datensätze verwendet. Zum einen wurden Windmessungen von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die zur Validierung und Optimierung der Winddaten auf 10 m Höhe über Grund dienen.

Zum anderen wurden 10-min Zeitreihen aus Windmessungen (Mast, LiDAR und SoDAR), langjährige Windinformationen aus Projektprüfungen (Due Diligence), monatliche Betriebsdaten von WEA aus der Betreiberdatenbasis (BDB) sowie 10-min Zeitreihen aus Betriebsdaten von WEA (SCADA-Daten) für die Verifizierung und Optimierung des Windes zwischen 100 m und 200 m Höhe über Grund verwendet. Dabei standen von verschiedenen Standorten interne und externe Datensätze zur Verfügung.

Intern lagen zwölf Mast- und LiDAR-Messungen, fünf Due Diligence, 25 Ertragsdatensätze des BDB sowie SCADA-Daten von 15 WEA von vier Standorten vor. Um eine größere Datengrundlage und damit eine genauere Verifizierung zu erlangen, wurden externe Daten angefragt.

Zum einen wurden für die Winddaten auf 10 m Höhe über Grund 29 der 56 in Bayern zur Verfügung stehenden DWD-Stationen verwendet. Diese wurden anhand von Qualitätsmerkmalen wie Messhöhe, Messgerätewechsel sowie Verschattungen, beispielsweise durch Häuser, Bäume und Sträucher, ausgewählt. Somit werden weitere Quellen für Ungenauigkeiten bei der Analyse vermieden sowie die Homogenität der Zeitreihe gewährleistet. Zum anderen wurden drei weitere Messungen, darunter eine Mast-, eine LiDAR- und eine SoDAR-Messung zur Verfügung gestellt sowie SCADA-Daten von 24 WEA von 10 weiteren Standorten.

Im Anschluss an die Optimierung und Verifikation des Bayerischen Windatlas wurden die verschiedenen Windkenngrößen für Bayern berechnet. Die mittlere Turbulenzintensität wird aus den Modelldaten abgeleitet. Auf Basis der Windgeschwindigkeitszeitreihen werden die Höhenschnitte der gekappten mittleren Windleistungsdichte berechnet.

Die Kappungsgrenze wurde auch hier auf 15 m/s festgelegt.

Eine weitere Kenngröße, die berücksichtigt wird, ist der **Standortertrag**.

Hierfür wurde eine fiktive **5 MW WEA** mit entsprechender Leistungskennlinie gewählt. Anschließend folgen die Berechnungen der Ertragszeitreihen mittels der Leistungskennlinie sowie Wind- und Luftdichtezeitreihen und final die Berechnung des Standortertrages für die sechs Höhenschnitte. Des Weiteren wird mittels des Referenzertrages und des Standortertrages die **Standortgüte** berechnet.

2) Auszüge aus dem Endbericht Windatlas Baden-Württemberg 2019

2 Vorgehensweise

Die Simulation der Windverhältnisse in komplexen Geländesituationen, wie sie in Baden-Württemberg großflächig gegeben sind, stellt erhebliche Anforderungen an das verwendete Modellsystem. Großskalige Einflüsse auf das Windsystem, wie sie beispielsweise durch die Windleitwirkung großer Flusstäler oder durch Fallwinde hinter Gebirgszügen entstehen, müssen ebenso wiedergegeben werden, wie kleinräumige Einflüsse durch Kuppen, Steilhänge, Taleinschnitte etc. Unter Berücksichtigung der Fähigkeiten der derzeit für die Simulation zur Verfügung stehenden Modellklassen ist hierzu nach einhelliger Expertenmeinung [1] aktuell die Kopplung eines mesoskaligen Wetter- bzw. Klimamodells mit einer hochauflösenden CFD-Simulation am besten geeignet. Ein besonderes Augenmerk ist hierbei auf die bereits möglichst gute Auflösung des Mesoskalenmodells sowie die Fähigkeit des eingesetzten CFD-Modells zur Waldmodellierung und zur Simulation verschiedener Schichtungs- und Stabilitätssituationen der Atmosphäre zu legen.

Diesem Ansatz folgt die Neuerstellung des Windatlas Baden-Württemberg vollumfänglich. Anhand einer umfassenden Analyse von Beobachtungsdaten – dies umfasst sowohl Windmessungen als auch Betriebsdaten von bestehenden Windenergieanlagen – im Simulationsgebiet werden die erzielten Ergebnisse validiert und, falls notwendig, korrigiert. Hierbei wird die durch AL-PRO entwickelte und bei einer Vielzahl von vergleichbaren Windkartierungen eingesetzte Methodik GWS® ALIGN angewendet.

2.1 Datengrundlage

Für den Bereich des Bundeslandes Baden-Württemberg wurden durch die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) eine Vielzahl von Datensätzen zur Geländebeschaffenheit zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden bei der Erstellung weitere, öffentlich zugängliche Datenquellen verwendet. Diese dienen einerseits der Verfeinerung der Informationen innerhalb der Grenzen des Bundeslandes. Weiterhin ist das gesamte, **für die Simulationen verwendete Modellgebiet deutlich größer als das Bundesland selbst**, so dass auch für die Bereiche außerhalb des Bundeslandes entsprechende Informationen benötigt werden.

2.2 Modellierung

2.2.1 Mesoskala

Bei Mesoskalenmodellen handelt es sich um komplette atmosphärische Wettermodelle, die beispielsweise zur Wettervorhersage eingesetzt werden. Im Bereich der Windfeldermittlung sind Mesoskalensimulationen bestens dazu geeignet, um regionale Windsysteme wie beispielsweise den Föhn oder Mistral abzubilden. Die komplexen großräumigen Strömungsverhältnisse des Windes können mit Mesoskalensimulationen auch in Gebieten mit angemessener Genauigkeit abgebildet werden, für die es wenige oder gar keine Windmessungen gibt. Als Antrieb für die Simulationen wird dabei auf Reanalysedaten führender internationaler meteorologischer Institute zurückgegriffen. Diese werden dann auf Rasterzellengrößen, die für die Ermittlung der regionalen Windverhältnisse notwendig sind (typischerweise wenige Kilometer), verfeinert.

2.2.2.2 Software Meteodyn WT

Meteodyn WT [14] ist eine Software, die die Ermittlung der Windverhältnisse auf Basis von CFD (Computational Fluid Dynamics) durchführt. Hier werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen gelöst.

Meteodyn WT verfügt gegenüber anderen, am Markt angebotenen CFD-Systemen insbesondere über die folgenden Vorteile, die es zum Einsatz für die Neuerstellung des Windatlas Baden-Württemberg qualifizieren:

- Hocheffizienter CFD-Solver: Nur mit der Fähigkeit des in WT verwendeten, exklusiv im Besitz von Meteodyn befindlichen Systems zur Lösung der Strömungsgleichungen, war die Simulation eines so großen Gebiets wie Baden-Württemberg in der Auflösung von 30 m innerhalb des zur Verfügung stehenden Zeitrahmens überhaupt denkbar. Das System bietet die Möglichkeit zu einer sehr weitgehenden Parallelisierung der durchzuführenden Simulationen – und zwar, ohne dass es innerhalb des Modellgebiets zu Diskontinuitäten kommt (sog. Kachelproblematik).
- Feinste Auflösung des Vertikalgitters: Nicht nur der Modellauflösung in der Horizontalen, sondern insbesondere auch der Auflösung in der Vertikalen, also der Anzahl von vertikalen Modellschichten, vor allem im untersten Modellbereich, kommt bei einer CFD-Berechnung besondere Bedeutung zu. Sie entscheidet über die Genauigkeit der Simulation des Übergangs vom Modellboden in die atmosphärische Grenzschicht, also die simulierten Windprofile. Ebenso ist sie mitentscheidend für die Genauigkeit einer Waldmodellierung. Der von meteodyn WT verwendete CFD-Solver führt auch bei Vertikalauflösungen von wenigen Metern noch zu stabilen Lösungen.
- Präzise Waldmodellierung: Im Modellgebiet befindliche Waldgebiete werden detailliert in die Simulation einbezogen. Hierbei wird Wald sowohl hinsichtlich seiner Höhe als auch seiner Dichte, exakt modelliert und in seinen Auswirkungen auf das Windangebot auch in größerer Höhe berechnet.
- Atmosphärische Stabilität: Unterschiedliche atmosphärische Schichtungsverhältnisse können einen erheblichen Einfluss auch auf die kleinräumigen Windverhältnisse haben. Im Gegensatz zu vielen anderen CFD-Lösungen, bei denen lediglich die neutral geschichtete Atmosphäre berechnet werden kann, wird dieser Aspekt bei Meteodyn WT detailliert in die Simulationen einbezogen – es können bis zu 10 verschiedene Stabilitätsklassen berechnet werden.

Die Auszüge im vorliegenden Dokument sind direkt aus den Windatlanten übernommen. Wir verweisen auf die amtlichen Originalausgaben für sämtliche Angaben.