



Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Dokumentation

über den anemos Windatlas

für Deutschland 1 km ERA5

Stand: 10.02.2026, Rev.1

anemos
Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH
Böhmsholzer Weg 3, D-21391 Reppenstedt
Tel.: 04131-8308-100
www.anemos.de | kontakt@anemos.de



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-17580-01-00

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung.....	3
2. Das WRF-Modell.....	4
3. Eingangsdaten	5
4. Optimierung der Modelleinstellungen	6
5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling.....	6
6. Optimierung der Windgeschwindigkeit (Remodelling)	6
7. Standortspezifische Zeitreihen der Windgeschwindigkeit.....	7
8. Verifikation nach dem Remodelling	8
9. Optimierung der Windrichtung	9
10. Verifizierung mit Ertragsdaten.....	9
11. Anwendungsbereiche.....	12
12. Literatur	13
13. Anhang.....	14

1. Einleitung

Der **anemos Windatlas** für Deutschland 1 km ERA5 (**D-1km.E5**) stellt eine langjährige Zeitreihen-Datenbasis der atmosphärischen Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Turbulenzintensität, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Feuchte, Luftdichte, Niederschlag, lang- und kurzweiliger Einstrahlung dar. Die zeitliche Auflösung des Windatlas beträgt 10 Minuten und deckt mit einer räumlichen Auflösung von 1.35 x 1.35 km² das gesamte Gebiet Deutschlands sowie große Gebiete der Nord- und Ostsee ab. Die Entwicklung des anemos Windatlas ist in Abbildung 1 als Prozesskette dargestellt. Dabei gibt es drei wesentliche Punkte:

- Optimierung der Eingangsdaten und Modelleinstellungen (Downscaling → dynamisches Nesting)
- Remodelling des Windatlas zur Korrektur der WRF-Rohdaten
- Umfassende Verifikation anhand von Windmessungen

Genauere Erläuterungen dieser drei Punkte aus Abb. 1 befinden sich in den Abschnitten 4 - 9.

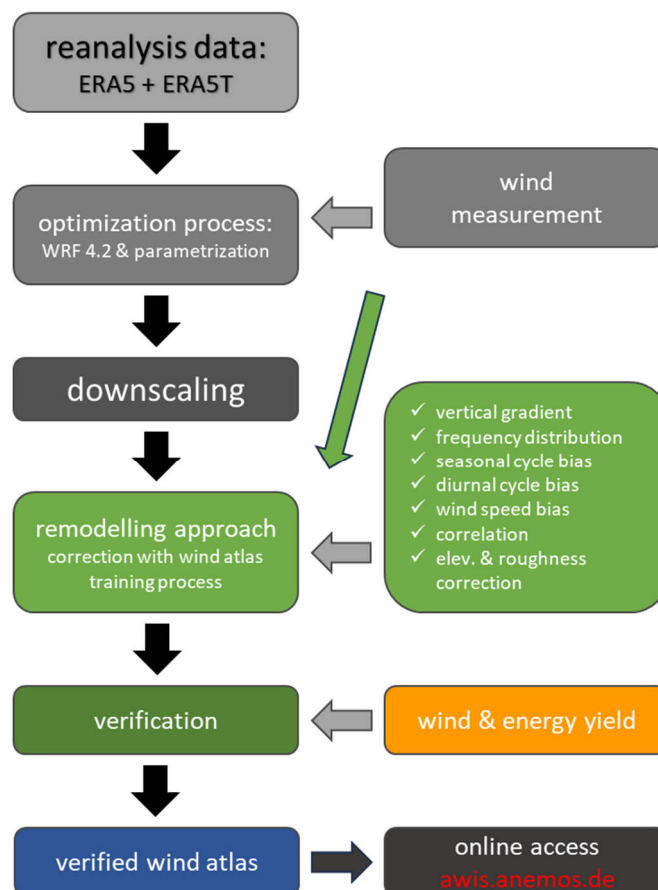


Abb. 1: Entwicklungsschritte des anemos Windatlas Deutschland 1 km.

2. Das WRF-Modell

Der **D-1km.E5** wurde mit dem mesoskaligen numerischen Wettervorhersagemodell **WRF** (**Weather Research & Forecasting Model** mit der Version 4.2) simuliert. Das WRF-Modell ist ein *State-of-the-Art* Wettervorhersagesystem (gekoppeltes Atmosphären-Landoberflächen-Modell) der nächsten Generation und wurde in den 1990er-Jahren am **NCAR** (**National Center for Atmospheric Research**) mitentwickelt.

WRF arbeitet nicht-hydrostatisch (explizite Berechnung der Vertikalwindgeschwindigkeit) und berechnet für jeden Zeitschritt die Navier-Stokes-Gleichungen, welche die atmosphärische Strömung beschreiben. Mesoskalige Prozesse, wie zum Beispiel Land-See-Windssysteme oder hochreichende Konvektion (Gewitterzellen), können durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung (10 min, 1.35 km) vom Modell adäquat aufgelöst werden. Für mikrophysikalische Prozesse sowie flache Konvektion, Strahlung oder Grenzschichtprozesse werden Parametrisierungen verwendet. Das WRF-Modell erlaubt durch seine Fähigkeit zum multiplen Nesting eine simultane Berechnung mehrerer Modell-Domänen mit unterschiedlichen Gitterauflösungen (Abb. 2). Mit dem multiplen Nesting-Verfahren sind regional hochaufgelöste Simulationen der atmosphärischen Zirkulation möglich, die unter Verwendung von detaillierten Bodeninformationen den Einfluss von Vegetation, Rauigkeit und Orographie berücksichtigen.

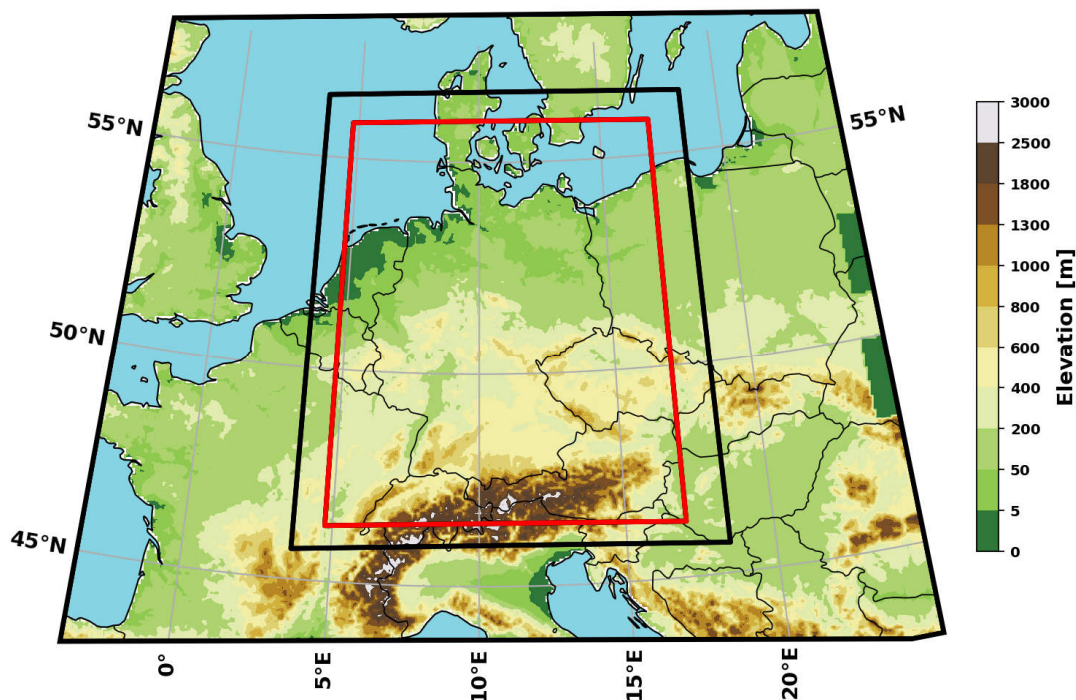


Abb. 2: Multiples Nesting-Verfahren mit zwei Domains des anemos Windatlas Deutschland 1 km. Domain 1 mit $20.25 \times 20.25 \text{ km}^2$, Domain 2 (Nest) mit $6.75 \times 6.75 \text{ km}^2$ und Domain 3 (Nest - rot) mit $1.35 \times 1.35 \text{ km}^2$.

Für den **D-1km.E5** wird ein Nest mit drei Domains verwendet (siehe Abb. 2). Das Simulationsgebiet besteht aus einer äußeren Domain, in welche zwei hochaufgelöste Domains ineinander genestet sind. Die äußere Domain deckt weite Teile Zentraleuropas ab und besitzt eine räumliche Auflösung von $20.25 \times 20.25 \text{ km}^2$.

Die mittlere Domain mit einer räumlichen Auflösung von $6.75 \times 6.75 \text{ km}^2$ dient ausschließlich der Stabilität des Modells. In diese Domain ist die feiner aufgelöste Deutschland-Domain (d03) genestet, welche eine räumlichen Auflösung von $1.35 \times 1.35 \text{ km}^2$ hat. Während der Simulation kommunizieren die drei Domains miteinander. Die jeweils äußere Domain stellt die Randwerte für die jeweilige innere Domain bereit, während letztere die äußeren Domains mit den höher aufgelösten Kalkulationen versorgt.

Während der Simulation werden stündlich neue Eingangsdaten der ERA5-Reanalyse in das WRF-Modell assimiliert, welche das Modell in die richtige Richtung forcieren (Nudging-Verfahren). Die atmosphärischen Zustandsvariablen werden im Modell in 10-Minuten-Schritten für jeden Gitterpunkt ausgegeben. Die Simulation wird seit 1999 kontinuierlich fortgeführt. Die vertikale Modellstruktur der Atmosphäre ist mit 50 Höhen-Schichten sehr hoch aufgelöst. Allein in den besonders für Windenergieanlagen relevanten unteren 300 m liegen 14 der 50 Vertikal-Level.

3. Eingangsdaten

Als Antriebsdaten des WRF-Modells werden sowohl Bodendaten (u. a. Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Schnee) als auch alle wichtigen atmosphärischen Parameter (u. a. Wind, Temperatur, Druck, relative Feuchte) benötigt. Für den **D-1km.E5** werden die global verfügbaren ERA5-Reanalysedaten als atmosphärische Antriebs- und Eingangsdaten verwendet. Die ERA5-Reanalysedaten sind im Vergleich zu den vorherigen ERA-Interim-Reanalysedaten hinsichtlich Konsistenz und Korrelation qualitativ verbessert.

Damit werden die Vorteile der ERA5-Reanalysedaten wie Konsistenz, Homogenität, Länge der Zeitreihe, ständige Aktualisierung, Verfügbarkeit über Land und Meer durch die Simulation mit dem WRF-Modell erhalten bzw. verstärkt. Auf der anderen Seite werden mit dem D-1km.E5 die Nachteile der ERA5-Reanalysedaten wie die relativ geringe räumliche (ca. $30 \times 30 \text{ km}^2$) und zeitliche Auflösung (1 h) deutlich verbessert. Die ERA5-Reanalysedaten werden ebenfalls für die Bodendaten verwendet. Dies gewährleistet eine Konsistenz der Strahlungs- und Wärmeflüsse zwischen Boden und Atmosphäre. Die Bodendaten liegen in vier vertikalen Bodenschichten vor und beinhalten u. a. Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Schnee.

Die Geländehöhen sind dem **SRTM**-Datensatz (**S**huttle **R**adar **T**opography **M**ission, USGS EROS Data Center) entnommen und dem Modellgitter entsprechend interpoliert. Die Daten stammen aus dem Jahre 2000 und stehen in einer horizontalen Auflösung von ca. 90 m zur Verfügung. Die vertikale Auflösung beträgt 1 m. Alle Informationen über die Vegetation und Rauigkeiten innerhalb des Simulationsgebietes liefert der **CORINE** Datensatz der Europäischen Umweltagentur **EEA** (**E**uropean **E**nvironment **A**gency). Diese Informationen basieren auf den Daten des Landsat-7-Satelliten im Maßstab 1:100.000. Die Daten stehen auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 100 m zur Verfügung.

4. Optimierung der Modelleinstellungen

Vor der eigentlichen Hauptsimulation wurden die Modelleinstellungen und Parametrisierungen (wie u. a. Grenzschicht-, Boden- und Strahlungsschema) getestet und für die relevanten atmosphärischen Parameter (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) optimiert. Die Modelleinstellungen wurden mit dem Windatlas für Deutschland (D-3km.E5) verglichen sowie mit Windmessungen (Messmasten und LiDAR) verifiziert. Durch diese Testphase wird deutlich, wie das bodennahe Windfeld auf unterschiedliche Parametrisierungen und Schemata reagiert (Sensitivitätstests). Die den Beobachtungen am nächsten kommende Einstellung wird für die Simulation des D-1km.E5 verwendet. Grundlage hierfür ist die Grenzschichtparametrisierung MYNN in 2.5-Ordnung, die in der verwendeten WRF-Version 4.2 implementiert ist und eine Ableitung der Turbulenzintensität (TI) aus der prognostizierten turbulenten kinetischen Energie (TKE) ermöglicht.

5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling

Die wichtigste Aufgabe nach der Durchführung der Hauptsimulation ist die umfassende Verifikation anhand zahlreicher Windmessungen. Für die Verifikation des **D-1km.E5** wurden 104 Messungen verwendet.

Zum einen liefert die Verifikation die Prognosegüte und Qualität der Hauptsimulation, zum anderen werden systematische Fehler im letzten Schritt, dem *Remodelling* (Abschnitt 6), behoben und die Qualität des Atlas' wird verbessert. Verifiziert werden statistische Kenngrößen wie Mittelwert, Bestimmtheitsmaß (R^2) bzw. Korrelation (R), Bias, RMSE und Extremwerte (QQ-Verteilung). Außerdem werden Vertikalprofile, Tages- und Jahresgänge, Windrosen, Häufigkeitsverteilungen mit Weibull-Parametern überprüft.

6. Optimierung der Windgeschwindigkeit (Remodelling)

Nach der vollständigen Verifikation der Hauptsimulation mit allen verfügbaren Windmessungen wird der Windatlas im vorletzten Schritt der Prozesskette durch das Remodelling optimiert. Zunächst werden mit den verfügbaren Windmessungen auf sieben Stützhöhen jeweils Korrekturfaktoren für den Tages- und Jahresgang entwickelt. Die Modelldaten werden durch Anpassung einer kumulativen Gumbel-Verteilung höhenabhängig im Tages- und Jahresgang korrigiert. Die Gumbel-Verteilung ist eine Extremwertverteilung, die häufig zur Modellierung von Maxima oder Minima in meteorologischen und hydrologischen Datensätzen eingesetzt wird. Im Folgenden wird anhand der Abweichungen und deren Abhängigkeiten bei der Verifikation aus Abschnitt 5, mit 45 Windmessungen ein sektorielles Training durchgeführt. Die verbleibenden Windmessungen werden für die anschließende unabhängige Verifikation des Remodelling-Verfahrens benötigt.

Durch das Training werden Skalierungsparameter mithilfe einer multiplen linearen Regressionsanalyse bestimmt, welche anschließend auf die Windatlas-Zeitreihen angewendet werden. Es wird nach Abhängigkeiten der Skalierungsparameter von der Subgrid-Information (Orographie, Rauigkeit, etc.) gesucht und bei ausreichender Signifikanz verwendet. Infolgedessen können durch die im Training entwickelten Skalierungsparameter alle Gitterzellen mithilfe der Subgrid-Informationen korrigiert werden. Letztendlich verbessert das Remodelling die statistischen Kenngrößen sowie die Häufigkeitsverteilung mit Weibull-Parameter und das Vertikalprofil. Zudem wurde der Optimierungsalgorithmus des Remodelling weiterentwickelt und der Trainingsdatensatz um neuere, deutschlandweit annähernd homogen verteilte Windmessungen ergänzt.

Es wurde eine höhenabhängige Tages- und Jahresgangkorrektur durchgeführt, um den systematische Bias im Tages- bzw. Jahresgang korrigiert, der bereits in den Reanalysedaten vorhanden ist. Zusätzlich erfolgte eine Rauigkeitskorrektur.

7. Standortspezifische Zeitreihen der Windgeschwindigkeit

Im Rahmen des Remodelling-Verfahrens wurde eine standortspezifische Höhen- und Rauigkeitskorrektur mithilfe von CFD-Simulationen an verschiedenen, komplexen Messstandorten entwickelt. Mit dem CFD-Modell Meteodyn werden die 1.35 x 1.35 km² Windatlaszeitreihen der Teststandorte hochaufgelöst modelliert. Mithilfe der empirischen Höhenkorrektur und den bestmöglichen, frei verfügbaren DGM-Datensätzen für die Bundesländer in Deutschland, wird der Windatlas auf ein 1 x 1 m²-Gitter skaliert. Die für die Bundesländer verwendeten DGMs sind in Abb. 3 dargestellt.

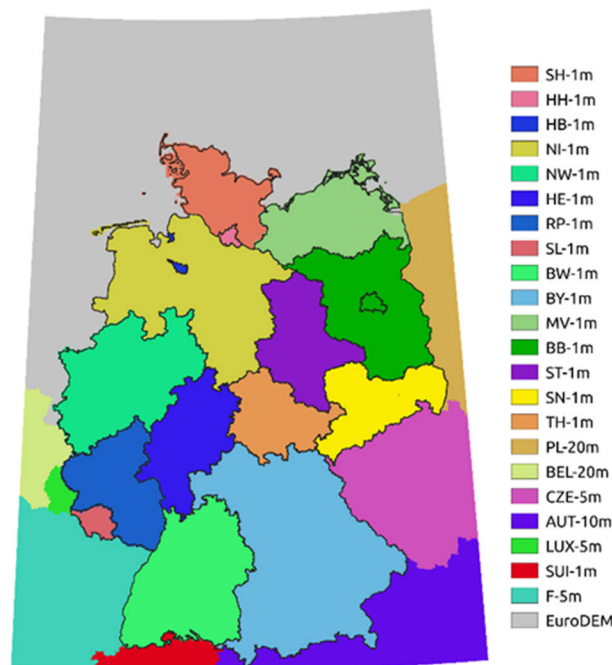


Abb. 3: Darstellung der verwendeten DGMs für die Bundesländer.

Die Höhen- und Rauigkeitskorrektur ist Teil des Remodelling-Prozesses und berücksichtigt Unterschiede zwischen Atlaszelle und Messung. Ergänzend dazu sorgt die standortspezifische Topographiekorrektur - insbesondere in komplexen Regionen - für eine deutliche Verbesserung der mittleren Windgeschwindigkeit. Im flachen Gelände hat die Höhenkorrektur keinen Einfluss, während die Rauigkeitskorrektur bei komplexen Vegetationsänderungen in den unteren Höhen-Leveln, einen signifikanten Beitrag leistet. Die Korrekturfunktion wird beim Auslesen von Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für jeden Zeitschritt angewendet.

8. Verifikation nach dem Remodelling

Durch das standortspezifische Remodelling entsteht ein Datensatz, der somit eine verlässliche Grundlage für weitere Analysen bietet. Hierzu wurde in Abb. 4 ein Vergleich von unabhängigen Messungen zwischen dem anemos-D-1km.E5 und den gängigen Mesoskala-Datensätzen NEWA¹ und EMD-WRF Europe+² durchgeführt. Die Boxen stellen das 25 % - 75%-Quartil - d.h. die mittleren 50% der Daten - und die Whisker (Ausreißerbegrenzung) das Minimum bzw. Maximum dar. Der Mittelwert ist durch ein Kreuz, der Median durch einen Strich in der Box markiert.

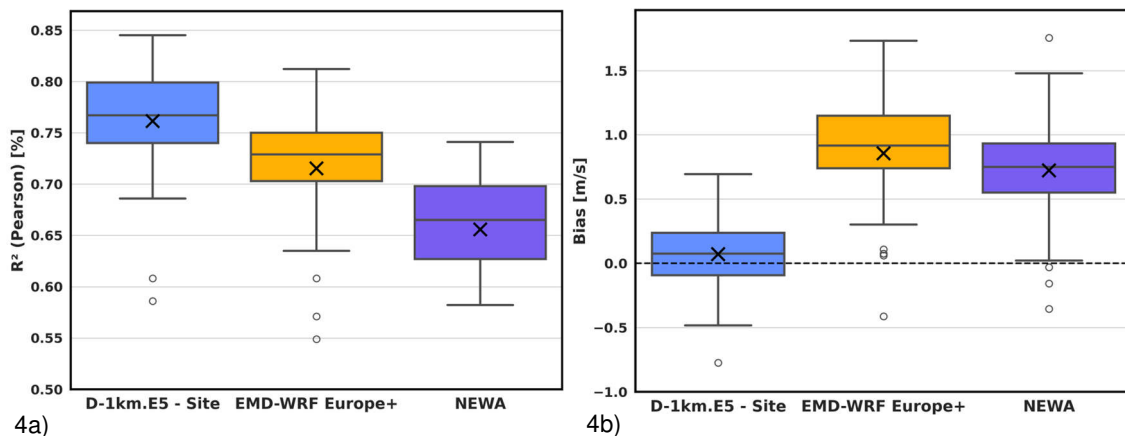


Abb. 4: In Abb. 4a ist das Bestimmtheitsmaß R^2 (quadrierter Pearson-Korrelationskoeffizient) und in Abb. 4b der Bias dargestellt.

Abb. 4a zeigt das Bestimmtheitsmaß R^2 (1-stündige Mittelwerte, 100 m) zwischen 57 unabhängigen Messungen und den Datensätzen D-1km.E5, EMD-WRF Europe+ und NEWA. Das Mittel liegt beim D-1km.E5 bei 0.76, während EMD 0.72 und NEWA 0.66 erreichen. Damit erzielt der D-1km.E5 im Mittel rund 10 Prozentpunkte höhere R^2 -Werte als NEWA und etwa 4 Prozentpunkte mehr als EMD.

Abb. 4b zeigt den Bias in m/s (1h-Mittelwerte, 100 m) der Datensätze D-1km.E5, EMD-WRF Europe+ und NEWA im Vergleich zu den unabhängigen Messungen. Der D-1km.E5 weist mit

¹ NEWA (New European Wind Atlas), developed as part of the ERANET+ project, final report: 2019_08_19_NEWA_D4_4_final

² EMD-WRF-Europe+; EMD International A/S, developed as part of the windPROSPER project

einem Mittel von 0.07 ± 0.26 m/s den geringsten Bias auf und liegt damit sehr nahe bei null. EMD-WRF zeigt mit einem Bias von 0.85 ± 0.64 m/s eine deutliche systematische Überschätzung. Auch NEWA überschätzt die Windgeschwindigkeit im Mittel um 0.72 ± 0.40 m/s.

9. Optimierung der Windrichtung

Um systematische Abweichungen zu quantifizieren, wurden die Zeitreihen der Windrichtung des D-1km.E5 zunächst anhand von Mastmessungen validiert. Für die Analyse kamen zirkuläre statistische Kenngrößen zum Einsatz.

Die Auswertung ergab für den D-1km.E5 einen konsistenten positiven systematischen Fehler von ca. $+6.6^\circ$ (Drehung im Uhrzeigersinn). Dieser Bias zeigt eine deutliche Höhenabhängigkeit und nimmt zwischen 60 m und 240 m sukzessive ab. Aus den Bias-Werten der Messhöhen wurde eine lineare höhenabhängige Korrektur entwickelt und auf die Zeitreihe der Windrichtung angewendet.

10. Verifizierung mit Ertragsdaten

In diesem Kapitel werden die standortspezifischen Zeitreihen der Windgeschwindigkeit des D-1km.E5 mittels entsprechender Leistungskennlinien und einer zeitlich abhängigen Luftdichtekorrektur in Ertragszeitreihen umgerechnet. Zusätzlich wird über das Jensen Wake-Modell der Abschattungseffekt aller umliegenden WEA eines Windparks berücksichtigt und zeitreihenscharf berechnet. Dieser Schritt ist notwendig, um eine Verifikation mit den Ertragszeitreihen der SCADA-Daten (zeitliche Auflösung: 10 min) zu ermöglichen. Die SCADA-Daten jeder einzelnen WEA werden so aufbereitet, dass nur noch signifikante Verluste durch Parkabschattung in den Daten enthalten sind. Demnach können die Windatlas Ertragszeitreihen unter Berücksichtigung von Abschattungseffekten sinnvoll mit SCADA-Daten verglichen werden.

Für die Verifizierung wurden ca. 140 SCADA-Datensätze aus 25 Windparks mit mindestens einem Jahr Datenverfügbarkeit aufbereitet. In Abb. 5 ist die 10min Korrelation zwischen dem D-1km.E5 Ertrag und den SCADA-Daten dargestellt. Insgesamt sind die Korrelationen zwischen den SCADA-Datensätzen und dem anemos Windatlas als gut bis sehr gut einzustufen. Im Mittel über alle Parks liegt die Korrelation bei 83.8% (ohne Wake-Modell) und 82.8% (mit Wake-Modell). Die etwas niedrigere Korrelation nach Anwendung des Wake-Modells ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Wake-Modell die Windrichtung des D-1km.E5 verwendet wird und damit eine weitere Variable mit einer gewissen Unsicherheit in die Berechnung mit eingeht.

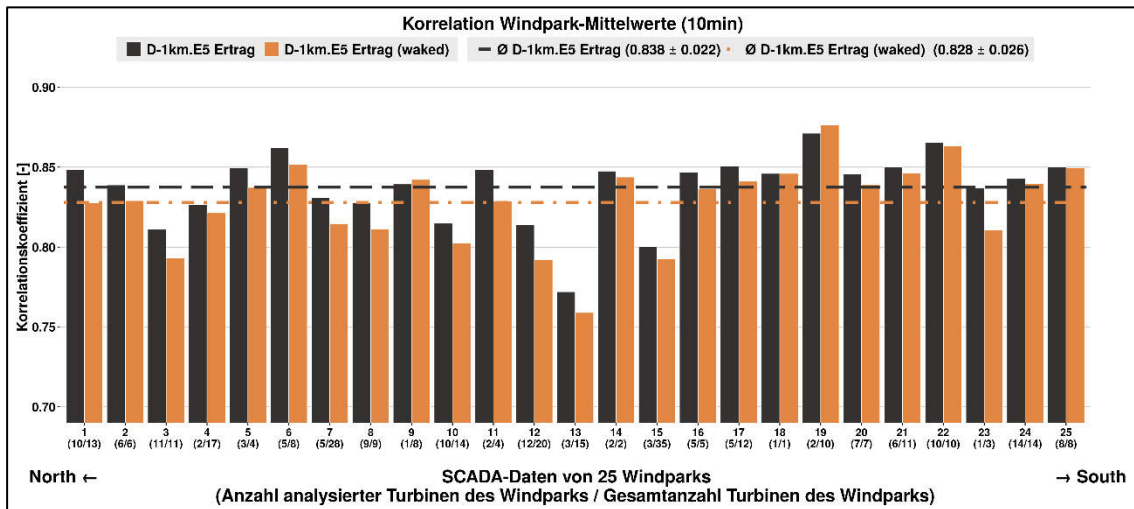


Abb. 5: Mittlere Korrelation (10min) pro Windpark zwischen den Ertragszeitreihen aus dem D-1km.E5 Windatlas (mit/ohne Parkabschattung: schwarz/orange) und den SCADA-Daten von 25 Windparks. Die Ergebnisse sind von Nord nach Süd sortiert und unter den Balken ist die Anzahl der analysierten WEA im Vergleich zur Gesamtzahl der WEA im Windpark angegeben. Die farbigen gestrichelten Linien zeigen die mittleren Korrelationen.

Im Rahmen der Verifizierung der absoluten Ertragswerte wurde eine Korrektur vorgenommen. Die erste Vorverifizierung zeigte, dass die auf Basis des Windatlas berechneten Erträge mit Parkabschattung im Vergleich zu den SCADA-Daten um etwa 9 % überschätzt wurden (vgl. Abb. 6).

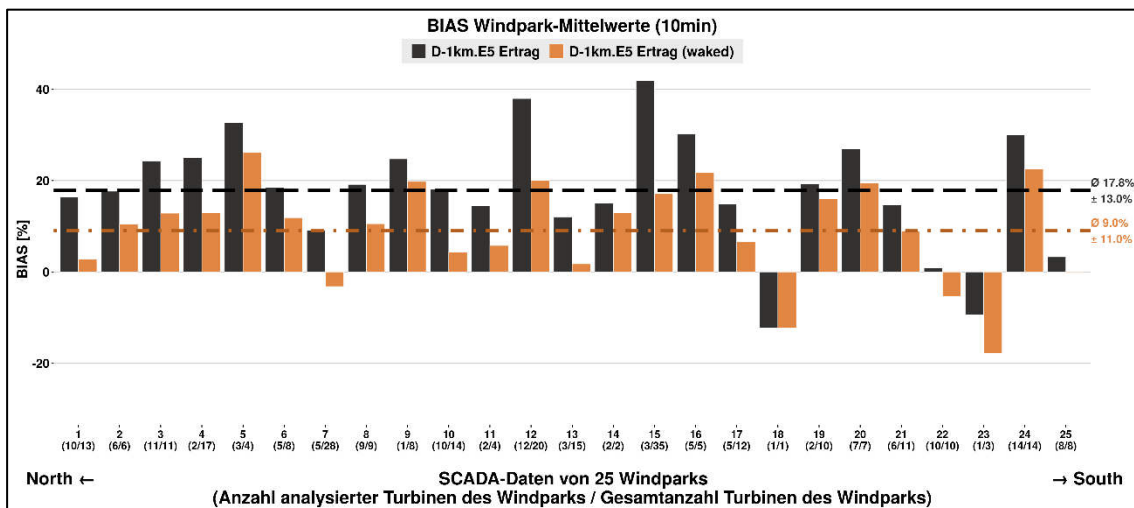


Abb. 6: Mittlerer Bias (10min) pro Windpark zwischen den Ertragszeitreihen aus dem D-1km.E5 Windatlas (mit/ohne Parkabschattung: schwarz/orange) und den SCADA-Daten von 25 Windparks. Die horizontalen Linien zeigen den Mittelwert über alle 25 Parks inklusive der Standardabweichung.

Dieses Ergebnis widerspricht der Verifikation anhand der Windmessungen (Kapitel 8), bei der sich ein mittlerer Bias der Windgeschwindigkeit nahe null ergab. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichung liegt darin, dass Windenergieanlagen die Leistungskennlinie an den meisten Standorten nicht optimal umsetzen können.

Ursachen hierfür sind unter anderem Schräganströmung, Fehlstellungen der Gondel oder erhöhte Turbulenz, deren Problematiken allesamt bei der Vermessung der Leistungskennlinie weitgehend reduziert werden.

Aus diesem Grund wurde ein Anpassungsfaktor entwickelt, um den systematischen Bias im modellierten Ertrag zu korrigieren. Hierzu wurde eine Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) auf Parkebene durchgeführt, bei der jeweils ein vollständiger Windpark aus dem Datensatz entfernt und als unabhängiger Verifikationsdatensatz verwendet wurde, während alle übrigen Windparks die Trainingsdaten bildeten.

Auf Basis der Trainingsdaten wurde ein multiplikativer Skalierungsfaktor bestimmt, der als Verhältnis der aufsummierten SCADA-Erträge zu den aufsummierten modellierten Erträgen berechnet wurde. Der so bestimmte Faktor wurde dann ausschließlich auf den jeweils zurückgehaltenen Windpark angewandt. Durch dieses Vorgehen ist sichergestellt, dass der Anpassungsfaktor stets unabhängig von den Daten des zu evaluierenden Windparks geschätzt wird.

Über alle Cross-Validation-Iterationen hinweg ergab sich ein sehr stabiler Anpassungsfaktor mit einem Median von 0.91 und einer geringen Spannweite von ± 0.01 . Die geringe Streuung der parkweise bestimmten Faktoren deutet darauf hin, dass der Bias weitgehend parkunabhängig ist und durch einen globalen Skalierungsfaktor hinreichend beschrieben werden kann.

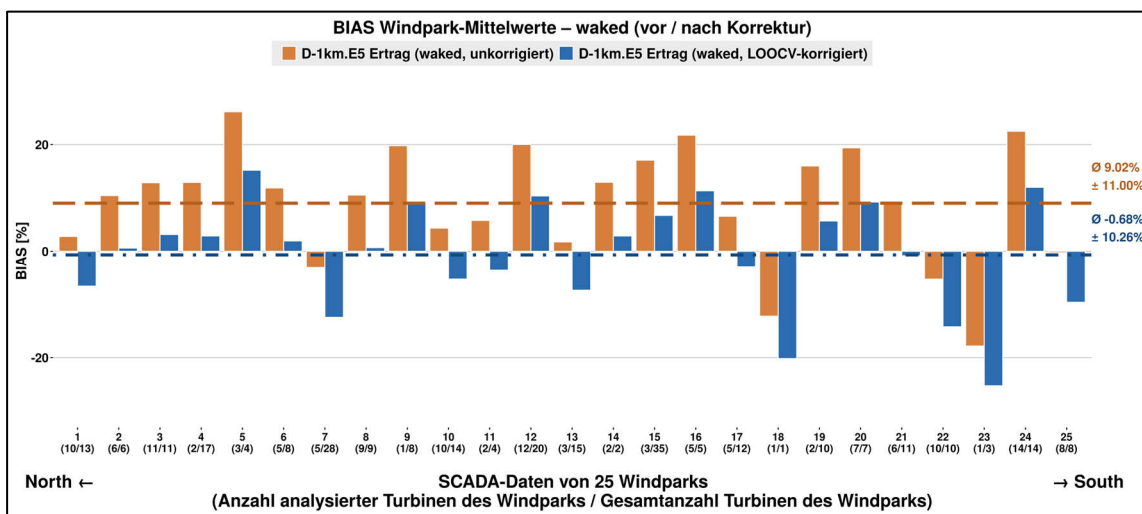


Abb. 7 Bias (in %) der Windpark-Mittelwerte (waked) vor (orange) und nach (blau) der Korrektur mit dem LOOCV-Anpassungsfaktor.

Durch die Anwendung des jeweils parkweise bestimmten Anpassungsfaktors ergibt sich eine deutliche Reduktion des systematischen Bias in den Windatlas *waked*-Erträgen (s. Abb.7). Der mittlere Bias über alle Windparks wird signifikant verringert und liegt nach der Anpassung nahe bei null (-0.7%) mit einer Standardabweichung von 10.3%.

11. Anwendungsbereiche

Durch das standortspezifische Remodelling-Verfahren sowie die umfassende Verifikation mit Messdaten stellt der Windatlas den derzeit leistungsfähigsten Datensatz für Deutschland dar. Die beschriebenen Korrektur- und Validierungsschritte ermöglichen eine deutliche Annäherung an die absoluten Messwerte und erweitern damit den praxisrelevanten Einsatzbereich des Windatlas substantiell. Für u.a. die folgenden Anwendungsbereiche ist der Windatlas inkl. Optimierung geeignet:

- ✓ **Windpotential (Windgeschwindigkeit, Weibull A & k, Leistungsdichte)**
- ✓ **Langzeitbezug (auch unterjährig) mit Windmessungen bzw. Ertragsdaten**
- ✓ **Ertragsberechnungen ohne / mit Verlusten auf 10-min. Basis**
- ✓ **Ertragsindex**
- ✓ **Extremwindberechnungen**
- ✓ **Turbulenzintensitätsberechnungen**
- ✓ **Marktwertanalysen**
- ✓ **Erlösprognosen**
- ✓ **Risiko- / Portfolioanalysen**
- ✓ **SCADA-Daten Analysen**
- ✓ **Rückrechnung nach TR10 (10-min. Reanalysedaten)**

12. Literatur

- Christoffer, J. und M. Ulbricht-Eissing, 1989: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht des DWD, Nr. 147
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate . Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Farr, T. G., et al., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>
- Gelaro, R. et al., 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), AMS, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- Howard, Tom and Clark Peter, 2007: Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts, Meteorol. Appl. 14: 105-116
- Hersbach, H. et al., 2020: The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 146, Issue 730, 1999-2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Keil, M., M. Bock, T. Esch, A. Metz, S. Nieland, A. Pfitzner, 2010: CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland. Abschlussbericht zu den F+E Vorhaben UBA FKZ 3707 12 200 und FKZ 3708 12 200, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Januar 2010
- Mengelkamp, H.-T., J. Geyer, M. Kilian und M. Schneider (2025): Simulation of wind speed and wind turbine yield time series by a meso-micro downscaling approach, Meteorol. Z., online, doi: 10.1127/metz/20242
- Mengelkamp, H.-T., 1988: On the energy output estimation of wind turbines, Int. Journal of Energy Research, 12, 113-123
- Mengelkamp, H.-T., 1999: Wind Climate Simulation over Complex Terrain and Wind Turbine Energy Output Estimation, Theor. Appl. Climatol, 63, 129-139
- Mengelkamp, H.-T., H. Kapitza und U. Pflüger, 1997: Statistical-dynamical downscaling of wind climatologies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, 449-457
- Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva, et al., 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. J. Climate, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
- Schneider, M., A. Glücksmann, Anselm Grötzner und H.-T. Mengelkamp (2022): A wind atlas for Germany and the effect of remodeling, Meteorol. Z., 31, 2, 117-130, doi: 10.1127/metz/2022/1102
- Staffell, Iain and Pfenninger Stefan, 2016: Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy 114, 1224-1239
- Thogersen, M.L. et. al., Measure-Correlate-Predict Methods: Case Studies and Software Implementation, EMD International A/S
- Traup, S. und B. Kruse, 1996: Winddaten für Windenergienutzer, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes
- Troen, I. und E.L. Petersen, 1989: European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde. 656 pp. ISBN 87-550-1482-8
- Wang et al., 2018: User's Guides for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System, Version 4.2, WRF users page, https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.2/WRFUsersGuide_v42.pdf. [Zuletzt aufgerufen am 26.11 November 2025].
- Weiter, A., M. Schneider, D. Peltret und H.-T. Mengelkamp: Electricity production by wind turbines as a means for the verification of wind simulations. Meteorol. Z. doi: 10.1127/metz/2019/0924

13. Anhang

Tab. 1: Lizenzen DGM

Name Digitales Geländemodell (DGM)		Version	Link	Lizenz
Euro DEM	Pan-European Height Dataset at Medium Scale	EuroDEM 2023	https://www.mapsforeurope.org/datasets/euro-dem	https://ome-download-data.s3.eu-west-1.amazonaws.com/euro-dem/documents/EuroDEM_2023_Attribution_Statement.pdf
SH-1	Schleswig-Holstein DGM 1	aktuellste Version	https://geodaten.schleswig-holstein.de/gaialight-sh/_apps/dl/download/dl-dgm1.html	https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0
HH-1m	Hamburg DGM 1	16.03.2016	http://suche.transparenz.hamburg.de/dataset/digitales-hoehenmodell-hamburg-dgm-11	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
HB-1m	Bremen DGM 1	01.01.2017	https://www.geo.bremen.de/produkte/3d-produkte/hoehenmodelle-12482	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
NI-1m	Niedersachsen DGM 1	2017-02-16	https://www.lgin.niedersachsen.de/startseite/geodaten_karten/3d_geobasisdaten/dgm/digitale-gelaendemodelle-dgm-143150.html	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
NW-1m	DGM NW Gitterweite 1m (NRW)	Erfassung im 5-Jahresturnus	https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/gelaendemodel/index.html	https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0
HE-1m	Hessen DGM 1	14.11.2022	https://hvb.g.hessen.de/landesvermessung/geotopographie/3d-daten/digitale-gelaendemodelle	https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0
RP-1m	Rheinland-Pfalz DGM 1	aktuellste Version	https://geoshop.rlp.de/pendata-dgm1.html	https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0
SL-1m	Saarland DGM 1	2024-12-06	https://www.saarland.de/lvg/DE/themen-aufgaben/themen/geotopographie/digitale-gelaendemodelle	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
BW-1m	Baden-Württemberg DGM 1	aktuellste Version	https://www.lgl-bw.de/Produkte/3D-Produkte/Digitale-Gelaendemodelle/	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
BY-1m	DGM 1 m Gitterweite Bayern	24.01.2023	https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpnDataDetail.html?pn=dgm1	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de CC BY 4.0
MV-1m	Mecklenburg-Vorpommern DGM 1	aktuellste Version	https://www.laiv-mv.de/Geoinformation/Geobasisdaten/Gelaendemodelle/	https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0
BB-1m	DGM Brandenburg + Berlin	02.06.2016 00:00:00	https://geobasis-bb.de/lgb/de/geodaten/3d-produkte/gelaendemodel/	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
ST-1m	DGM Sachsen-Anhalt	aktuellste Version	https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/dgm_dom-lsa.html	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
SN-1m	DGM Freistaat Sachsen	aktuellste Version	https://geoportal.sachsen.de/cps/metadaten_portal.html?id=a3dba5b2-0118-4d76-ab78-ba656a1b489e	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
TH-1m	dgm_2010-2013 Thüringen	2010-2013	https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Th%C3%BCringen/Download-H%C3%B6hendaten	https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0
PL-20m	Poland DGM 20	aktuellste Version	https://www.gov.pl/web/guest/en/data	https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl/
LUX-5m	BD-L-MNT5	aktuellste Version	https://data.public.lu/en/datasets/bd-l-mnt5/	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/
F-5m	Géoservices IGN BD Ortho 5m	aktuellste Version	https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html#bd-ortho-5-m	https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-openlicence https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT00034502557?r=W1qRRzOFD6
AUT-10m	DGM 10 m	aktuellste Version	http://www.geoland.at	CC-BY-4.0
SUI-1m	DGM 1m	aktuellste Version	https://www.swisstopo.admin.ch	https://www.swisstopo.admin.ch/de/home/meta/konditionen/geodaten/ogd.html
CZE-5m	DGM 5m	aktuellste Version	https://geoportal.cuzk.cz	Creative Commons CC BY 4.0 License
BEL-20m	DGM 20m	aktuellste Version	https://www.ngi.be/website/aanbod/digitale-geodata/digitaal-terrein-model/	https://ac.ngi.be/client-open/Vx8ipxaujj2vi5InvuBr?language=de&openpath=ngi-standard-open%2FVectordata%2FDTM%2FDTM20%2FDTM20_VL_ascii_L08.txt&tab=dataaccess&auth=false&open=true&accesscode=Vx8ipxaujj2vi5InvuBr