

HEINZ-THEO MENGELKAMP, JOACHIM GEYER, MARTIN SCHNEIDER, JANNIK HÜLS

Synthetische Wetterdaten für Ausbreitungsrechnungen – standortgenau, verifiziert und mit hoher Auflösung



Dr. Heinz-Theo Mengelkamp
anemos Gesellschaft
für Umweltmeteorologie mbH,
Reppenstedt



Joachim Geyer
anemos Gesellschaft
für Umweltmeteorologie mbH,
Reppenstedt

Die meteorologischen Eingangsdaten für Ausbreitungsrechnungen z. B. mit dem Ausbreitungsmodell AUSTAL bestehen aus einer Jahreszeitreihe von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzzustand der Atmosphäre. Dabei wird der Turbulenzzustand durch die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier oder die Monin-Obukhov-Länge beschrieben. Gemäß TA Luft 2021 sollen Daten einer Wetterstation und synthetische Daten mit Nachweis der Repräsentativität verwendet werden. Die Problematik der Daten von Wetterstationen ist hinlänglich bekannt (Lindenberg et al., 2012). Ausbreitungsklassen nach Klug-Manier beschreiben den Turbulenzzustand nur ungenau und die Repräsentativität der Winddaten kann auch durch eine Übertragbarkeitsprüfung oftmals nicht gewährleistet werden. Der anemos Windatlas für Deutschland bietet synthetische Daten, die konsistent über mehr als zwei Dekaden, verifiziert und standortspezifisch sind. Der Windatlas wurde mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWI), des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) vertreten durch das Umweltbundesamt (UBA) und mit Mitteln des Landes Niedersachsen (N-Bank) entwickelt. Vorteile der synthetischen Daten:

- Die Windatlas-Zeitreihen umfassen u. a. die Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Monin-Obukhov-Länge mit einer zeitlichen Auflösung von zehn Minuten. Eine Umrechnung in Ausbreitungsklassen ist möglich, aber für Rechnungen mit AUSTAL nicht zwingend erforderlich.
- Die Zeitreihen sind seit 1997 konsistent und lückenlos und werden kontinuierlich fortgeführt, sodass die Ableitung eines „repräsentativen Jahres“ nach VDI 3783 Blatt 20 immer den aktuellen Referenzzeitraum berücksichtigt.
- Die Windgeschwindigkeit ist durch Vergleiche mit bodennahen Messungen optimiert und wird standortgenau angepasst. Das Windfeld oberhalb von 40 m wurde durch Vergleich mit mehr als 100 Messungen an hohen Masten verifiziert und mittels Optimierungsverfahren kalibriert.
- Eine standortspezifische AKTerm mit synthetischen Daten kann in wenigen Minuten über das Online Portal awis erzeugt werden.

Ausbreitungsrechnungen mit Daten von drei Wetterstationen und dem anemos Windatlas werden vergleichend dargestellt.

1. Einleitung

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft TA Luft (2021) beschreibt die Anforderungen an Modelle und Daten für Ausbreitungsrechnungen. Die meteorologischen Eingangsdaten für Ausbreitungsrechnungen bestehen aus einer Jahreszeitreihe von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzzustand der Atmosphäre. Dabei wird der Turbulenzzustand durch die Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier oder die Monin-Obukhov-Länge beschrieben. Diese Eingangsdaten werden als Zeitreihe in einer sogenannten AKTerm oder als Statistik AKS als Eingangsdaten z. B. für das sehr populäre Ausbreitungsmodell AUSTAL zur Verfügung gestellt.

Die meteorologischen Werte sollen für den zu beurteilenden Standort repräsentativ sein und einen Zeitraum umfassen, der einem typischen mittleren Jahr entspricht. In der Regel werden keine standortspezifischen Messungen vorliegen. In einem solchen Fall sind gemäß TA Luft (Kapitel 9, Abschnitt 9.1, S. 388 ff.) zu verwenden

- a) Daten einer Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder einer vergleichbar ausgerüsteten Station, deren Übertragbarkeit auf den zu beurteilenden Standort gemäß der Richtlinie VDI 3783 Blatt 20 nachzuweisen ist, oder
- b) Daten, die mit Hilfe von Modellen erzeugt wurden (synthetische Daten). Die Eignung und Qualität der Modelle und die Repräsentativität der Daten ist nachzuweisen.

Die Problematik der Daten von Wetterstationen ist hinlänglich bekannt. Lindenberg et al. (2012) haben diese für Küsten- und Inselstationen beschrieben. Im Landesinneren insbesondere in komplexerem Gelände sind die Probleme gravierender. Windgeschwindigkeit und -richtung werden üblicherweise in etwa 10 m ü.G. oder z. B. bei umgebenden Wäldern bzw. großer Rauigkeit in einer äquivalenten Höhe gemessen. Die Messungen werden durch die Charakteristika der unmittelbaren nächsten Umgebung (Bewuchs, Bebauung, Geländekomplexität) in hohem Maße beeinflusst und sind dadurch für andere Standorte wenig repräsentativ. Veränderungen des Messortes in Höhe und Lage und Änderungen in der Umgebung (z. B. Abholzung oder Wachstum von Bäumen oder Neubaugebiete u. Ä.) lassen oft keine konsistenten Daten über einen ausreichend langen Zeitraum zu, aus dem mittlere Verhältnisse abgeleitet werden können.

Synthetische, von Modellen erzeugte Daten können die Lösung sein, sofern ihre Eignung und Qualität nachgewiesen

ist. Im Laufe verschiedener Forschungsprojekte wurde bei anemos ein Windatlas für Deutschland entwickelt (anemos 2012, 2015, 2017, 2019, 2022) und dessen Genauigkeit durch Verifizierung und Eignung für die Nutzung im Bereich der Windparkplanung nachgewiesen (Schneider et al., 2022, Weiter et al., 2019). Die Anforderungen an die Genauigkeit sowohl der Windgeschwindigkeit als auch der Windrichtung für die Windenergienutzung schätzen wir höher ein als das Genauigkeitserfordernis für Ausbreitungsrechnungen. Dies liegt zum einen daran, dass die Stromerzeugung einer Windenergieanlage etwa mit einer Potenz von 2,5 von der Windgeschwindigkeit abhängt und damit sehr sensibel auf Ungenauigkeiten der Windgeschwindigkeit reagiert. Ertragsverluste durch Abschattungen in Windparks lassen sich nur mit möglichst genauer Kenntnis der Windrichtungsverteilung bestimmen. Zum anderen erfordert der hohe Finanzbedarf einer Windparkplanung genaue Ertragsanalysen. Es liegt nahe, diese sehr genauen Daten des anemos Windatlas für Deutschland auch für Ausbreitungsrechnungen zugänglich zu machen.

Die Daten des anemos Windatlas bieten folgende Vorteile:

- Das typische oder repräsentative Jahr kann aus einer konsistenten 20-jährigen oder längeren Zeitreihe nach vorgegebenen Kriterien ausgewählt werden. Der Zeitraum wird jährlich um 12 Monate verlängert.
- Die Daten sind unbeeinflusst von bodennahen Störungselementen.
- Durch ein sogenanntes „Remodelling-Verfahren“ werden standortgenaue Zeitreihen berechnet.
- Die Daten sind standortspezifisch, d. h. repräsentativ für den zu beurteilenden Standort. Eine Übertragbarkeitsprüfung entfällt.
- Die Daten sind verifiziert mit mehr als 100 Windmessmasten bundesweit.
- Es können Ausbreitungsstatistiken AKS und Zeitreihen der Ausbreitungsclassen AKTerm bereitgestellt werden.
- Der Turbulenzzustand ergibt sich unmittelbar aus der Monin-Obukhov-Länge und muss nicht über Ausbreitungsclassen aus Strahlungsdaten oder den Bedeckungsgrad abgeleitet werden. Eine Umrechnung in AUSTAL entfällt.
- AKTerm und AKS können nach Angabe der Standortkoordinaten kurzfristig bereitgestellt werden.

2. Der anemos Windatlas für Deutschland

Der anemos Windatlas für Deutschland und die standortgenaue Windinformation resultieren aus Simulationen des atmosphärischen Zustandes mit einer Modellkette bestehend aus einem globalen Modell, das die Reanalysen ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S) 2017) als Antrieb für regionale Simulationen mit dem Mesoskala-Modell WRF (Weather Research & Forecasting Model, WRF 2017) liefert. Das Modell WRF ist ein international sehr häufig verwendetes regionales Wettermodell, das die Anforderungen der Richtlinie VDI 3783 (VDI 2020) an prognostische mesoskalige Windfeldmodelle für Anwendungen nach TA Luft weit übertrifft. Die WRF Simulationen decken mit einer räumlichen Auflösung von $3 \times 3 \text{ km}^2$ vollständig Deutschland sowie große Gebiete der Nord- und Ostsee ab (siehe Abb. 1). Mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten ste-

hen die Zeitreihen aller meteorologischen Parameter (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Feuchte, Luftdichte, Niederschlag, lang- und kurzwellige Einstrahlung u. a.) für den Zeitraum seit 1997 zur Verfügung und werden kontinuierlich fortgeführt. Unter Berücksichtigung der topographischen Charakteristika der unmittelbaren Umgebung werden die mesoskaligen Zeitreihen mit einem CFD Modell (Computational Fluid Dynamic, Meteodyn WT, 2015) standortspezifisch berechnet.

Die wichtigste Aufgabe nach der Durchführung der Hauptsimulation ist die intensive Verifikation anhand zahlreicher Windmessungen und die Korrektur systematischer Fehler durch das anschließende Remodelling Verfahren. Verifiziert werden statistische Kenngrößen wie Mittelwert, Bestimmtheitsmaß (R^2) bzw. Korrelation (R), Bias, RMSE und Extremwerte (QQ-Verteilung). Außerdem werden Vertikalprofile des Windes, Tages- & Jahresgänge, Windrosen und Häufigkeitsverteilungen berechnet und verifiziert. Eine detaillierte Beschreibung der Modellsimulationen und des Remodelling Verfahrens finden sich in Schneider et al. (2022), Weiter et al. (2019) und unter <https://anemos.de/de/windatlas.php>. Das Remodelling bezieht sich auf für Windenergieanlagen relevante Höhen oberhalb 60 m.

Ausbreitungsrechnungen erfordern jedoch meteorologische Daten und Ausbreitungsclassen in einer bodennahen Höhe von etwa 10 m. Deswegen wurde die für 10 m Höhe ü. G. simulierte Windgeschwindigkeit mit Messungen an ausgewählten Wetterstationen verglichen und eine Korrektur wurde empirisch abgeleitet. Von insgesamt 73 ausgewählten Wetterstationen wurden nach einer weiteren Prüfung mit verschärften Qualitätskriterien die Messungen an 53 Stationen zur Verifikation und Korrektur des 10-m-Windes ausgewählt. Die Korrektur erfolgte in vier Schritten:

- Filterung der 53 DWD-Zeitreihen nach Konsistenz, Qualität, etc.
- Korrektur der DWD-Anemometerhöhe auf 10 m für die nicht auf dieser Höhe gemessenen Daten.



Dr. Jannik Hüls
Ingenieurbüro Richters & Hüls, Ahaus



Martin Schneider, M.Sc.
anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH, Reppenstedt

Abb. 1: Äußeres und inneres Modellgebiet der Mesoskala-Modellierung. Das Gebiet des Windatlas für Deutschland ist rot umrandet

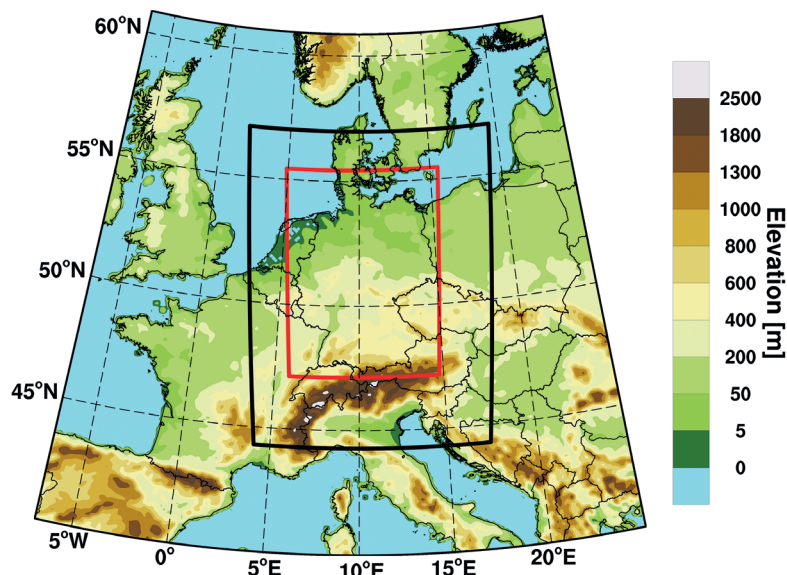
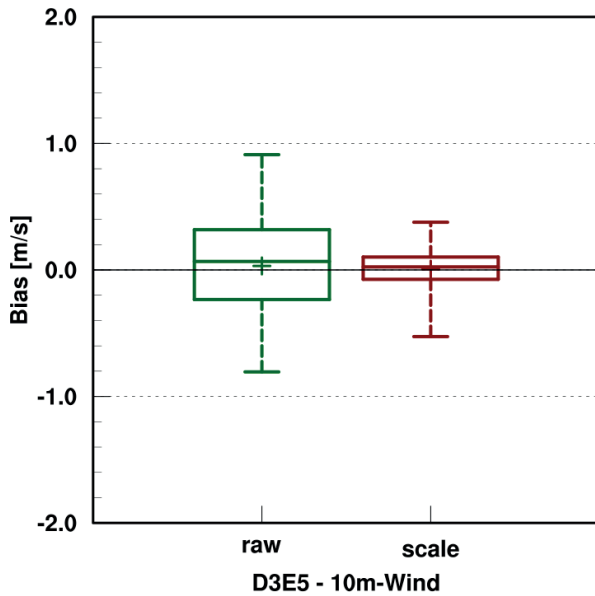


Abb. 2: Mittelwert und Standardabweichung des Bias für die gemessenen und simulierten Windgeschwindigkeiten in 10 m ü. G an 53 Wetterstationen



- Implementierung einer Höhenkorrektur im Windatlas, um die Höhe der Atlaszelle (Mittel über 3 × 3 km²) auf die geographische Höhe des Messstandortes anzupassen.
- Clustering nach Regionen mit ähnlichen systematischen Abweichungen (s. Abb. 3).

Abb. 3: Regionen mit ähnlichen systematischen Abweichungen zwischen Messungen und Simulationen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe ü. G.

Während die Korrelation von Messung und Simulation mit 83.2 % für Stundenwerte hoch und erwartungsgemäß gleich blieb, hat die Korrektur eine deutliche Reduktion des Bias bewirkt (Tabelle 1 und Abb. 2).



Tab. 1: Mittelwert und Standardabweichung des Bias und Korrelation zwischen Beobachtungen und simulierten stündlichen Mittelwerten für 53 Wetterstationen vor und nach der Korrektur

Statistiken (1h)	Rohdaten	Korrigierte Daten
Korrelation [%]	83.2	83.2
Bias [%]	1.60 ± 11.84	0.34 ± 5.21
Bias [m/s]	0.03 ± 0.38	0.01 ± 0.17

3. Zeitreihen und Häufigkeitsstatistiken für die Ausbreitungsrechnung

Nach Mittelung der 10-Minuten Werte zu Stundenmitteln oder der Ausgabe der stündlichen Werte (das 10-Min Mittel zur vollen Stunde) liefert der Windatlas Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der Monin-Obukhov-Länge in 10 m Höhe ü. G. für einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren. Die für die jeweilige Modellgitterzelle repräsentative Rauigkeitslänge ist bekannt.

Zunächst wird aus der langjährigen Zeitreihe ein repräsentatives, typisches Jahr ausgewählt oder erzeugt, das entweder im Jahresmittel oder für jeden Monat die geringsten Abweichungen zum langjährigen Mittel oder zum Mittel des jeweiligen Monats aufweist. Hierbei sind die wesentlichen Kriterien die Windrichtung mit dem Hauptwindrichtungssektor und Nebenrichtungssektoren sowie die Windgeschwindigkeit mit dem Mittelwert und der Häufigkeitsverteilung.

Die in einer AKTerm anzugebenden Anemometerhöhen werden gemäß DWD (2014) bestimmt. Die Anemometerhöhen geben für vorgegebene Rauigkeitslängen von 0.01 bis 1.00 m die Höhe an, in der die Windgeschwindigkeit denselben Wert annehmen würde wie der Wert aus dem Windatlas für 10 m Höhe.

Windgeschwindigkeit, Windrichtung und die Monin-Obukhov-Länge sind direkt Output der WRF Simulation. Bei Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL kann die Monin-Obukhov-Länge direkt als Stabilitätsmaß verwendet werden. Falls eine Ausbreitungsclassse als Stabilitätsmaß gewünscht wird, wird gemäß Tabelle 17 auf S. 390 der TA Luft (2021) die Monin-Obukhov-Länge in eine Ausbreitungsclassse nach Klug-Manier umgerechnet. Diese wird jedoch in AUSTAL nach derselben Vorschrift wieder in die Monin-Obukhov-Länge umgerechnet. Die Rauigkeitslänge wird für die Umgebung des zu beurteilenden Standortes abgeschätzt.

Eine der wenigen Möglichkeiten, die im Modell berechnete Monin-Obukhov-Länge zu verifizieren, ist ein Vergleich mit Daten des 99 m hohen Forschungsmastes Lindenberg des DWD (Beyrich, 2021), an dem neben der Windgeschwindigkeit und -richtung und anderen Parametern auch Turbulenzmessungen durchgeführt werden, aus denen die Monin-Obukhov-Länge direkt abgeleitet werden kann. Die Monin-Obukhov-Länge ist Bestandteil des DWD Datensatzes vom Messmast.

Ausbreitungsclasssen können nur eine relativ ungenaue Beschreibung des atmosphärischen Turbulenzzustandes sein. „Die Parametrisierung der atmosphärischen Turbulenz durch die Ausbreitungsclasssen entspricht nicht mehr den heutigen Erkenntnissen. Untersuchungen, dass Ausbreitungsclassse und Temperaturschichtung nur schwach korre-

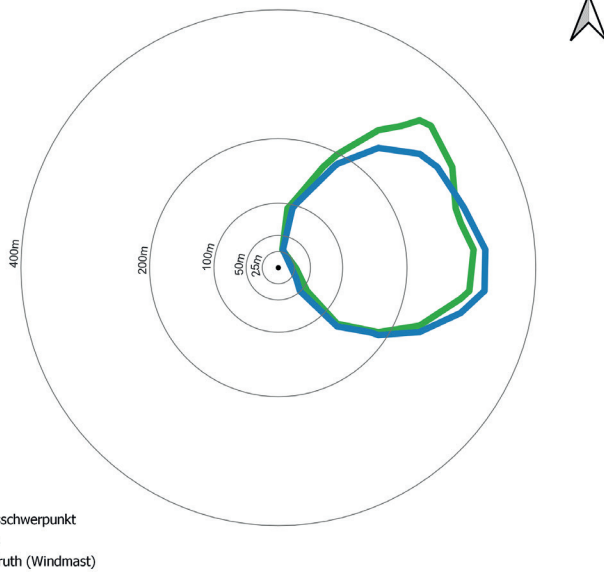


Abb. 5.1: Vertikale Linienquelle mit Überhöhung (Windatlas (blau) und Messmast (grün)), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

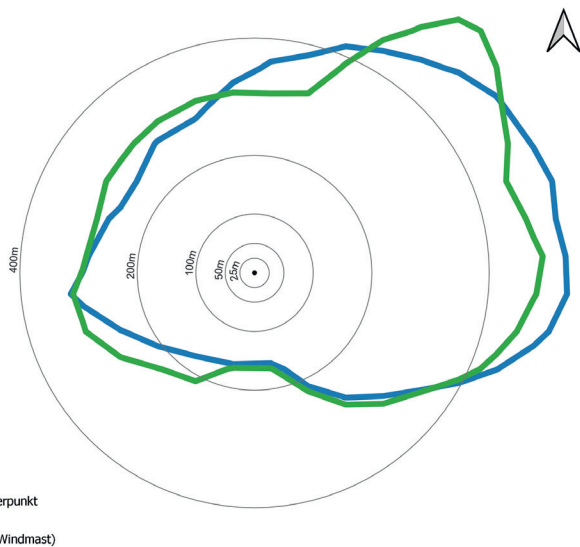


Abb. 5.2: Vertikale Linienquelle ohne Überhöhung (Windatlas (blau) und Messmast (grün)), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

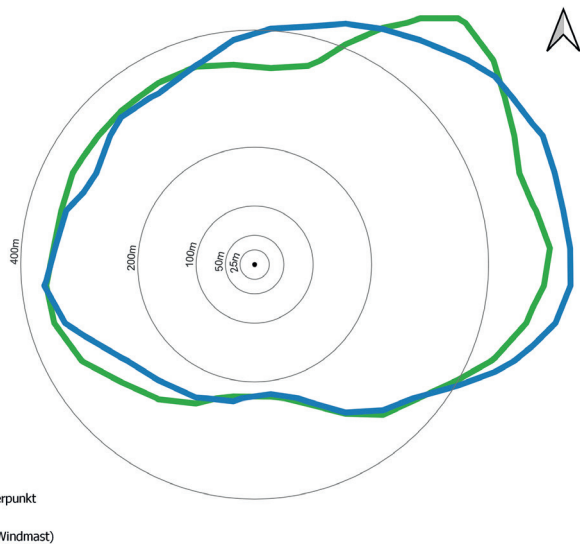


Abb. 5.3: Volumenquelle, (Windatlas (blau) und Messmast (grün)), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

dell vorhergesagten Region und der tatsächlichen Ground-Truth-Region.

Die IoU wird als Quotient der Fläche des Schnitts der beiden Regionen und der Fläche der Vereinigung der beiden Regionen berechnet. Ein IoU-Wert von 1 zeigt an, dass die vorhergesagte Region genau mit der Ground-Truth-Region übereinstimmt, während ein Wert von 0 darauf hinweist, dass keine Überlappung zwischen den Regionen besteht. Die IoU liefert eine quantitative Bewertung der Leistung des Modells.

Tab. 2: Die Metrik IoU (Intersection over Union) der Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen zum Vergleich der synthetischen Wetterdaten mit den Ground Truth Daten des Forschungsmastes Lindenberg

Bezeichnung	IoU (Intersection over Union)
Vertikale Linienquelle mit Überhöhung	0,83
Vertikale Linienquelle ohne Überhöhung	0,83
Volumenquelle	0,88

Die Metrik IoU ist in Tab. 2 für die drei berücksichtigten Quellkonfigurationen aufgeführt und weist einen Wert von mindestens 0,83 auf. Die hohen Werte des IoU unterstützen den optischen Eindruck einer guten Übereinstimmung der Ausbreitungsrechnungen unter Berücksichtigung der synthetischen meteorologischen Daten und der Daten des Windmastes.

Für eine weitere Validierung der Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen werden für drei Standorte die meteorologischen Eingangsdaten des DWD (Deutscher Wetterdienst) und die synthetischen Wetterdaten des Windatlas ermittelt und für die Ausbreitungsrechnung verwendet. Es werden die in Tab. 3 aufgeführten Wetterstationen und Jahre verwendet.

Tab. 3: Informationen zu den in den Ausbreitungsrechnungen verwendeten Wetterstationen des DWD

Name	Jahr	Koordinaten
Münster/Osnabrück	2001	52,13° N 7,68° E
Bocholt-Liedern (Wasserwerk)	2002	51,82° N 6,53° E
Lindenberg	2017	52,16° N 14,11° E

Die Abb. 6 zeigt die 5 kg Isoplethen der Deposition von Stickstoff ermittelt mit der Software AUSTAL für die Emissionen einer vertikalen Linienquelle ohne Überhöhung mit synthetischen meteorologischen Eingangsdaten des Windatlas sowie den meteorologischen Eingangsdaten der DWD Station. Als Quellkonfiguration wird ausschließlich die vertikale Linienquelle ohne Überhöhung verwendet.

Erneut weisen die in Abb. 6.1–6.3 dargestellten Isoplethen sehr ähnliche Ausprägungen auf. Die Werte der IoU liegen im Bereich zwischen 0,74 (Münster/Osnabrück), 0,81 (Bocholt-Liedern) und 0,95 (Lindenberg) und weisen auf eine gute Übereinstimmung hin.

Bei Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL führen leicht abweichende Eingabedaten natürlicherweise zu Abweichun-

gen in den Ergebnissen. Die Abweichungen in den Ergebnissen können erwartet werden und weisen nicht zwangsläufig auf Fehler oder Ungenauigkeiten hin. Bei den durchgeführten Ausbreitungsrechnungen weichen die meteorologischen Eingangsdaten voneinander ab. Es wird aber gezeigt, dass diese Abweichungen nicht signifikant sind und die synthetischen Daten des Windatlas für die standortspezifische Berücksichtigung meteorologischer Daten eine akzeptable und genaue Datenbasis bieten.

6. Zusammenfassung

Es dürfte allgemein Konsens sein, dass Ausbreitungsklassen nach Klug-Manier den Turbulenzzustand der Atmosphäre nur ungenau beschreiben. Dazu kommen die für den zu beurteilenden Standort oftmals nicht repräsentativen Messdaten an Wetterstationen, deren Eignung auch durch eine Übertragbarkeitsuntersuchung oftmals nicht gewährleistet werden kann. Eine AKTerm auf Basis des anemos Windatlas bietet eine Alternative mit großen Vorteilen:

- Die Windatlas-Zeitreihen umfassen die Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Monin-Obukhov-Länge. Eine Umrechnung in Ausbreitungsklassen ist möglich, aber für Rechnungen mit AUSTAL nicht erforderlich.
- Die Zeitreihen sind seit 1997 konsistent und lückenlos und werden kontinuierlich im monatlichen Rhythmus erweitert.
- Die Windgeschwindigkeit ist durch Vergleiche mit bodennahen Messungen optimiert und wird standortgenau angepasst. Das Windfeld oberhalb von 60 m wurde durch Vergleich mit mehr als 100 Messungen an hohen Masten verifiziert und durch ein Remodelling Verfahren korrigiert.
- Die Zeitreihen bilden die beste Grundlage zur Ableitung eines „repräsentativen Jahres“. Für diese Ableitung sind mehrere Verfahren implementiert.
- Die Erstellung einer standortspezifischen AKTerm dauert nur wenige Minuten. Die Einbindung in die Kundenplattform awis zum unmittelbaren download ist vorgesehen.

Literatur

anemos, 2012: Projekt: WinBin II – Windenergienutzung im Binnenland II: Teilvorhaben „Onshore Windatlas für Deutschland“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Laufzeit 2012–2014

anemos, 2015: Projekt: Windenergie an Land – Erarbeitung einer Roadmap zur Erstellung eines Windatlanten, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Laufzeit 2015–2016

anemos, 2017: Projekt: VERIMA – Verifikation eines Wind- und Marktwertatlas für Windstrom, gefördert von der NBank mit Mitteln des Landes Niedersachsen sowie des Bundes, Laufzeit 2017–2019

anemos, 2019: Projekt: Bereitstellung eines präzisen, validierten und aufbereiteten Datensatzes zur kurzfristigen Umsetzung eines Windatlas am Umweltbundesamt, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) vertreten durch das Umweltbundesamt (UBA), Laufzeit 2019

anemos, 2022: Projekt: WINDAUS – Windatlaszeitreihen für Ausbreitungsrechnungen, gefördert von der NBank mit Mitteln des Landes Niedersachsen sowie der Europäischen Union aus dem EFRE-Fond, Laufzeit 2022

AUSTAL2000, 2014: Programmbeschreibung zu Version 2.6, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau und Ingenieurbüro Janicke, Überlingen

Beyrich, F., 2021: pers. Mitteilung, Information unter https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/lindenbergersaeule/grenzschichtprozesse/grenzschichtprozesse_node.html

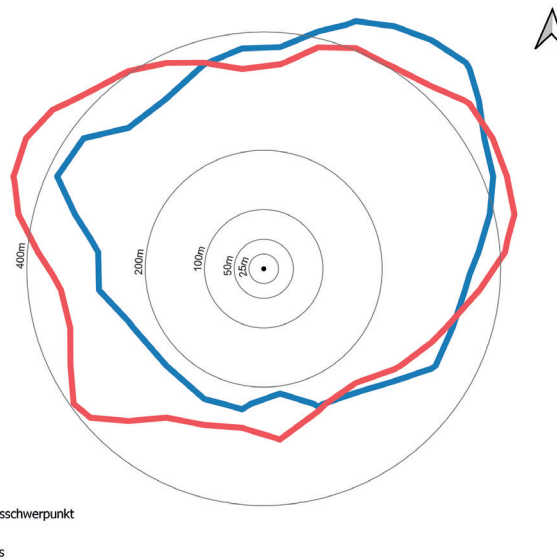


Abb. 6.1: Münster/Osnabrück, Jahr 2001, Berechnungen auf Basis der DWD Station (rot) und der Windatlas-Statistik (blau), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

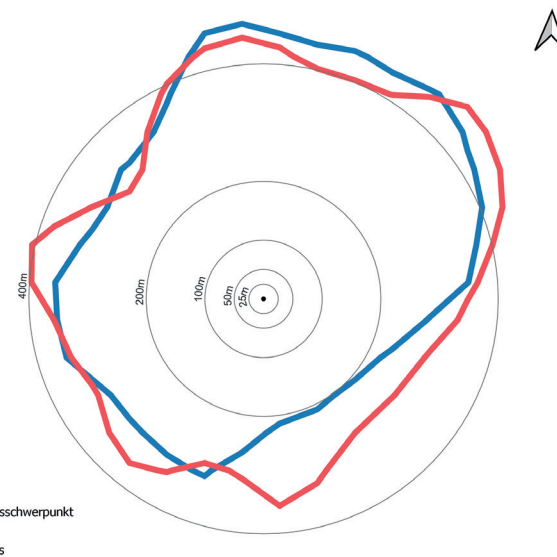


Abb. 6.2: Bocholt-Liedern (Wasserwerk), Jahr 2002, Berechnungen auf Basis der DWD Station (rot) und der Windatlas-Statistik (blau), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

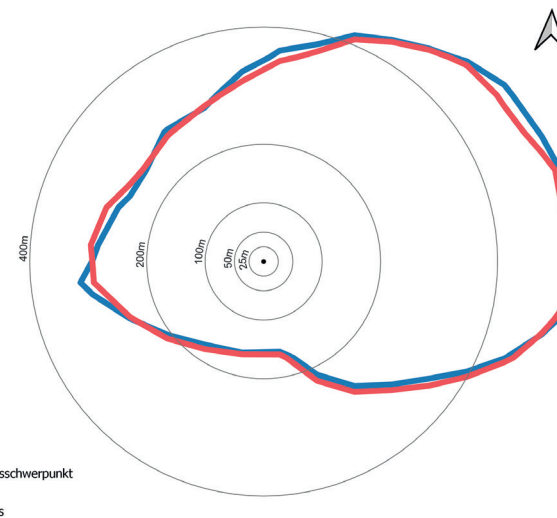


Abb. 6.3: Lindenberg, Jahr 2017, Berechnungen auf Basis der DWD Station (rot) und der Windatlas-Statistik (blau), der Emissionsschwerpunkt liegt im Zentrum

- Bigalke, K., Rau, K., Anke, F., Hüftle, A. Lohse, 2013: Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen SynRepAKTerm für Deutschland, Arbeitsgemeinschaft METCON – Ingenieurbüro Rau, Dokumentation pp 129
- 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>
- DWD, 2014: Bestimmung der in AUSTAL2000 anzugebenden Anemometerhöhe, Deutscher Wetterdienst, Merkblatt Stand 15.10.2014
- Grötzner, A., 2020: Ergebnisse einer Verifizierung des anemos Windatlas für Deutschland, Ramboll Deutschland GmbH, pers. Mitteilung
- HLNUG: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Glossar Ausbreitungsrechnung https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/ausbreitungsrechnung/glossar_internet.pdf
- Lindenberg, J., H.-T. Mengelkamp, G. Rosenhagen, 2012: Representativeness of near surface wind measurements from coastal stations at the German Bight, *Meteorol. Z.*, **21**, 1, 99–106
- LUA, 2006: Leitfaden zur Erstellung von Immissionsprognosen mit AUSTAL2000 in: Genehmigungsverfahren nach TA Luft und der Geruchsimmisions-Richtlinie, Merkblatt 56, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 2006
- Manier, G., 1975: Vergleich zwischen Ausbreitungsklassen und Temperaturgradienten, *Meteorol. Rundschau*, **28**, 6–11
- Rau, M. und K. Bigalke, 2014: Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen für Baden-Württemberg – Hinweise für Anwender, Im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Schneider, M., A. Glücksmann, A. Grötzner, H.-T. Mengelkamp, 2022: A wind atlas for Germany and the effect of remodeling, *Meteorol. Z.*, **31**, 2, 117–130
- TA Luft, 2002: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002, Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
- TA Luft, 2021: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 18. August 2021, Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Vorblatt Kapitel 9: Meteorologische Daten
- VDI, 2016: VDI-Richtlinie 3782, Blatt 1, Umweltmeteorologie: Atmosphärische Ausbreitungsmodelle, Gaußsches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngößen
- VDI, 2017a: VDI-Richtlinie 3782, Blatt 6, Umweltmeteorologie: Atmosphärische Ausbreitungsmodelle, Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier
- VDI, 2017b: VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7, Umweltmeteorologie: Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder
- VDI, 2017c: VDI-Richtlinie 3783, Blatt 20, Umweltmeteorologie: Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung im Rahmen der TA Luft
- VDI, 2017d: VDI-Richtlinie 3783, Blatt 21, Umweltmeteorologie: Qualitätssicherung meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL
- VDI, 2020: VDI-Richtlinie 3783, Blatt 16, Umweltmeteorologie: Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft
- Weiter, A., M. Schneider, D. Peltret, H.-T. Mengelkamp, 2019: Electricity production by wind turbines as a means for the verification of wind simulations, *Meteorol. Z.*, **28**, 1, 69–77
- WRF, 2017: User's Guides for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System, Version 3, WRF users page, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html

Kontakt

Dr. Heinz-Theo Mengelkamp
 anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH
 Böhmsholzer Weg 3
 21391 Reppenstedt
 E-Mail: mengelkamp@anemos.de