

Beeinflussen Nordsee-Windparks den Wasserhaushalt der Ostsee?

18.02.2026 von Michael Hahl

Technogene Modifikation gekoppelter Atmosphäre–Ozean-Prozesse

Michael Hahl, M.A., Geograph

[Artikel auf ResearchGate lesen \(deutsch/englisch\)](#)

Zusammenfassung

Der großflächige Ausbau der Offshore-Windenergie in der Nordsee stellt einen gezielten, kumulativen Entzug kinetischer Energie aus der atmosphärischen Grenzschicht dar und verändert zugleich die hydrodynamischen Randbedingungen der Schelfmeere. Während lokale Effekte von Offshore-Windparks auf Turbulenz, Schichtung und marine Ökosysteme zunehmend dokumentiert sind (Akhtar et al., 2021; Daewel et al., 2022; Christiansen et al., 2026), ist bislang kaum untersucht, ob sich daraus systemische Effekte im gekoppelten Nordsee–Ostsee-System ergeben könnten.

Die Hypothese dieses Beitrags lautet, dass die zunehmende aerodynamische Rauigkeitsmodifikation der Nordsee mesoskalige Druckgradienten und bodennahe Westwindintensitäten modulieren könnte. In der Folge wäre eine Beeinflussung der Häufigkeit und Intensität von Major Baltic Inflows (MBI) in die Ostsee als technogene Fernwirkung denkbar (Matthäus u. Franck, 1992; Mohrholz et al., 2015). Angesichts der geplanten Ausbaugrößen erscheint es dringend geboten, mesoskalige Atmosphären–Ozean-Kopplungen in strategische Planungen einzubeziehen und die bisher stark lokal ausgerichtete Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) kritisch zu hinterfragen und zu ergänzen.

Summary

The large-scale expansion of offshore wind energy in the North Sea represents a targeted, cumulative extraction of kinetic energy from the atmospheric boundary layer, while simultaneously modifying the hydrodynamic boundary conditions of shelf seas. Although local effects on turbulence, stratification, and marine ecosystems are increasingly documented (Akhtar et al., 2021; Daewel et al., 2022; Christiansen et al., 2026), systemic effects on the coupled North Sea–Baltic Sea system remain largely unexplored.

This Comment hypothesizes that the progressive aerodynamic roughness modification of the North Sea could modulate mesoscale pressure gradients and near-surface westerlies, potentially affecting the frequency and intensity of Major Baltic Inflows (MBI) into the Baltic Sea as an anthropogenic teleconnection (Matthäus & Franck, 1992; Mohrholz et al., 2015). Current environmental impact assessment frameworks may be insufficient to capture such large-scale coupled effects, highlighting the need for integrated modeling and system-level planning.

1. Einleitung und konzeptioneller Rahmen

Im Februar 2026 verzeichnet die Ostsee einen historisch niedrigen Pegelstand. Die konventionelle Meteorologie erklärt dies primär mit persistierenden Ostwindlagen, die durch stabile Kontinentalhochdruckgebiete begünstigt werden. Aus geoökologischer Sicht stellt sich jedoch die weitergehende Frage: Inwieweit überformen großräumige anthropogene Eingriffe in die Nordsee das gekoppelte Atmosphären–Ozean-System und beeinflussen damit die Hydrodynamik der Ostsee?

Bis 2050 ist geplant, die Offshore-Windkraft in der Nordsee auf mehrere hundert Gigawatt auszubauen. Physikalisch betrachtet entspricht dies der Transformation der ehemals glatten Meeresoberfläche in eine strukturreiche, energieentziehende Fläche, vergleichbar mit einer großflächigen Urbanisierung auf offener See. Die Konsequenzen für mesoskalige atmosphärische Druckfelder, Impulsflüsse und ozeanische Zirkulationsmuster sind bisher kaum untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Hypothese zu formulieren, dass Offshore-Windparks über atmosphärische und hydrodynamische Kopplungen die Häufigkeit von Ostwindlagen und damit den Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee systemisch beeinflussen könnten.

2. Windparks als Wirkfaktoren für Wind- und Wasserströmung

Offshore-Windenergieanlagen wirken auf zwei Ebenen als strukturverändernde Elemente im Strömungssystem:

2.1 Atmosphärische Wirbelschleppen (Wakes)

Windturbinen entziehen dem bodennahen Wind kinetische Energie und reduzieren dadurch den horizontalen Impulsfluss in der Grenzschicht. Das heißt: Hinter den Anlagen entstehen Wirbelschleppen, so genannte Wakes, mit verringerter Windgeschwindigkeit, erhöhter Turbulenz und vertikaler Umverteilung kinetischer Energie. Wake-Ausdehnungen von bis zu 100 km sind dokumentiert

(Christiansen et al., 2022).

Bei der geplanten Dichte von Offshore-Windparks ist eine Koaleszenz dieser Wirbelschleppen oder Wakes wahrscheinlich, also ein Zusammenwachsen der einzelnen Verwirbelungen zu einer größeren Einheit, einem "Wake-Feld". Hierdurch entstehen großflächige Modifikationen der Impulsflüsse in der unteren Troposphäre (Akhtar et al., 2021). Diese Modifikation kann Druckgradienten verschieben, die bodennahen Westwinde abschwächen und das Fortbestehen (Persistenz) kontinentaler Hochdruckgebiete stabilisieren (Hurrell, 1995; Hurrell et al., 2003; Woollings et al., 2010).

2.2 Hydrodynamische Bremswirkung

Unter Wasser erhöhen die Fundamente der Windenergieanlagen wiederum den Strömungswiderstand und verändern vertikale Durchmischung und Schichtung. Geophysikalische Modellstudien zeigen, dass dadurch regionale Zirkulationsmuster der Nordsee um bis zu 20 % verändert werden können (Christiansen et al., 2026). Dies kann die hydraulische Überströmung des Skagerraks und die Durchströmung der Darßer Schwelle beeinflussen, wodurch die Inflow-Ereignisse der Ostsee, also die Major Baltic Inflows (MBI), potenziell moduliert werden.

3. Hypothese einer induzierten Ostwind-Lage

Um Wechselwirkungen und potenzielle Szenarien zu erfassen, ist eine Darstellung verschiedener Rückkopplungseffekte als Prozessresponssystem sinnvoll: Die Austauschprozesse zwischen Nord- und Ostsee werden wesentlich durch Westwindphasen gesteuert. Diese erzeugen den notwendigen Windstau im Skagerrak, der die Major Baltic Inflows und somit atlantische Salzwassereinflüsse aus der Nordsee in das Ostseebecken ermöglicht.

Die Hypothese lautet nun: Die Entnahme kinetischer Energie durch kumulative Offshore-Windenergieanlagen (OWEA-Cluster) dämpft die bodennahe Westwindkomponente im regionalen Mittel (Archer u. Jacobson, 2005; Miller u. Kleidon, 2016; Marvel et al., 2013). Als OWEA-Cluster wird eine zusammenhängende Gruppe von Offshore-Windturbinen bezeichnet, die dicht beieinander stehen und gemeinsam betrieben werden. Durch ihre räumliche Nähe entstehen - wie erläutert - kumulative Effekte auf die atmosphärische und auf die marine Strömungsdynamik: Die troposphärischen Wirbelschleppen können sich zu Wake-Feldern überlagern und großflächige Winddämpfungen bewirken. Hydrodynamische Effekte durch die Fundamente der Windenergieanlagen summieren sich wiederum im Schelfmeerbereich, was Strömungsmuster, Schichtung und Mischungsprozesse im Meerwasser beeinflussen kann. Die künstlich erhöhte Rauigkeit führt zu höherem Widerstand für den atlantischen Zustrom (Druckgradientenverschiebung).

Wir haben es hier also mit mehreren, sich aufschaukelnden Prozessen und Resonanzen zu tun. Als weitere Rückkopplung für die troposphärische Strömungsdynamik kann eine Stabilisierung von Blockierungslagen abgeleitet werden: Geschwächte Westwinde begünstigen das Fortdauern (Persistenz) kontinentaler Hochdruckgebiete, stärken und verlängern dadurch die Ostwindregime und „entwässern“ folglich das Ostsee-Becken hydrodynamisch, weil die Major Baltic Inflows reduziert bleiben. während der kompensatorische Einstrom aus dem westlichen Nordsee-Bereich gedämpft wird.

Diese dynamischen Wechselwirkungen lösen weitere Rückkopplungsprozesse im geoökologischen NMaßstab aus, wie im nächsten Kapitel dargestellt wird.

4. Meeresökologische Konsequenzen: Risiko weiterer Todeszonen

Die Ostsee reagiert hochsensibel auf Veränderungen der Inflow-Frequenz. Ein reduzierter Zufluss über den Skagerrak vermindert die Fähigkeit des gekoppelten Nordsee-Ostsee-Systems, schweres Salzwasser über die Darßer Schwelle zu heben. Bleibt der Austausch aus, droht Anoxie in tiefen Wasserschichten: So genannte Todeszonen sind bereits ein verbreitetes und besorgniserregendes Phänomen im Ostsee-Becken, dessen Ursachen multikausal diskutiert wird.

Wie aufgezeigt, könnte die Modulation der atmosphärischen und marinen Strömungsdynamik aufgrund des bereits fortgeschrittenen Ausbaus der Nordsee mit Offshore-Windenergieanlagen einer der wirksamen Faktoren sein. Auch Windenergieanlagen an den Küsten sind in diese Betrachtung mit einzubeziehen. Die aktuellen Pegelstände und Sauerstoffprofile könnten somit ein Symptom einer bereits gestörten Austauschdynamik sein (Matthäus u. Franck, 1992; Mohrholz et al., 2015; Gräwe et al., 2015), deren meeresökologische Relevanz dann mit weiterem Ausbau noch bedenklich zunehmen würde.

Modellstudien belegen also, dass der erhöhte Strömungswiderstand der Fundamente veränderte vertikale Mischungsprozesse und regionale Zirkulationsmuster (Christiansen et al., 2026) bewirken. Dadurch werden auch Primärproduktion, Nährstofftransport und Ökosystemdynamik beeinflusst (Daewel et al., 2022). Auch dies unterstreicht grundsätzlich die Notwendigkeit einer gekoppelten Betrachtung von Atmosphären- und Ozeansystemen.

5. Umweltrechtlicher Kontext: Erweiterte Umweltverträglichkeitsprüfung

Die bisherige Praxis der Umweltverträglichkeitsprüfung fokussiert sich überwiegend auf lokal- und standortspezifische Wirkungen. Großräumige und mesoskalige Fernwirkungen werden kaum berücksichtigt. Der Ausbau der Offshore-Windkraft transformiert das System allerdings auf geophysikalischer Betrachtungsebene, ohne dass die Fernwirkungen der atmosphärischen und marinen Resonanzen und die mögliche Beeinflussung von Major Baltic Inflows ausreichend und systematisch

untersucht werden (vgl. Helmholtz-Zentrum Hereon, 2026).

Folgerung: UVP-Richtlinien und Genehmigungsprozesse sollten Atmosphären-Ozean-Kopplungen explizit einbeziehen und mögliche systemische Effekte prüfen, bevor weitere Ausbauentscheidungen getroffen werden. Der geophysikalische Faktor der marinen und troposphärischen Strömungsdynamik mit kumulativen, potenziell schwerwiegenden geo- und meeresökologischen Effekten ist daher zwingend in das Prinzip und den Ablauf von Umweltverträglichkeitsprüfungen beim Ausbau der Offshore-Windenergieanlagen mit einzubeziehen. Eine punktuelle Betrachtung einzelner Windturbinen ist offensichtlich keineswegs ausreichend, allein schon dadurch, dass Wake-Felder mit Wirbelschleppen von bis zu 100 km nachgewiesen sind (Christiansen et al., 2022). Es geht also um Fernwirkungen, Kumulationen, Prognosen und um potenziell unumkehrbare Effekte für die Strömungsdynamik und Meeresökologie.

6. Umweltpolitik und Forschungsbedarf

Nachfolgend werden einige Forschungsfelder angeführt, die gegenwärtig teils auch schon stattfinden, aber angesichts der zu erwartenden Vulnerabilität des Nordsee-Ostsee-Systems in Bezug auf den aktuellen und weiter geplanten Ausbau von Offshore-Windenergieanlagen mit höchster Dringlichkeit umweltpolitisch zu forcieren sind:

- Gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Modelle mit Windpark-Parametrisierung (MOSSCO Framework, 2025),
- Ensemblesimulationen verschiedener Windparkdichten,
- Sensitivitätsanalysen von Druckgradienten und Statistiken von Major Baltic Inflows,
- Langzeit-Reanalysevergleiche,
- Attributionsstudien zur Trennung natürlicher Variabilität und technogener Signale,
- weitere multifaktorelle Forschung zu den meeresökologischen Todeszonen des Ostsee-Beckens.

- Nur durch systemische Ansätze und im Rahmen umfassender Prozessresponsssysteme können mesoskalige Fernwirkungen verlässlich quantifiziert werden.

7. Schlussfolgerung

Der Ausbau der Offshore-Windenergie transformiert die physikalischen Randbedingungen des Nordsee-Ostsee-Systems. Die Hypothese einer möglichen Modulation von Ostwindlagen und Major Baltic Inflows ist physikalisch plausibel und operationalisierbar. Angesichts geplanter Ausbaugrößen ist es dringend geboten, gekoppelte Atmosphären-Ozean-Rückkopplungen zu untersuchen und die bisher stark lokal orientierte UVP-Praxis kritisch zu hinterfragen.

Hinweis zur methodischen Transparenz

Geowissenschaftliche Grundidee, Überlegungen und Interpretationen sowie Schlussfolgerungen wurden ausschließlich vom Autor erstellt und überprüft. Im Entstehungsprozess dieses Beitrags wurden die KI-basierten Sprachmodelle ChatGPT (OpenAI, GPT-5) und Google Gemini zur Unterstützung bei der Strukturierung früher Textfassungen eingesetzt, insbesondere zu Recherchezwecken, untergeordnet zur inhaltlichen und sprachlichen Strukturierung. Die zugrunde liegende Hypothesen und die kausale Herleitung gehen rein auf die Verantwortung und das Fachwissen des Verfassers zurück, bei dem somit die wissenschaftliche Verantwortung ausschließlich liegt.

Literaturverzeichnis (ausgewählte Referenzen)

Offshore-Wind und Nordsee-Dynamik

Akhtar, N., et al. (2021): Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and its availability in the North Sea. Scientific Reports.

Christiansen, N., et al. (2022): Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes. Frontiers in Marine Science, 9.

Christiansen, N., Daewel, U., & Schrum, C. (2026): Cumulative hydrodynamic impacts of offshore wind farms on North Sea currents and surface temperatures. Nature Communications Earth & Environment.

Daewel, U., et al. (2022): Offshore wind farms are projected to impact primary production and ecosystem dynamics in the North Sea. Communications Earth & Environment.

Großskalige Zirkulation / NAO

Hurrell, J. W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676–679.

Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. AGU.

Woollings, T., Hannachi, A., & Hoskins, B. (2010): Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136, 856–868.

Energetische Größenordnungen / Impulsflüsse

Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2005): Evaluation of global wind power. *J. Geophys. Res.*, 110, D12110.

Miller, L. M., & Kleidon, A. (2016): Wind speed reductions by large-scale wind turbine deployments lower turbine efficiencies and set low generation limits. *PNAS*, 113(48), 13570–13575.

Marvel, K., Kravitz, B., & Caldeira, K. (2013): Geophysical limits to global wind power. *Nat. Clim. Change*, 3, 118–121.

Major Baltic Inflows / Ostsee-Dynamik

Matthäus, W., & Franck, H. (1992): Characteristics of major Baltic inflows – A statistical analysis. *Cont. Shelf Res.*, 12(12), 1375–1400.

Mohrholz, V., Naumann, M., Nausch, G., Krüger, S., & Gräwe, U. (2015): Fresh oxygen for the Baltic Sea – An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *J. Mar. Syst.*, 148, 152–166.

Gräwe, U., Naumann, M., Mohrholz, V., & Burchard, H. (2015): Anatomizing one of the largest saltwater inflows into the Baltic Sea in December 2014. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 7676–7697.

Institutionell / Presse

Helmholtz-Zentrum Hereon (2026): Pressemitteilung: Auswirkungen großer Windparks auf die Meeresströmung unterschätzt. Februar 2026.

Dieser Artikel wurde im südwestdeutschen Mittelgebirge Odenwald verfasst; zugrunde liegen natürlich auch zahlreiche Aufenthalte und geographische Exkursionen an Nord- und Ostsee, die bis in die 1980er Jahre zurückgehen und dadurch Beobachtungen zu geoökologischen Entwicklungen über gut vier Jahrzehnte ermöglichen.

Michael Hahl, Geograph, geboren 1965 in Ludwigshafen am Rhein, Abschluss an der Geographischen Fakultät der Ruprecht-Karls-Universität in Heidelberg (Magister Artium der Geographie; mit Geologie u. Ethnologie), wirkt als Inhaber des "Geographischen Fachbüros proreg" mit Projekten im regionalen Geotourismus und als Sachverständiger u. fachlicher Bearbeiter für Geoökologie u. Lebensraum-/Artenschutz inklusiver umweltrechtlich-naturschutzfachlicher Abwägungen. Er versteht sich als Mensch-Umwelt-Forscher, sowohl in Bezug auf Umweltgeschichte als auch auf zeitgemäße u. zukunftsfähige Fragestellungen zur Mensch-Umwelt-Interaktion. Er wirkt zudem als freier Autor u. Begründer des geophilosophischen Konzepts "Bewusstseinsgeographie" ("Geography of Consciousness"). Hahl ist Verfasser von über 100 geo- u. umweltwissenschaftlichen, geotouristischen, umweltgeschichtlichen u. geoökologischen Publikationen u. Gutachten, außerdem von über 100 Tafel-Texten für Geopfade in Natur- u. Geoparks, sowohl "outdoor" als auch "indoor", beispielsweise der Tafeln im Naturparkzentrum in Eberbach am Neckar. Reisen erfolgten insbesondere in viele Regionen Eurasiens, derzeitige räumliche Schwerpunkte und Arbeitsgebiete liegen unter anderem im westlichen Ungarn und östlichen Österreich, in Süd-Deutschland sowie auch im Nordsee-Ostsee-Raum. Weiterführende Info: www.proreg.de