

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](#)

Zusammenfassung

Der großflächige Ausbau der Offshore-Windenergie in der Nordsee - zusammen mit dem küstennahen Onshore-Ausbau - stellt einen 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 klimageographischer, geophysikalischer sowie geoökologischer Sicht stellt sich jedoch die weitergehende Frage: Inwieweit überformen großräumige anthropogene bzw. technogene Eingriffe in die Nordsee sowie in die Küstenbereiche das gekoppelte Atmosphären–Ozean-System und beeinflussen damit möglicherweise sogar 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 naturgemäß glatten Meeresoberfläche in eine strukturreiche, energieentziehende Fläche, vergleichbar mit einer großflächigen Urbanisierung oder jedenfalls Technisierung auf offener See, ergänzt von der entsprechenden Überformung der Küstenzonen. 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 sowie den küstennahen Onshore-Turbinen ist eine Koaleszenz dieser Wirbelschleppen oder Wakes wahrscheinlich, also ein Zusammenwachsen der einzelnen Verwirbelungen zu größeren Einheiten, einem "Wake-Feld". Hierdurch entstehen großflächige Modifikationen der Impulsflüsse in der unteren Troposphäre (Akhtar et al., 2021), vor allem in der atmosphärischen Grenzschicht. 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 könnten.

3. Quantitative Dimension und energetische Einordnung

An dieser Stelle muss es zunächst um die grundlegende Fragestellung einer Quantifizierung sowie um Skalierung im Kontext natürlicher Variabilität gehen.

3.1 Technogenes Responssystem der Nordsee-Anrainer

Um die Tragweite der technogenen Modifikation zu erfassen, ist eine über den marinen Raum hinausgehende Quantifizierung der Windenergienutzung im gesamten Nordsee-Becken sowie in den angrenzenden Küstenzonen erforderlich. Aktuelle Bestandsdaten (Stand 02/2026) lassen für das Nordsee-System – einschließlich eines 50-km-Küstenkorridors landeinwärts – folgende Größenordnung erkennen:

Offshore-Sektor (ca. 4.500–5.000 WEA): In Betrieb oder im fortgeschrittenen Bau in der Nordsee (u. a. Vereinigtes Königreich, Deutschland, Niederlande, Dänemark, Belgien, Frankreich, Norwegen). Die installierte Offshore-Leistung beträgt gegenwärtig rund 35 GW.

Onshore-Küstenzone (ca. 20.000 WEA) Aufgrund der starken räumlichen Konzentration der Windkraft in Norddeutschland, Jütland, den Niederlanden sowie Teilen der britischen Ostküste befindet sich ein erheblicher Anteil der nationalen Onshore-Anlagen innerhalb dieses Küstenkorridors.

Zusammengenommen ergibt sich gegenwärtig ein technogenes System von über 25.000 Windenergieanlagen im erweiterten Nordsee-Raum. Atmosphärisch betrachtet führt diese Verdichtung zu einer großflächigen Erhöhung der effektiven Oberflächenrauigkeit. Die Effekte betreffen primär die atmosphärische Grenzschicht, wo Impulsentnahme, Turbulenzproduktion und vertikale Durchmischung lokal und mesoskalig modifiziert werden. Unter bestimmten Stabilitätsbedingungen können sich diese Modifikationen über größere Distanzen fortpflanzen.

3.2 Skalierung: Technogenes Signal im Kontext natürlicher Variabilität

Ein zentraler wissenschaftlicher Einwand gegen die Annahme einer großräumigen atmosphärischen Beeinflussung betrifft die energetischen Größenordnungen. Der kinetische Energiefluss des nordatlantischen Sturmtracks liegt im Terawatt-Bereich und übersteigt die gegenwärtig installierte Offshore-Leistung (≈ 35 GW) um mindestens eine Größenordnung. Auch bei einer Umsetzung der Ausbauziele der Ostende-Erklärung (≈ 300 GW bis 2050) bliebe die installierte Leistung unterhalb des großskaligen atmosphärischen Gesamtenergieflusses.

Die hier formulierte Hypothese zielt auf eine mögliche mesoskalige Modulation innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht ab. Drei Aspekte erscheinen dabei untersuchungswürdig:

- Räumliche Konzentration der Impulsentnahme: Die Energieextraktion erfolgt hochkonzentriert in der Schicht der unteren Atmosphäre, die für den Impulsübertrag auf die Meeresoberfläche und damit für Austauschprozesse relevant ist.
- Skalierung und Nichtlinearität: Während der heutige Effekt gegenüber der natürlichen Variabilität (z. B. NAO) statistisch noch schwer isolierbar sein dürfte, stellt die geplante Vervielfachung der Kapazität eine erhebliche Intensivierung dar. Ob sich daraus nichtlineare Effekte in mesoskaligen Druck- und Windfeldern ergeben können, ist bislang nicht systematisch quantifiziert.
- Kopplung an ozeanische Prozesse: Selbst moderate Änderungen im bodennahen Windfeld könnten Auswirkungen auf Windstau, Austauschprozesse im Skagerrak und die Dynamik von Major Baltic Inflows haben.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die zentrale Forschungsfrage: Ab welcher räumlichen Dichte und energetischen Größenordnung überschreitet die kumulative technologische Impulsentnahme in der Nordsee die Schwelle, bei der mesoskalige atmosphärische Prozesse statistisch messbar beeinflusst werden?

4. Hypothese einer induzierten Ostwind-Lage

Um Wechselwirkungen und potenzielle Szenarien zu erfassen, ist eine Darstellung verschiedener Rückkopplungseffekte als Prozessresponsssystem 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: Die Entnahme kinetischer Energie durch kumulative Offshore-Windenergieanlagen (OWEA-Cluster) sowie küstennahe Onshore-Windenergieanlagen 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 in der grenznahen atmosphärischen Schicht, der unteren Troposphäre, zu höherem Widerstand für den atlantischen Zustrom (Druckgradientenverschiebung).

Wir haben es mit mehreren, sich aufschaukelnden Prozessen und Resonanzen zu tun. Als weitere Rückkopplung für die troposphärische Strömungsdynamik kann eine Stabilisierung von Blockierungslagen hypothetisch abgeleitet werden: Geschwächte Westwinde begünstigen das Fortdauern (Persistenz) kontinentaler Hochdruckgebiete, stärken und verlängern dadurch möglicherweise die Ostwindregime und könnten folglich zu einem Ausfluss aus dem Ostsee-Becken führen, während der Major Baltic Inflow, also der kompensatorische Einstrom aus dem westlichen Nordsee-Bereich gedämpft wird.

Solche hydrodynamischen und troposphärischen Wechselwirkungen könnten wiederum Rückkopplungsprozesse im geoökologischen NMAßstab auslösen, wie im nächsten Kapitel aufgezeigt.

5. 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 und küstennahen

Onshore-Windenergieanlagen einer der daran beteiligten Wirkfaktoren sein. Die aktuellen Pegelstände und Sauerstoffprofile wären als Symptom einer bereits gestörten Austauschdynamik potenziell möglich (Matthäus u. Franck, 1992; Mohrholz et al., 2015; Gräwe et al., 2015), deren strömungsdynamische und meeresökologische Relevanz mit weiterem Ausbau bedenklich zunehmen würde.

Zudem belegen Modellstudien, 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).

6. 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, ergänzt vom Ausbau in küstennahen Zonen, transformiert das System auf geophysikalischer Betrachtungsebene, ohne dass die potenziellen Fernwirkungen der atmosphärischen und marinen Resonanzen und die mögliche Beeinflussung von Major Baltic Inflows bereits ausreichend und systematisch untersucht wären (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 sowie der küstennahen Windturbinen mit einzubeziehen. Eine punktuelle Betrachtung einzelner Windkraftanlage ist offensichtlich nicht ausreichend, allein schon durch, dass Wake-Felder mit Wirbelschleppen von bis zu 100 km mittlerweile nachgewiesen sind (Christiansen et al., 2022). Es geht daher um Fernwirkungen, Kumulationen, Prognosen und potenziell schwer umkehrbare Effekte und Rückkopplungen für die Strömungsdynamik und Meeresökologie.

7. 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- und küstennahen Onshore-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.

8. Schlussfolgerung

Der Ausbau der Offshore-Windenergie und komplementär des küstennahen Onshore-Ausbaus transformiert die physikalischen Randbedingungen des Nordsee-Ostsee-Systems. Die Hypothese einer möglichen Modulation von Ostwindlagen und Major Baltic Inflows ist geophysikalisch formulierbar und umweltpolitisch operationalisierbar. Angesichts geplanter Ausbaugrößen ist es offenkundig geboten, gekoppelte Atmosphären-Ozean-Rückkopplungen sowie Wechselwirkungen und Rückkopplungen für das meeres- und geoökologische System intensiv zu untersuchen und die bisher stark lokal orientierte UVP-Praxis demgemäß kritisch zu ergänzen.

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*.

MOSSCO Framework (2025): Modular System for Shelves and Coasts – Documentation on Coupled Marine Models.

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

