

## Korrosionsschutz für Offshore-Windkraft – Problem für die Umwelt?

Offshore-Windkraftanlagen produzieren zuverlässig Strom. In Deutschland haben sie im Jahr 2020 etwa 27 Milliarden Kilowattstunden Strom geliefert. Die Anlagen setzen jedoch auch ständig chemische Stoffe in das Wasser und die sie umgebenden Sedimente frei: Aluminium, Zink und zahlreiche andere (potentiell) giftige Schwermetalle stammen vor allem aus dem Korrosionsschutz der Anlagen. Aktuelle Untersuchungen gehen der Frage nach, inwiefern Windkraftanlagen Schadstoffe abgeben und welche Auswirkungen das mittel- bis langfristig auf die Meeresumwelt hat.

<https://www.eskp.de/schadstoffe/korrosionsschutz-fuer-offshore-windkraft-problem-fuer-die-umwelt-9351114/>



Abb. 1: Stromerzeugung durch Windkraft in der Nordsee. (Foto: imago images/Shotshop)

Bei der Energiewende spielen Windkraftanlagen auf dem Meer, sogenannte Offshore-Windkraftanlagen eine zentrale Rolle (Abb. 1). In der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) sind Ende 2020 1.501 Windkraftanlagen mit einer kumulierten installierten Leistung von 7.760 MW in Betrieb. Der Windenergie-Zubau kam zuletzt allerdings etwas ins Stocken: Von Januar bis Dezember 2020 gingen in Deutschland nur 32 Offshore-Anlagen neu in Betrieb. Diese neuen Anlagen wurden alle in der Nordsee gebaut, damit drehen sich im deutschen Teil der Nordsee heute etwa 1300 Windräder und ernten Energie.

Die Kapazitäten sollen weiter ausgebaut werden. Bis zum Jahr 2030 sollen laut Koalitionsvertrag 65 Prozent der deutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen werden. Das kürzlich in Kraft getretene neue gesetzliche Offshore-Ausbauziel sieht für Deutschland nun – statt bisher 15 GW – sogar 20 GW bis zum Jahr 2030 vor.

Während der Nutzen und die große Bedeutung von Offshore-Windparks unbestritten ist, entstehen doch auch neue Fragen. So ist eine Frage, welchen Einfluss der Betrieb und der beträchtliche Ausbau von Windparks auf die Umwelt hat. Gehen damit möglicherweise Umweltrisiken einher und welche könnten das sein?

Zum Beispiel werden schädliche Auswirkungen auf die Ökosysteme und insbesondere auf die Tierwelt, wie Meeressäuger, Vögel und Fische, und auch auf die Benthos-Lebensgemeinschaften am Meeresboden diskutiert.

Weniger augenfällig ist, dass der Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen auch immer einen chemisch-stofflichen Eingriff in die Meeresumwelt nach sich zieht. Denn Offshore-Windkraftanlagen entnehmen nicht nur Energie aus der Umwelt – sie setzen auch chemische Stoffe in die Umgebung frei. Stoffe, die aus Materialien stammen, die an den Anlagen für bestimmte Zwecke eingesetzt werden, zum Beispiel als Betriebsstoffe oder um die Anlagen vor Korrosion zu schützen.

Daher sind hinsichtlich möglicher Umweltrisiken folgende weitere Fragen wichtig: Welche Stoffe werden freigesetzt? In welcher Menge werden diese Stoffe frei? Bleiben sie in der direkten Umgebung der Offshore-Windparks oder werden sie in die weitere Umgebung verdriftet? Welchen möglichen Einfluss haben diese chemischen Freisetzungen auf die Meeresumwelt bzw. weitere Nutzungen?

### **Korrosionsschutz der Windkraftanlagen setzt Stoffe frei**

Im Fokus der Untersuchungen stehen chemische Emissionen, die möglicherweise von den Korrosionsschutzsystemen der Anlagen ausgehen. Um die Lebensdauer der Windkraftanlagen zu erhöhen, werden sie über und unter Wasser mit verschiedenen Materialien vor Korrosion, das heißt vor dem Verrosten, geschützt. Dafür kommen vor allem zwei Methoden zum Einsatz:

Zum einen werden die Oberflächen mit vielfältigen Kunststoffmaterialien beschichtet. Diese verwittern im Laufe der Zeit und die in ihnen enthaltenen zumeist organischen Schadstoffe wie Weichmacher oder UV-Stabilisatoren werden allmählich in die Meeresumwelt ausgewaschen.

Zum anderen werden an den Fundamenten der Bauwerke sogenannte „Opferanoden“ als Korrosionsschutz eingesetzt. Das sind galvanische Anoden, die auch bei Schiffen und Hafenanlagen zum Einsatz kommen. Als Opferanode fungiert eine Legierung aus „unedlen“ Metallen, die in der elektrochemischen Spannungsreihe negativer sind als das Metall der zu schützenden Bauteile. Solche „unedlen“ Metalle sind zum Beispiel Zink, Magnesium und Aluminium. Die Legierungen werden leitend mit den Funktionsteilen verbunden und schützen die Bauteile aus Eisen oder Stahl vor dem Verrosten. Denn statt der Funktionsteile geben nun die Opferanoden Elektronen ab, werden oxidiert und gehen in Lösung. Die Bauteile der Windkraftanlagen bleiben dadurch in ihrer Funktion länger erhalten und müssen nicht so bald ersetzt werden. Das unedlere Metall wird dabei allerdings allmählich aufgelöst, also „geopfert“. Das Gewicht der Opferanoden allein für eine Windkraftanlage beträgt je nach Fundamenttyp bis zu 10 t und mehr, wodurch ein Schutz für mindestens 25 Jahre gewährleistet ist.

Bei den zum Betrieb benötigten weiteren Infrastrukturen, zum Beispiel **Konverterplattformen**, sind es teilweise **mehrere 100 t**, die zum Einsatz kommen, um einen entsprechenden Schutz zu gewährleisten.

Im Laufe der Zeit werden so große Mengen an Metallverbindungen freigesetzt. Beim Auflösen der Anodenlegierungen gelangen insbesondere Aluminium und Zink, aber zum Beispiel auch hochgiftiges Cadmium und Blei sowie exotische Elemente wie Indium und Gallium in die Meeresumwelt.

Beide Systeme zum Korrosionsschutz emittieren also chemische Stoffe in die Meeresumwelt, die dort potentiell schädliche Auswirkungen haben können. Bisher liegen jedoch kaum wissenschaftliche Erkenntnisse über die freigesetzten Mengen und deren Verteilung im Wasser, in den Sedimenten und in Lebewesen vor. Diese Erkenntnisse sind aber Voraussetzung um die Auswirkungen auf die marine Umwelt zu verstehen und zu bewerten.

## Aktuelle Untersuchungsmethoden für stoffliche Emissionen und mögliche Auswirkungen



Abb. 2: Wasserprobenahme mit Wasserschöpfern an CTD-Rosette (Foto: Anna Ebeling/HZG)

Im Zusammenhang mit Stofffreisetzungen aus Windkraftanlagen untersuchen die Umweltchemiker um Dr. Daniel Pröfrock am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) das Wasser und die Sedimente rund um verschiedene Anlagen (Abb. 2). Das Projekt [OffChEm](#) wird in Kooperation mit dem [Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie \(BSH\)](#) durchgeführt. Stoffliche Freisetzungen von Offshore-Windkraftanlagen sowie die möglichen Einflüsse auf die marine Umwelt werden untersucht und deren Relevanz bewertet.

Für die Untersuchungen wird ein breites Spektrum von Nachweismethoden eingesetzt. Außerdem werden ständig neue Methoden weiterentwickelt, wie zum Beispiel „Passive Sampling“ und die Nutzung von Muscheln als Indikatoren (s.u.). Nur aus dem Zusammenspiel verschiedener Untersuchungsansätze und der Zusammenarbeit verschiedener Arbeitsgruppen können die notwendigen Erkenntnisse gewonnen werden.

Zum einen geht es darum, die freigesetzten Stoffe sicher in der Meeresumwelt zu quantifizieren. Zum anderen müssen die chemischen und biologischen Ergebnisse im Zusammenhang erforscht werden. Nur so lassen sich potenzielle Effekte auf Lebewesen abschätzen und mögliche Umweltwirkungen der Schadstoffe fundiert bewerten. Im Folgenden ein kurzer exemplarischer Blick auf einige Methoden aus dem verwendeten Potpourri.

### 1. Probenahme während Messkampagnen mit Forschungsschiffen

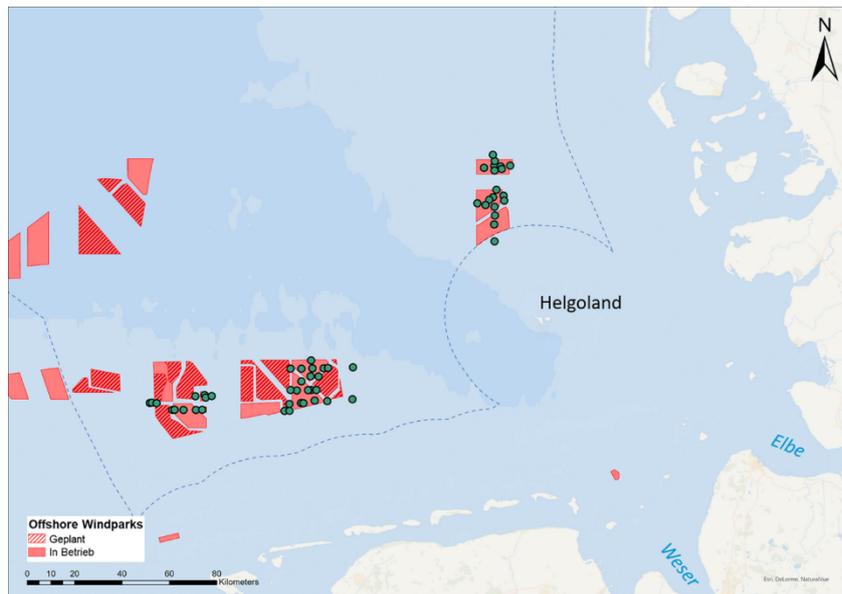


Abb. 3: Probenahme-Stationen in der Nordsee (Karte: Anna Ebeling/HZG)

Im Projekt *OffChEm* wurden seit 2016 während Messkampagnen mit den Forschungsschiffen „Ludwig Prandtl“ (HZG) und „Atair“ (BSH) Proben direkt in Windparks und in ihrem näheren und weiteren Umfeld genommen. In den Jahren 2018 und 2019 wurden hochaufgelöste Beprobungen von mehreren Windparks in der Nordsee durchgeführt. An ca. 50 bzw. 90 Stationen wurden Wasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben genommen (Abb. 3).

## 2. Strömungsanalyse unterstützt die Probenahme

Um die aussagekräftigsten Orte für die Probenahmen zu lokalisieren, besteht eine enge Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern, die Wasserströmungen in der Region modellieren. Die Arbeitsgruppe um Dr. Ulrich Callies (Abteilung Modellierung zur Bewertung von Küstensystemen, HZG) berechnet mit ihren Simulationsmodellen den Einfluss von Windparks auf die Strömungen. So können die WissenschaftlerInnen zum Beispiel abschätzen, wie lange sich ein bestimmter Wasserkörper im Windpark befindet – und sich daher möglicherweise freigesetzte Stoffe in ihm anreichern. Auch lässt sich so erkennen, wo die beprobten Wasserkörper herkommen. Diese Informationen sind eine wichtige Basis für die Planung von Probenahmen im Umfeld von Windkraftanlagen.

## 3. Spurenanalytische Untersuchung der Proben im Labor



Abb. 4:

Ultrapurenanalyse im Reinraum-Labor (Foto: Christian Schmid/HZG)

Die in der Nähe der Windkraftanlagen genommenen Wasser- und Sedimentproben werden im Labor insbesondere hinsichtlich ihres Schwermetallgehalts sowie im Hinblick auf ihre Isotopenzusammensetzungen analysiert (s.u.). Die von den Opferanoden freigesetzten Metalle sind im Meerwasser hochverdünnt und finden sich in nur sehr geringen Konzentrationen (wenige Nanogramm pro Liter, ng/L). Daher müssen hoch empfindliche instrumentelle Nachweistechiken eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt werden, mit denen sich diese geringsten Konzentrationen im Salzwasser nachweisen und messen lassen. Mittels Massenspektrometrie können in den aufbereiteten Proben dann die verschiedenen Schwermetalle und andere Elemente analysiert werden.

#### **4. Analyse von Isotopensystemen**

Mit neuartigen Methoden zur Analyse von Isotopenverhältnissen kann zusätzlich die Herkunft eines im Wasser oder in den Sedimenten nachgewiesenen Elements bestimmt werden. Die hochpräzisen Analysen basieren darauf, dass sich die Isotopenverhältnisse natürlicher (zum Beispiel geologischer) Quellen von solchen anthropogener Quellen, zum Beispiel Windkraftanlagen, unterscheiden. Durch die Kombination verschiedener Isotopensysteme ist eine räumlich strukturierte Messung, Nachverfolgung und Beschreibung von Quellen und Prozessen möglich. So lässt sich die Frage beantworten, wo ein gefundener Stoff herkommt, ob er natürlichen oder menschlichen Ursprungs ist.

#### **5. Muscheln als Indikatororganismen**



Abb. 5: Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) werden als Indikatororganismen in Käfigen verschiedenen Umweltbedingungen ausgesetzt und anschließend im Labor untersucht. ( Anna Ebeling/HZG)

Besonders wichtig ist die Frage, ob und wie die nachgewiesenen Stoffe die marine Umwelt beeinflussen. Um mögliche Schadstoffeffekte zu erkennen, werden zum Beispiel Miesmuscheln als Indikatororganismen eingesetzt (Abb. 5). Sie werden vor Ort ausgebracht („transplantiert“) und regelmäßig auf den Gehalt verschiedener Schadstoffe untersucht, die sie aus dem Wasser aufgenommen haben. Neben chemischen Veränderungen von Gewebeproben, zum Beispiel hinsichtlich der Elementkonzentration oder bestimmter Proteine, werden auch physiologische Indizes bestimmt, die die Fitness der Muscheln anzeigen.

#### **Bis zu 26 verschiedene chemische Elemente werden aus Opferanoden freigesetzt**

Vom Korrosionsschutz am Fundament eines einzelnen sogenannten Monopiles, das heißt, einer Gründung aus einem einzelnen Stahlpfeiler, werden pro Jahr über 80 kg anorganisches Material in die Meeresumwelt freigesetzt. Für andere Gründungsstrukturen, wie zum Beispiel sogenannte Tripods, sind die emittierten Mengen sogar noch deutlich größer (Kirchgeorg et al., 2018; Reese et al., 2020).

Gebräuchliche Typen von Opferanoden bestehen aus Legierungen auf der Basis von Aluminium oder auf der Basis von Zink. Die Zusammensetzung der zum Korrosionsschutz eingesetzten Opferanoden unterliegt zum Teil gesetzlichen Regelungen. Für Aluminium-basierte Opferanoden gilt das für die Elemente Aluminium, Silizium, Titan, Mangan, Eisen, Kupfer, Zink und Indium. Für Opferanoden auf der Basis von Zink sind Aluminium, Silizium, Eisen, Kupfer, Zink, Cadmium und Indium reguliert. Alle anderen Bestandteile, die in den Anoden enthalten sind, unterliegen aktuell keiner weiteren Regulierung.

Da die ökologischen Wirkungen natürlich von den verwendeten Elementen und ihren chemischen Eigenschaften abhängen, gilt es zunächst, die verwendeten und freigesetzten Elemente zu identifizieren. Bei detaillierten Untersuchungen über die Zusammensetzung verschiedener verwendeter Aluminium- und Zink-Anodentypen wurden 40 verschiedene chemische Elemente untersucht (Reese et al., 2020).

- In den Zink-basierten Anodentypen wurden **15 verschiedene chemische Elemente** (in quantifizierbarer Menge) identifiziert. Mit absteigenden Massenanteilen kamen vor: Zink,

Aluminium, Cadmium, Blei, Eisen, Thallium, Kupfer, Bismut, Silber, Gallium, Mangan, Nickel, Indium, Vanadium und Zinn.

- In den Anoden auf Basis von Aluminium wurden sogar **26 verschiedene Elemente** nachgewiesen: Aluminium, Zink, Eisen, Bismut, Mangan, Indium, Vanadium, Gallium, Nickel, Blei, Kupfer, Magnesium, Chrom, Cadmium, Kobalt, Zinn, Lanthan, Uran, Cer, Silber, Thallium, Neodym, Gadolinium, Dysprosium, Samarium und Praseodym.

Diese chemischen Elemente werden als Bestandteile der Legierungen eingesetzt oder sie stammen aus Verunreinigungen der verwendeten Materialien. Einige der enthaltenen, toxikologisch bedenklichen Schwermetalle werden als Bestandteile der Anoden benötigt, damit diese überhaupt funktionieren und sich im Meerwasser auflösen. Die Zusammensetzung der Opferanoden genau zu kennen, ist deshalb wichtig, weil diese sich mit der Zeit „opfern“ und die Stoffe, aus denen sie bestehen, dabei in die Umwelt abgegeben werden.

### **Die Effekte der freigesetzten Stoffe in der Umwelt**

Ein großes Spektrum verschiedener Stoffe wird aus Windkraftanlagen freigesetzt. Wie sind die Wirkungen auf die Umwelt zu bewerten? Das hängt einerseits von den Eigenschaften der emittierten Stoffe ab. Andererseits kommt es auf die natürliche Umweltsituation vor Ort an.

So spielt es eine Rolle, ob die Stoffe natürlicherweise in der Umwelt vorkommen und in welchen Mengen sie zum Beispiel im Wasser oder in den Sedimenten vorhanden sind. Sind die aus künstlichen Quellen freigesetzten Mengen also im Vergleich zu ihrem natürlichen Vorkommen überhaupt relevant? Interagieren die Stoffe mit Partikeln im Wasser oder im Meeresboden? Bleiben sie in der Nähe der Windparks und sammeln sich dort im Sediment an oder werden sie mit dem Wasser abtransportiert? Sind Effekte auf Lebewesen bekannt? Für einige Stoffe ist bekannt, dass sie giftig wirken. Für andere, eher exotische Elemente sind die möglichen Wirkungen auf Lebewesen aber bisher kaum untersucht.

Einige Beispiele sollen die verschiedenen Eigenschaften von aus den Opferanoden freigesetzten chemischen Stoffen verdeutlichen (Reese et al., 2020):

- **Aluminium** ist eine der Hauptkomponenten der Opferanoden - und andererseits aber auch eines der häufigsten Elemente in der Erdkruste. In den Sedimenten am Gewässergrund sind (aufgrund der hohen Hintergrundwerte) daher keine relevanten Konzentrations-Veränderungen zu erwarten. Anders im Meerwasser: Dort sind die Konzentrationen natürlicherweise sehr gering und in der direkten Umgebung von Offshore-Windkraftanlagen möglicherweise messbar höher. Mögliche Effekte auf Meereslebewesen sind kaum bekannt.
- **Zink** ist in den Anoden ebenfalls in großen Mengenanteilen vertreten. Es zählt zu den für Lebewesen notwendigen Spurenelementen, kann in hohen Konzentrationen aber giftig sein. Dank vieler Untersuchungen ist die Datenlage gut und es ist beispielsweise bekannt, dass einige Meereslebewesen empfindlich auf steigende Zink-Konzentrationen reagieren. In Küstengewässern gibt es viele natürliche und anthropogene Quellen für Zink, so wird es zum Beispiel über die Flüsse eingetragen.
- **Gallium** und **Indium** kommen natürlich nur in außerordentlich geringen Konzentrationen vor und es gibt im Meereslebensraum kaum andere Freisetzungquellen. Über das Verhalten von Gallium und Indium in der Umwelt ist sehr wenig bekannt. Für technische Anwendungen, zum Beispiel für Halbleiter oder Displays, besteht aber eine steigende Nachfrage.

- Für die Umwelt kritische Elemente, wie **Blei** und **Cadmium**, finden sich besonders in den Zink-Anoden. Beide Elemente kommen natürlicherweise in Küstengewässern und Sedimenten nur in geringen Konzentrationen vor. Besonders für Blei gibt es viele verschiedene anthropogene Quellen und die toxische Wirkung beider Elemente ist auch in marinen Lebensräumen gut untersucht.
- Unterschiede in den Blei-Isotopen-Verhältnissen machen es möglich, die menschengemachten Einträge vom natürlichen Hintergrundlevel zu unterscheiden. Zudem weisen die Opferanoden verschiedener Hersteller verschiedene Blei-Isotopen-Zusammensetzungen, sogenannte Signaturen, auf und lassen sich daher voneinander unterscheiden. So lässt sich die Herkunft bestimmter Stoffe feststellen und nachverfolgen.

### Schwermetallkonzentrationen in der Umgebung von Offshore-Windparks

Abbildung 6 zeigt erste Ergebnisse der Untersuchung von Metallkonzentrationen im Meerwasser in und rund um Offshore-Windparks der Deutschen Bucht. Die Konzentrationen der Metalle Cadmium (Cd) und Zink (Zn) steigen nach Norden hin an. Ein Blick auf die generelle Transportrichtung des Wassers, die sogenannte Restströmung, könnte eine Erklärung bieten: Sie verläuft in diesem Gebiet von Westen nach Norden. Das Wasser durchläuft daher nacheinander drei Windparks und nimmt auf diesem Weg womöglich immer mehr der Metalle auf, die in den Opferanoden vorkommen. Diese Anreicherung könnte dann zu den steigenden Konzentrationen der freigesetzten Metalle im Wasser führen.

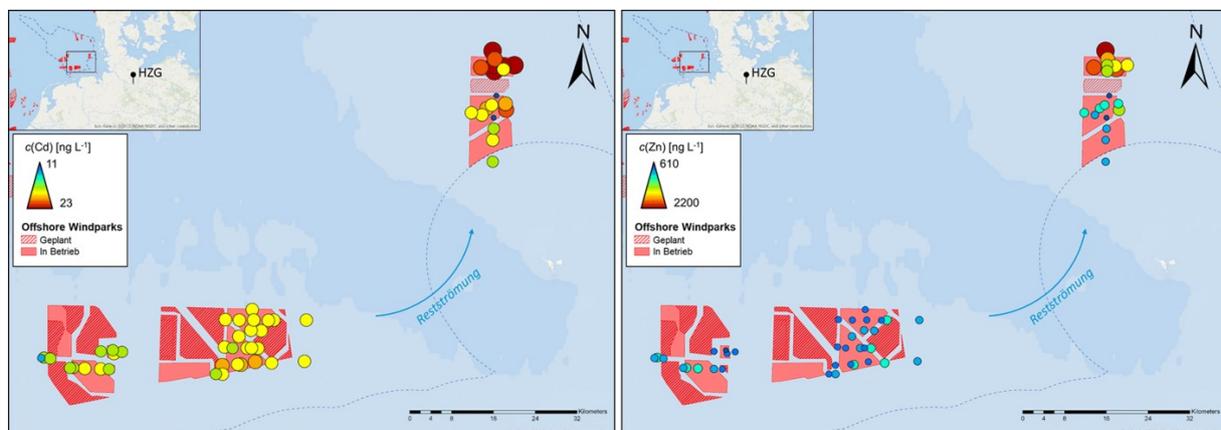


Abb. 6: Erste Ergebnisse der Untersuchung von Metallkonzentrationen (**Cadmium** und **Zink**) im Meerwasser in und in der Umgebung von Offshore-Windparks. Zu erkennen ist eine Anreicherung der Metalle im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets entlang der Restströmung der Nordsee. (Grafik: HZG, Basemap Esri, Windpark-Flächen: OSPAR)

### Resümee und Ausblick

Viele Aspekte der Wirkung von Offshore-Windanlagen auf die Meeresumwelt sind noch weitgehend unbekannt. So steht auch die Erforschung von chemischen Freisetzungen und ihren Wirkungen auf die Ökosysteme im direkten und entfernten Umfeld von Windparks noch am Anfang. Aus sogenannten Opferanoden, die zum Schutz der Anlagen vor Korrosion, das heißt vor dem Verrosten, dienen, werden ständig **nicht unerhebliche** Mengen an Schwermetallen in die Umgebung freigesetzt (**mehr als 80 kg Legierung pro Anlage und Jahr**).

In einer aktuellen Studie (Reese et al., 2020) wurde erstmals eine umfassende Untersuchung der anorganischen Zusammensetzung von verschiedenen Opferanoden durchgeführt und dabei 40 verschiedene Elemente untersucht. Die Ergebnisse sind die Grundlage, um Stofffreisetzungen aus Windkraftanlagen in die Meeresumwelt nachverfolgen zu können. Aber allein die große Anzahl der

gefundenen Stoffe deutet bereits darauf hin, dass die Untersuchung aufwendig und die Bewertung kompliziert ist. Dazu kommen noch die verschiedensten organischen Stoffe, die in den Beschichtungssystemen enthalten sind und über die es ebenfalls aktuell keine Informationen gibt.

Vor diesem Hintergrund werden Probenahmen, Analysemethoden, Aus- und Bewertungsansätze im laufenden Projekt *OffChEm* stetig weiterentwickelt. So wird es möglich, den chemischen Eingriff, den der Ausbau der Offshore-Windenenergie auch bedeutet, zukünftig besser verstehen und bewerten zu können.

Text: Dr. Christiane Eschenbach ([Helmholtz-Zentrum Geesthacht](#) | HZG)

## Referenzen

Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M. J. & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 257-268. [doi:10.1016/j.marpolbul.2018.08.058](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058)

Reese, A., Voigt, N., Zimmermann, T., Irrgeher, J., & Pröfrock, D. (2020). Characterization of alloying components in galvanic anodes as potential environmental tracers for heavy metal emissions from offshore wind structures. *Chemosphere*, 257:127182. [doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127182](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127182)

Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung HZG. (o.D.). OffChEm Projekt 2017 - 2021. Stoffliche Emissionen aus Offshore-Windanlagen – Mögliche Einflüsse auf die marine Umwelt und deren Bewertung [Projektwebseite, [www.hzg.de](http://www.hzg.de)]. Aufgerufen am 21.01.2021.

## DOI

<https://doi.org/10.48440/eskp.063>

Veröffentlicht: 26.01.2021, 8. Jahrgang

**Zitierhinweis:** Eschenbach, C. (2021, 26. Januar). Korrosionsschutz für Offshore-Windkraft – Problem für die Umwelt? *Earth System Knowledge Platform* [eskp.de], 8. doi:10.48440/eskp.063