

Bundesamt für Strahlenschutz

Grundsätze zu den

Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern und thermischen Auswirkungen der Kabelanbindung von Offshore-Windenergieparks an das Verbundstromnetz

Stand Dezember 2005



INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	3
2	TECHNISCHE ASPEKTE	3
2.1	HOCHSPANNUNGS-DREHSTROMÜBERTRAGUNGSSYSTEME	4
2.2	HOCHSPANNUNGS-GLEICHSTROMÜBERTRAGUNGSSYSTEME.....	4
2.3	KABELSYSTEME	5
2.3.1	<i>Monopolare Kabelsysteme</i>	5
2.3.2	<i>Multipolare Kabelsysteme</i>	5
2.3.3	<i>Koaxiale Kabelsysteme</i>	5
3	BIOLOGISCHE ASPEKTE	6
3.1	AUSWIRKUNGEN ELEKTRISCHER UND MAGNETISCHER FELDER AUF ORGANISMEN	6
3.2	THERMISCHE AUSWIRKUNGEN IM SEDIMENT.....	8
3.3	ZUSAMMENFASSUNG	9
4	GRENZWERTE	10
5	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	11
6	LITERATUR	13
7	ANHANG: GRUNDLEGENDE PHYSIKALISCHE ASPEKTE	16
7.1	MAGNETISCHE FELDER	16
7.2	ELEKTRISCHE FELDER.....	16
7.3	ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION	16

1 Einleitung

Den Internetseiten des nach der Seeanlagenverordnung zuständigen Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist zu entnehmen, dass bislang 33 Anträge auf Erteilung einer Genehmigung für die Errichtung von Offshore-Windenergieparks in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik Deutschland gestellt wurden. Die Anträge betreffen 27 Planungen für Parks in der Nordsee und sechs Projekte in der Ostsee. Für die Genehmigung von küstennahen Anlagen innerhalb der 12 Seemeilen-Zone sind die jeweiligen Bundesländer verantwortlich. Nach Aussage des BMU (Pressemeldung vom 25.01.05) sind bereits sieben Windenergieparks auf hoher See genehmigt. Zwei Anträge hat das BSH aus Gründen des Naturschutzes abgelehnt. Anfang April 2005 genehmigte das BSH mit dem Projekt „Kriegers Flak“ den ersten Offshore-Windenergiepark in der Ostsee.

Laut Studie der Deutschen Energie-Agentur (dena 2005) wird für das Jahr 2015 eine installierte Windkraftleistung von 9,8 GW auf See prognostiziert, um den Anteil erneuerbarer Energien wie von der Bundesregierung beabsichtigt, bis zum Jahr 2020 auf 20% erhöhen zu können. Würden alle derzeit in der AWZ geplanten Offshore-Parks realisiert werden, so wäre eine Leistung von 40 GW möglich. Offshore-Windenergieparks wie z.B. „Kriegers Flak“ mit 80 einzelnen 5 MW Anlagen können dazu 400 MW und mehr beitragen. Neben den Verbindungen der einzelnen WKAs (Windkraftanlagen) untereinander sind mehrere Kabeltrassen für die Anbindung der Parks an das Festland vorgesehen und u.a. aufgrund der insgesamt hohen zu übertragenden Leistung auch unvermeidbar. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, neben den Umweltauswirkungen, die von Errichtung, Betrieb und ggf. Rückbau der stromerzeugenden Anlagen selbst ausgehen, auch die Kabelanbindung an das Verbundnetz auf dem Festland zu betrachten. Hierfür kommen spezielle Seekabel zum Einsatz, die die erzeugte Energie von der Offshore-Anlage zum Einspeisepunkt auf dem Festland transportieren.

Für die umfassende Prüfung der Umweltauswirkungen von Offshore-Windenergieparks ist das Umweltbundesamt zuständig. Das vorliegende Grundsatzpapier des Bundesamts für Strahlenschutz befasst sich daher ausschließlich mit den von Seekabeln während des Betriebs emittierten elektrischen und magnetischen Feldern sowie den nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik damit verbundenen möglichen Auswirkungen auf Meereslebewesen und auf die allgemeine Bevölkerung. Aufgrund der Bedeutung thermischer Effekte wurden diese ebenfalls betrachtet.

2 Technische Aspekte

Für die Anbindung der geplanten Offshore Windenergieparks an das Verbundnetz kommen verschiedene Übertragungstechniken und Kabelsysteme in Frage, die in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden.

Folgende grundlegenden technischen Aspekte sind dabei zusammen mit den damit verbundenen wirtschaftlichen Implikationen zu beachten.

- Je höher die Nennspannung des Übertragungssystems, desto kleiner sind die Ströme bei gleicher zu übertragender Leistung und desto geringer sind die Wärmeverluste.
- Die Spannung kann nicht beliebig erhöht werden, da sie durch die Spannungsfestigkeit der Isolation des verwendeten Kabeltyps begrenzt ist.

- Die Kabelverluste nehmen mit der Länge des Kabels zu und mit dem Durchmesser der Leiter ab. Sie sind zudem u.a. von der Leitfähigkeit des verwendeten Kabelmaterials abhängig.
- Beim Einsatz von Wechselstromübertragungssystemen sind zusätzliche Verluste zu berücksichtigen [u.a. durch induzierte Wirbelströme z.B. in der Armierung, durch den Skin-Effekt (Verringerung des tatsächlich genutzten Leiterquerschnitts aufgrund der Strom-Verdrängung zu den äußeren Leiterschichten in Abhängigkeit u.a. von der Frequenz), Blindleistung].

Aus Sicht eines Anlagenbetreibers können o.g. Aspekte insbesondere in Abhängigkeit von der Entfernung des jeweiligen Offshore Parks zur Küste zu unterschiedlichen optimalen Lösungen führen. Auch sind die Anforderungen an die interne Verkabelung von Offshore-Windenergieparks von denen an das oder die Kabel zur Übertragung der Gesamtleistung des Parks an die Küste zu unterscheiden, da sich sowohl die zu überbrückende Entfernung als auch die zu übertragende Leistung in den beiden genannten Anwendungsfällen beträchtlich unterscheiden.

2.1 Hochspannungs-Drehstromübertragungssysteme

Bei Drehstromsystemen kommen drei Leiter zum Einsatz, die im Idealfall jeweils um 120° gegeneinander phasenverschobene Ströme führen. Da die Summe der durch den gesamten Kabelquerschnitt tretenden Ströme zu jedem Zeitpunkt null ist, verschwindet gemäß den Maxwell'schen Gleichungen das Ringintegral der magnetischen Feldstärke. Daraus folgt jedoch nicht, dass keine magnetischen Felder emittiert werden. Vielmehr ist die Kompensationswirkung, ähnlich wie bei bipolaren Gleichstromsystemen, abhängig von der Anordnung und insbesondere vom Abstand der einzelnen Leiter.

Wechselstromsysteme sind mit magnetischen Wechselfeldern verbunden und induzieren somit ihrerseits wieder elektrische Felder. Im Isolationsmaterial kann es dadurch zu Polarisationsverlusten und in der Armierung zu Wirbelstromverlusten kommen. Die Wirbelströme können zu einer zusätzlichen Erwärmung des Kabels führen. Zudem sind Blindleistungsverluste zu berücksichtigen. Drehstromübertragungssysteme sind aus den genannten Gründen nur bei Entfernungen bis 150 km und zu übertragenden Leistungen bis 250 MW wirtschaftlich (dena 2005).

2.2 Hochspannungs-Gleichstromübertragungssysteme

Hochspannungs-Gleichstromübertragungssysteme (HGÜ) zeichnen sich dadurch aus, dass die im Windenergiepark erzeugte Wechselspannung zunächst ggf. auf ein anderes Spannungsniveau transformiert, anschließend gleichgerichtet, als Gleichstrom zur Küste geleitet und dort mit Wechselrichtern wieder in eine Wechselspannung zurücktransformiert wird. Die damit verbundenen zusätzlichen Investitionskosten rechnen sich in der Regel nur bei hohen zu übertragenden Leistungen bzw. bei großen Entfernungen. Demzufolge wird diese Technik eher bei großen, küstenfernen Offshore-Parks hoher Leistung, nicht aber z.B. für die interne Verkabelung der Parks eingesetzt werden.

Bei der konventionellen HGÜ werden für die Gleich- und Wechselrichtung gesteuerte Gleichrichter (Thyristoren) eingesetzt. Bei HGÜ-Light / HGÜ-Plus handelt es sich um eine Weiterentwicklung, bei der die Thyristoren durch Isolierschicht-Bipolartransistoren ersetzt werden. Die Spannungs- und Stromfestigkeit dieser Transistoren ist derzeit noch geringer als die der Thyristoren, so dass mit derartigen Systemen nur

etwas geringere Leistungen zu übertragen sind (z.B. 330 MW, HGÜ-Light, Firma ABB).

Hinsichtlich der einzusetzenden Kabeltypen sind keine Unterschiede zur konventionellen HGÜ-Technik zu erwarten. Da die mit HGÜ-Light / HGÜ-Plus maximal übertragbare Leistung im Vergleich zur konventionellen Gleichstromübertragungstechnik geringer ist, ist auch mit einer entsprechend geringeren Emission von elektromagnetischen Feldern und einer geringeren Erwärmung des Sediments pro Kabel zu rechnen. Andererseits besitzen HGÜ-Light / HGÜ-Plus Systeme unabhängig von den verwendeten Kabeltypen technische Vorteile gegenüber der herkömmlichen Thyristortechnik, so dass in Zukunft auch mit weiterentwickelten Systemen höherer Leistung gerechnet werden kann.

2.3 Kabelsysteme

2.3.1 Monopolare Kabelsysteme

Unter monopolaren bzw. einpoligen Kabelsystemen werden Systeme verstanden, bei denen der Rückleiter nicht als Kabel ausgeführt wird, sondern die Stromrückleitung über das Erdreich bzw. das Meerwasser erfolgt. Kabelsysteme dieses Typs kommen bei der Gleichstromübertragung HGÜ zum Einsatz. Für die Einleitung des Stroms in das Erdreich bzw. in das Meerwasser werden großflächige Elektroden benötigt, um die Stromdichten gering zu halten. Bei monopolaren Systemen findet keine Kompensation von elektromagnetischen Feldern statt, so dass hier grundsätzlich die mit Abstand höchsten Emissionen zu erwarten sind.

2.3.2 Multipolare Kabelsysteme

Bei multipolaren bzw. mehrpoligen Systemen sind Hin- und Rückleiter ausgebildet. Diese können in einem Kabel oder in zwei – bzw. bei Drehstromsystemen in drei – getrennten Kabel geführt werden. Sofern sie zusammen in einem Kabel geführt werden, ergibt sich sowohl bei Gleichstrom- als auch bei Wechselstromsystemen eine partielle Auslöschung der magnetischen Felder. Werden die Leiter in getrennten Kabeln geführt, so lässt die Kompensationswirkung mit zunehmenden Abstand zwischen den einzelnen Leitern schnell nach. Multipolare Kabelsysteme – insbesondere bei Führung der einzelnen Leiter in einem gemeinsamen Kabel – sind demnach unter den Gesichtspunkten des Strahlenschutzes den monopolaren in jedem Fall vorzuziehen. Die Verlegung von getrennten Kabeln in einem gemeinsamen Kabelgraben nach dem „close laying“ Verfahren wird tendenziell zu höheren Emissionen führen, da ein möglichst geringer und konstanter Abstand nicht garantiert werden kann. Unter die bipolaren Kabelsysteme für die Gleichstromübertragung fallen z.B. die sogenannten „flat type“ Kabel.

2.3.3 Koaxiale Kabelsysteme

Koaxiale Kabelsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass Hin- und Rückleiter in einem Kabel geführt werden, wobei ein Leiter den anderen getrennt durch die Isolation umschließt. Bei diesen Systemen sind aufgrund der Anordnung der Leiter insgesamt die geringsten Emissionen elektromagnetischer Felder zu erwarten. Derzeit sind koaxiale Kabelsysteme für die Gleichstromübertragung mit einer Spannungsfestigkeit bis 500 kV verfügbar (Schreiber Umweltplanung, 2004). Laut (OSPAR, 2004) werden entsprechende Seekabelsysteme derzeit noch getestet.

3 Biologische Aspekte

3.1 Auswirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf Organismen

Gravierende schädliche Einflüsse der im Meer verlegten elektrischen Leitungen auf Meereslebewesen, wie z.B. genetische Schäden, Gewebeschäden usw., aufgrund der magnetischen und induzierten elektrischen Felder sind nicht zu erwarten. Bestimmte Arten können aber die elektrischen Felder wahrnehmen, was in einigen Fällen zu Veränderungen des Verhaltens führen kann (Marhold & Kullnick, 2000; Kalmijn 2000).

Elektrische Felder werden induziert, wenn sich entweder das Meerwasser oder das darin schwimmende Tier in Bezug zum Erdmagnetfeld bewegt. Die Intensität der induzierten Felder steigt mit der Geschwindigkeit der Bewegung. Am sensitivsten reagieren Knorpelfische (Elasmobranchia), zu denen Haie und Rochen gehören. Diese Arten haben in ihrer Haut hochspezialisierte Elektrozeporen, die nach ihrem Entdecker benannten Lorenzini-Ampullen. In einem mit leitfähiger zähflüssiger Substanz gefüllten Kanal befinden sich Sinneszellen mit einer Wahrnehmungsschwelle für elektrische Feldstärke von etwa $0,5 \mu\text{V/m}$, bei einigen Arten sogar nur $0,1 - 0,2 \mu\text{V/m}$ (Kalmijn, 1982, 2000). Diese Empfindlichkeit bedeutet, dass die Tiere bereits bei einer Geschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ im Meerwasser bei normalem Erdmagnetfeld induzierte elektrische Felder wahrnehmen. Es werden statische und niederfrequente Felder bis ca. 10 Hz wahrgenommen (Kalmijn, 2000). Einige Arten, die aktiv elektrische Signale erzeugen können, wie z.B. Zitterrochen (*Torpedo sp.*), können auch Pulse bei höheren Frequenzen wahrnehmen (CMACS 2003). Das Verhalten bei 50 Hz ist nicht untersucht. Schwächere statische Felder ($10 \mu\text{V/m}$) verursachen eine Anlockung, da sie den Feldern, die die Beute im Wasser erzeugt, ähneln; starke Felder ($1000 \mu\text{V/m}$) wirken abschreckend (Gill & Taylor, 2001). Bis zu welchen Feldstärken die Wahrnehmung möglich ist ohne die Sinneszellen zu schädigen, ist nicht untersucht. Wird bei häufigem Vorkommen der Kabel das Jagdverhalten vor allem durch schwache Felder, die eine vermeintliche Beute simulieren, erheblich gestört, kann dies für einige Arten negative Folgen haben. Dies sollte zumindest in Schutzgebieten vermieden werden. Es ist auch zu beachten, dass die Zahl der Haie und Rochen in der Nordsee infolge der intensiven Fischerei und der langsamen Vermehrung dieser Arten ständig abnimmt.

Auch Störe (*Acipenser*), die zu der ursprünglichen Gruppe der Knorpelganoiden Fischen (Chondrostei) gehören und einen Übergang zwischen Knorpelfischen und Knochenfischen darstellen, haben am Kopf und Rostrum ampullenförmige Elektrozeporen, die morphologisch und phylogenetisch denen der Knorpelfische entsprechen. Felder vom $100 \mu\text{V/m}$ rufen bereits starke elektrophysiologische Antworten hervor, die Schwellenwerte wurden nicht näher untersucht (New & Bodznick, 1985). Das Verhalten von Stören gegenüber elektrischen Feldern ist nicht bekannt. Angesichts der Bestrebungen des BMU und BfN die anadromen Störe in der Ostsee wieder anzusiedeln ist deren mögliche Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern zu beachten.

Europäische Flusssaale (*Anguilla anguilla*) nehmen elektrische Felder mit dem Seitenlinienorgan wahr, die Wahrnehmungsschwelle liegt bei etwa $0,067 \text{ mV/m}$ (Kullnick 2000). Die von Starkstromkabeln (Gleichstrom) erzeugten Magnetfelder induzieren elektrische Felder, die von Aalen auf jeden Fall wahrgenommen werden können. Im Baltikum, südlich von Schweden, wurde beobachtet wie die Tiere ein Starkstromkabel (BALTIC Cable, HGÜ) überquerten, wobei in 10 m Entfernung die magnetische

Feldstärke dem Erdmagnetfeld entsprach. Mehr als die Hälfte der Tiere überquerte das Kabel in kürzester Zeit, bei einigen war dabei ihre Route um etwa 30 m nach Norden verlagert (Westerberg & Begout-Anras, 2000; Westerberg 2000). Auch Laboruntersuchungen zeigten, dass Aale Magnetfelder wahrnehmen und sich danach auch orientieren können, aber nur einige wenige Tiere zögerten, die Kabel im Experiment zu überqueren (Fock et al. 1999). Es wird daraus geschlossen, dass es keinen gravierenden Einfluss auf die Migration der Aale gibt, und dass die Kabel keine unüberquerbare "Barriere" darstellen (Marhold & Kullnick, 2000).

Neunaugen (Cyclostomata: *Petromyzon*, *Lampetra*) verwenden zur Wahrnehmung elektrischer Felder ebenfalls das Seitenlinienorgan, haben auf der Rezeptorebene eine Wahrnehmungsschwelle von 0,1 - 1 mV/m (Kullnick, 2000) und reagieren auf elektrische Felder durch erhöhte (im Kathodenbereich) oder verminderte (im Anodenbereich) Aktivität (Chung-Davidson et al., 2004). Mögliche Verhaltensstörungen durch die im Meer verlegten Kabel wurden nicht untersucht. Da Neunaugen zum Laichen in Flussmündungen ziehen, könnten vor allem in diesem Bereich Verhaltensstörungen auftreten (Fricke, 2000).

Nordseelachse (*Salmo salar*) bleiben bei der Migration wahrscheinlich unbeeinflusst, da sie sich überwiegend visuell und mittels Geruchssinn orientieren. Es wird vermutet, dass sie ähnlich dem nordamerikanischen Blaurückenlachs (*Oncorhynchus nerka*) Magnetfelder wahrnehmen und sich danach orientieren können. Zu dieser Frage gibt es aber widersprüchliche Aussagen und keinen wissenschaftlichen Beweis (Marhold & Kullnick, 2000; Kalmijn, 2000). Auch die amerikanische Art lässt sich durch künstliche Magnetfelder von ihrer Route nicht abbringen, solange noch andere (z.B. visuelle) Signale zur Verfügung stehen (Marhold & Kullnick, 2000).

Andere Knochenfische (Teleostei) haben keine spezialisierten Elektrorezeptoren, ihr Nervensystem reagiert stärker auf Wechselfelder als auf statische Felder. Für statische Felder bis 6 V/m wird keine Reaktion angegeben, Schwellenwerte liegen für verschiedene Arten bei 10 - 30 V/m (Koops, 2000). Unter den in deutschen Gewässern beheimateten Arten soll der Hering (*Clupea harengus*) und vor allem dessen Larven besonders empfindlich und deswegen für weitere Untersuchungen geeignet sein (Fricke, 2000). Die genannten starken elektrischen Felder werden aber nur bei der Elektrofischerei in Süßwasser verwendet und treten in der Nähe von Stromkabeln im Meer nicht auf. Junge Flunder (*Plathichthys flesus*) zeigten nach mehreren Wochen unter dem Einfluss von Magnetfeldern im mT Bereich keinerlei Unterschiede in der Überlebensrate gegenüber der Kontrollgruppe (Bochert & Zettler, 2004).

Es ist nicht ausgeschlossen, dass Meeressäugetiere wie z.B. Wale und Robben bei der Orientierung beeinflusst werden, hierzu sind keine Forschungsergebnisse bekannt. Es wird vermutet, dass sich Wale u.a. auch nach dem Erdmagnetfeld orientieren können (Kullnick & Marhold 2000).

Elektrische Fische aus Südamerika (Gymnotidae) und Südafrika (Mormyridae) haben eine Wahrnehmungsschwelle, die spezies- und alterspezifisch ist und im Bereich von 0,1 - 1 mV/m schwankt (Postner & Kramer, 1995). Da sie aktiv elektrische Signale produzieren, können sie auch höhere Frequenzen und kurze Pulse wahrnehmen (Kalmijn, 2000). Für Deutschland sind diese Arten ohne Bedeutung.

Über Weichtiere und Krebse ist wenig bekannt, einige Weichtiere (Mollusca) und Krebse (Crustacea) können Magnetfelder wahrnehmen und sich danach orientieren (Lohmann et al. 1995; Kullnick, 2000; Kullnick & Marhold, 2000; Wang et al. 2003, 2004). Ebenfalls gibt es Bakterien, die sich nach dem Magnetfeld ausrichten (Kalmijn, 2000). In allen drei Fällen werden wahrscheinlich mittels Magnetit direkt die

Magnetfelder, nicht aber die induzierten elektrischen Felder, wahrgenommen. Der Einfluss von Magnetfeldern bis zum mT Bereich auf die Überlebensrate, Fitness und Vermehrung wurde an einigen Krebsarten (Crustacea: Isopoda, Decapoda, Brachyura) sowie Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) untersucht. Hinweise auf eine Beeinträchtigung gab es nicht (Bochert & Zettler, 2004; BMU Vorhaben FKZ 327526). Am Institut für Angewandte Ökologie in Rostock wird zur Zeit das Forschungsvorhaben "Einsatz von Biomarkern für die Erfassung möglicher Wirkungen von elektromagnetischen Feldern (Teil A) und Temperaturen (Teil B) auf marine Organismen (Miesmuscheln und Schlickkrebse) unter Laborbedingungen", FKZ 0329954, durchgeführt. Ergebnisse liegen noch nicht vor.

Für Schwimmer und Taucher empfehlen verschiedene Autoren aus Sicherheitsgründen unterschiedliche Maximalwerte der elektrischen Feldstärke, diese bewegen sich im Bereich von 1 - 3 V/m (Quinn & Howard, 1966; Uhlmann, 1975). Derart starke Felder können nur in der Nähe von Meereselektroden auftreten, nicht aber in der Umgebung von Stromkabeln.

Einige Vogelarten orientieren sich im Flug u.a. nach Magnetfeldern (Wiltshko & Wiltshko 1995, 1999). See- und Wasservögel gehören aber nicht dazu. Außerhalb des Wassers kommen Vögel mit den von Seekabeln ausgehenden Feldern nicht in Kontakt, beim Tauchen nach Beute spielen magnetische Felder keine Rolle (Kullnick & Marhold, 2000). Am ehesten könnten Einflüsse der induzierten elektrischen Felder im ähnlichen Bereich wie bei Tauchern erwartet werden, derart starke Felder werden von Seekabeln aber nicht emittiert. Die isolierenden Eigenschaften des Gefieders und die darin enthaltene Luft würden den Einfluss elektrischer Felder weiter mindern. Ein Einfluss der von Seekabeln ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder auf tauchende Vögel kann aus den o.g. Gründen ausgeschlossen werden.

3.2 Thermische Auswirkungen im Sediment

Die im Sediment am Meeresgrund verlegten Kabel verursachen in ihrer Umgebung eine erhebliche Temperaturerhöhung, die Leitertemperatur kann maximal 90°C, die Manteltemperatur maximal 70°C betragen. Die Erwärmung des Sediments unmittelbar am Kabelmantel hängt vom Kabeltyp, dessen Auslastung, der aktuellen Sedimenttemperatur sowie der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit des Sediments ab. Unter ungünstigsten Umständen muss mit einem Temperaturanstieg um bis zu 30K unmittelbar am Kabel gerechnet werden, im Durchschnitt ist ein Temperaturanstieg im Bereich von 5 - 15K zu erwarten. Ein entsprechender Wärmegradient erstreckt sich dann über mehrere Meter (Brakelmann, 2004; OWT, 2004).

Nach Angaben der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer sollte für den küstennahen Bereich des Wattenmeeres der Temperaturanstieg in 30 cm Tiefe im Sediment 2K nicht überschreiten. Es wird angenommen, dass eine stärkere Erwärmung im Frühjahr Auswirkungen auf den Reproduktionszyklus des Zoobenthos haben könnte. Eine Erhöhung der Bodentemperaturen könnte zudem die physikochemischen Eigenschaften des Substrates verändern, was potentiell zur Veränderung von Sauerstoff-, Redox- und Nährstoffprofilen führt. Bei Einhaltung des o.g. Vorsorgewertes werden keine erheblichen Beeinträchtigungen erwartet, jedoch stützt sich diese Annahme offensichtlich nicht auf gesicherte Daten. Begleitende Untersuchungen während der ersten Pilotvorhaben sollen weitere Erkenntnisse bringen.

Für die ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ), die sich weiter entfernt von der Küste außerhalb der 12-sm Zone befindet, hat das Bundesamt für Naturschutz einen maximalen Temperaturanstieg von 2K in 20 cm Sedimenttiefe festgelegt und als Ent-

scheidungskriterium für das Genehmigungsverfahren dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie empfohlen. Begründet wurde diese Empfehlung mit der möglichen Beeinflussung besonders empfindlicher kalt-stenothermer Arten sowie mit der Möglichkeit, dass sich neue, wärmeliebende Arten, die für dieses Ökosystem fremd sind, hier ansiedeln könnten. Ansonsten können gleiche Bedenken wie im vorherigen Absatz genannt gelten. Ein Monitoring der Bodenfauna nach der Verlegung der Kabel wird für notwendig gehalten.

Um die o.g. Anforderungen zu erfüllen, werden die Kabel in einer Tiefe von 1- 3 m verlegt. Dadurch wird das Sediment nicht an der Oberfläche, sondern vor allem in der Tiefe erwärmt. In 3 m Tiefe hat das Sediment das ganze Jahr über eine Normaltemperatur von 9 - 10 °C. In unmittelbarer Nähe des Kabels steigen die Temperaturen durchschnittlich auf etwa 15 - 25 °C. An der Oberfläche schwankt die Temperatur im Jahresverlauf von etwa 5° im Winter bis etwa 18°C im Sommer, wobei die Erwärmung durch ein in 3 m Tiefe verlegtes Kabel an der Oberfläche des Sediments minimal ist (BioConsult, 2003; OWT, 2004; Brakelmann, 2004). Daraus ergibt sich, dass unmittelbar am Kabelmantel das ganze Jahr Temperaturen herrschen, die normalerweise nur im Sommer an der Oberfläche des Sediments vorkommen.

Die meisten am Meeresgrund lebenden Organismen besiedeln nur die oberflächennahen Schichten des Sediments von einigen wenigen cm. Das Makrozoobenthos beschränkt sich größtenteils auf die oberen 20 - 35 cm. In Schichten von bis zu 20 mm Tiefe sind im Wattenmeer auf sandigem Grund u.a. Sulfat-reduzierende Bakterien aktiv, mit zunehmender Tiefe sinkt ihre Aktivität schnell (Bottcher et al. 2004).

Andere Bakterienarten besiedeln auch tiefere anaerobe Schichten, z.B. wurden Methanbakterien in ca. 40 cm Tiefe bei Alaska (Chong et al., 2004) bzw. in 1,7 m Tiefe bei Dänemark (Shlimon et al. 2004) gefunden. Der Metabolismus aller im Sediment befindlicher Organismen ist temperaturabhängig. Für Bakterien ist dies vor allem bei tieferen Temperaturen beschrieben (Price & Sowers, 2004). Das bereits erwähnte *Methanobacterium* aus Alaska zeigte unter Laborbedingungen maximale Wachstumsraten bei 25°C (Chong et al., 2004). Am Sediment von Skagerrak wurde die Temperaturabhängigkeit der anaeroben Oxidation von Ammoniak untersucht, diese hatte ein Optimum bei 15°C. Die Denitrifikation wies ein breites Optimum von 15 - 32°C auf (Dalsgaard & Thamdrup, 2002). Die oben geschilderte Temperaturerhöhung in der Nähe eines Kabels würde die Aktivität dieser Arten steigern. Dies kann zu einem verstärkten Abbau organischen Materials führen.

Wie sich eine Temperaturerhöhung auf den Metabolismus der unterschiedlichen im Sediment befindlichen Bakterien und die Produktion diverser metabolischer Produkte auswirken würde, muss quantitativ, in Bezug zu den erreichten Temperaturen und der erwärmten Volumina, bestimmt werden. Dies ist aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes nicht möglich. Die Prozesse der anaeroben Oxidation von Methan im allgemeinen werden z.Zt. vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie untersucht (www.metrol.org). Die biogeochemischen Prozesse im flachen Sediment im Gezeitenbereich werden an der Universität Oldenburg untersucht. (Projekt Watt). Temperaturmessungen an im Meeresgrund verlegten Kabeln sind im Rahmen des im Kapitel 3.1 erwähnten Forschungsvorhabens am Institut für Angewandte Ökologie geplant. Das Institut für Ökologie der Universität Greifswald beschäftigt sich auf der Insel Hiddensee mit Untersuchungen zum Stoffhaushalt und zu Mikroorganismen im Sediment im Küstenbereich der Ostsee.

In einigen Gutachten (z.B. BioConsult 2003) wurde die Möglichkeit einer Vermehrung von *Clostridium botulinum* in den erwärmten anaeroben Schichten in Kabelnähe be-

trachtet. Dieses anaerobe Bakterium produziert ein starkes Neurotoxin (Botulotoxin) das bei Wirbeltieren in geringsten Mengen zu Lähmungserscheinungen und zum Tod führt und über die Nahrungskette zur Vergiftung von Vögeln führen kann. Die erwärmten Sedimentvolumina sind zwar im Vergleich zur gesamten Sedimentmasse gering, diese Problematik muss aber auch in Zukunft weiter verfolgt werden.

Aus Regionen mit vulkanischer Aktivität und heißen Quellen ist bekannt, dass viele Mikroorganismen sehr hohe Temperaturen ertragen können (z.B. Sievert et al., 2002). Ob sich diese u.U. in den erwärmten Sedimenten in der Nähe der Kabel ansiedeln könnten und welche ökologische Konsequenzen dies hätte, ist unklar.

3.3 Zusammenfassung

Aufgrund des geschilderten, vielfach noch lückenhaften wissenschaftlichen Kenntnisstandes ist davon auszugehen, dass direkte gesundheitliche bzw. physiologisch schädliche Effekte der im Meer verlegten elektrischen Leitungen auf Meereslebewesen aufgrund der magnetischen und induzierten elektrischen Felder nicht zu erwarten sind. Einige Arten können aber elektrische Felder wahrnehmen oder sich nach magnetischen Feldern orientieren. Bei diesen sind Verhaltensänderungen möglich. Ebenfalls können thermische Einflüsse zu Veränderungen im Sediment führen, deren Bedeutung z.Z. nur teilweise eingeschätzt werden kann.

4 Grenzwerte

In der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) sind Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor gesundheitlichen Gefahren durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von Niederfrequenz- und Hochfrequenzanlagen festgelegt. Sie gilt seit 1997 und beruht auf Empfehlungen der Strahlenschutzkommission und der "Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung" (ICNIRP).

Die Grenzwertempfehlungen der genannten Kommissionen beruhen auf den wissenschaftlich nachgewiesenen, gesundheitlich relevanten biologischen Wirkungen, die durch die Einwirkung elektromagnetischer Felder ausgelöst werden können.

In der 26. BImSchV sind Grenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte festgelegt. Obwohl nicht ausdrücklich erwähnt, gelten diese ausschließlich für das Umgebungsmedium Luft. Für die Frequenz der Netzversorgung (50 Hz) gelten folgende Werte:

	Elektrisches Feld	Magnetisches Feld
50 Hz	5 kV/m	100µT

Die 26. BImSchV findet auch für Erdkabel Anwendung, wenn diese bei einer Frequenz von 50 Hz sowie einer Spannung von 1000 V und mehr betrieben werden. Sie gilt jedoch nicht für den Fall der Gleichstromübertragung (siehe 2.2). In diesem Fall sind die Empfehlungen der ICNIRP bzw. der EU-Ratsempfehlung 1999/518/EG zu beachten, die folgende nicht zu überschreitende Maximalwerte vorschreiben:

	Elektrisches Feld	Magnetisches Feld
0-1 Hz	--	40.000µT

Das Einhalten o.g. Grenzwerte als sogenannte Referenzwerte garantiert die Einhaltung der eigentlichen Basisgrenzwerte, welche sich im Niederfrequenzbereich als maximal zulässige Körperstromdichten darstellen. Die Grenzwerte berücksichtigen

jedoch nicht die besondere Empfindlichkeit von Lebewesen, die sich mit Hilfe elektromagnetischer Felder in ihrer Umwelt orientieren. Im vorliegenden Zusammenhang sind die aufgeführten Grenz- bzw. Referenzwerte daher allenfalls in folgendem Fall von Bedeutung:

- Bei der Anlandung der Kabel ist dafür Sorge zu tragen, dass in Gebieten, die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, die o.g. Feldstärken nicht überschritten werden.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Grenzwerte keinen Schutz für Personen mit medizinischen Implantaten wie z.B. Herzschrittmachern gewährleisten. Seitens des Anlagenbetreibers ist daher zusätzlich sicherzustellen, dass entsprechende Personen nicht gefährdet werden.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf Meereslebewesen existieren keine Grenzwerte oder Verordnungen. Ausgehend von den bislang lückenhaften wissenschaftlichen Erkenntnissen, die in Kapitel 3 zusammengefasst sind, ist daher eine vorsorgliche Minimierung der emittierten Felder unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten zu fordern.

5 Handlungsempfehlungen

Die hier genannten Empfehlungen ergeben sich aus dem aktuellen in vielerlei Hinsicht allerdings unzureichenden wissenschaftlichen Kenntnisstand. Aus Vorsorgegründen sollten deswegen die von den Kabeln emittierten magnetischen und induzierten elektrischen Felder so niedrig wie technisch möglich gehalten werden. Monopolare Gleichstromsysteme, bei denen das Meer den Rückleiter ersetzt, sind nicht empfehlenswert, da vermeidbar hohe elektromagnetische Felder emittiert werden. Bei bipolarer Übertragungstechnik sollten auch bipolare Kabeltypen eingesetzt werden. Die räumlich getrennte Verlegung von zwei einzelnen monopolaren Kabeln ist weniger geeignet, da die Kompensationswirkung mit zunehmendem Abstand zwischen den Leitern schnell abnimmt. Aus strahlenschutztechnischer Sicht sind koaxiale Kabeltypen – soweit verfügbar – am besten geeignet. Entsprechend ist auch die Verwendung von Dreileiterkabeln für die Drehstromübertragung dem Einsatz dreier getrennter Einleiterkabel vorzuziehen. Die Verlegung der Kabel in einer genügenden Tiefe ist in jedem Fall zu empfehlen. Das Sediment hat keine abschirmende Wirkung - lediglich der größere Abstand zum Meeresgrund führt zu einer Reduzierung der elektromagnetischen Felder. Eine genügende Verlegetiefe von 1 – 3 m führt zudem wirkungsvoll zu einer Begrenzung der möglichen Temperaturerhöhung der Sedimentoberfläche und des Meerwassers. Sofern aufgrund der thermischen Belastung single-core Kabel eingesetzt werden müssen, sollte die fehlende Kompensationswirkung durch eine tiefere Einbringung in den Untergrund ausgeglichen werden.

Empfohlen wird, für Gleichstromkabel den zusätzlich zum Erdmagnetfeld durch den Kabel verursachten Betrag der magnetischen Flussdichte an der Sedimentoberfläche unter dem des Erdmagnetfeldes (in Europa $45 \pm 15 \mu\text{T}$) zu halten. Dies würde dazu führen, dass der resultierende Magnetfeldvektor in Abhängigkeit von der Ausrichtung des Kabels zum Erdmagnetfeld in Betrag und Richtung vergleichsweise geringfügig beeinflusst wird. Eine vollständige Richtungsumkehr bezogen auf das ungestörte Erdmagnetfeld wäre dann ausgeschlossen. Dies ist für Arten, die sich nach der Richtung des Erdmagnetfeldes orientieren, vorteilhaft. Wird der o.g. Wert eingehalten, kann das Erdmagnetfeld maximal aufgehoben oder verdoppelt werden, daraus ergibt sich auch für die induzierten elektrischen Felder ein Anstieg maximal um den Faktor

zwei. Es ist anzunehmen, dass auch die empfindlichen Sinneszellen der Knorpelfische bei dieser Variabilität unbeschädigt bleiben.

Über den Einfluss von Wechselfeldern kann aufgrund der unzureichenden Datenlage kein Schätzwert, der einzuhalten wäre, angegeben werden. Die meisten Tierarten reagieren mehr auf statische Felder als auf Wechselfelder. Deswegen wird angenommen, dass die elektrischen und magnetischen Felder der Drehstromkabel, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen, keinen Einfluss auf Lebewesen haben.

Die Temperaturerhöhung soll im Wattenmeer laut Vorgabe der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer 2K in 30 cm Tiefe im Sediment nicht überschreiten, in der AWZ sollen entsprechend der Empfehlung des BfN 2K in 20 cm Tiefe nicht überschritten werden. Festlegungen, ab welcher Temperaturerhöhung im Sediment Folgen für die marine Umwelt zu erwarten sind, sind auf Grundlage des derzeitigen Kenntnisstandes nicht möglich.

Eine Bündelung der Kabel in Trassen ist empfehlenswert. Es sollten auf jeden Fall noch genügend Flächen frei bleiben, in denen auch Tiere, deren Verhalten durch elektromagnetische Felder beeinflusst wird, ungestört bleiben. Eine weitere begleitende Forschung ist notwendig.

6 Literatur

- BioConsult (2003) Netzanbindung der Offshore-Windparks "Amrumbank-West" und "Nordsee-Ost". Unselbstständige Ergänzungsstudie zum botulismusrisiko für den Sommerlichen Lastfall.
- Bochert R, Zettler ML (2004) Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 25: 498 - 502 R
- Bottcher M, Hespeneheide B, Brumsack HJ, Bosselmann K. (2004) Stable isotope biogeochemistry of the sulfur cycle in modern marine sediments: I. Seasonal dynamics in a temperate intertidal sandy surface sediment. *Isotopes Environ Health Stud.* 40(4): 67-83.
- Brakelmann H (2004) Kabelverbindungen der Offshore-Windfarmen Butendiek und Dan Tysk zum Festland. Gutachten.
- CMACS (2003) A baseline assessment of electromagnetic fields generated by offshore windfarm cables. COWRIE Report EMF - 01-2002 66
- Chong SC, Liu Y, Cummins M, Valentine DL, Boone DR. (2002) *Methanogenium marinum* sp. nov., a H₂-using methanogen from Skan Bay, Alaska, and kinetics of H₂ utilization. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 81(1-4): 263 - 270.
- Chung-Davidson YW, Yun SS, Teeter J, Li W (2004) Brain pathways and behavioral responses to weak electric fields in parasitic sea lampreys (*Petromyzon marinus*). *Behav. Neurosci.* 118(3): 611-609
- Dalsgaard T, Thamdrup B. (2002) Factors controlling anaerobic ammonium oxidation with nitrite in marine sediments. *Appl Environ Microbiol.*, 68(8): 3802 - 3808.
- Dena (2005) Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020, Studie im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) erstellt durch das Konsortium Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln / DEWI / E.ON Netz / EWI / RWE Transportnetz Strom / VE Transmission
- Fock H, Johanssen P, Kullnick U, Marhold S, Greve W (1999) Schwimmverhalten von Jungaalen in einem experimentell geänderten geomagnetischen Feld. Forschungsinstitut Senckenberg, IMST, Univ. Duisburg, unpubl.
- Fricke R (2000) Auswirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf Meeresfische in der Nord- und Ostsee. In: Merck T, von Nordheim H (eds) Technische Eingriffe in Marine Lebensräume, BfN-Skripten 29: 41 - 61
- Gill AB, Taylor H (2001) The potential effects of electromagnetic fields generated by cabling between offshore wind turbines upon elasmobranch fishes. CCW Science report No. 488, pp. 73
- Kalmijn AJ (2000) Detection and biological significance of electric and magnetic fields in microorganisms and fish. In: ICNIRP: Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment, 97 - 112
- Kalmijn AJ (1982) electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science* 218: 916 - 918
- Koops FBJ (2000) Electric and magnetic fields in consequence of undersea power cables. In: ICNIRP: Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment, 189 - 210

- Kuchling H (1987) Physik, Fachbuchverlag Leipzig
- Kullnick UH (2000) Influences of electric and magnetic fields on aquatic ecosystems. In: ICNIRP: Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment, 113 - 132
- Kullnick U, Marhold S (2000) Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen (aquatischen) Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand. Teil I. In: Merck T, von Nordheim H (eds) Technische Eingriffe in Marine Lebensräume, BfN-Skripten 29: 4 - 18
- Lohmann KJ, Pentcheff ND, Nevitt GA, Stetten GD, Zimmer-Faust RK, Jarrard HE, Boles LC (1995) Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: experiments with undersea coil systems. J. Exp. Biol. 198(Pt 10): 2041-2048.
- Marhold S, Kullnick U (2000) Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen (aquatischen) Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand. Teil II: Orientierung, Navigation, Migration In: Merck T, von Nordheim H (eds) Technische Eingriffe in Marine Lebensräume, BfN-Skripten 29: 19 - 30
- New JG, Bodznick D (1985) Segregation of electroreceptive and mechanoreceptive lateral line afferents in the hindbrain of chondrosteian fishes. Brain Res. 336: 89 - 98
- Offshore Wind Technologie (2004) Wärmeausbreitung im Meeresboden infolge Verlustwärme der Netzanbindung des Windparks "Borkum West" (Windnet I)
- OSPAR Commission (2004) Problems and Benefits Associated with the Development of Offshore Wind-Farms, 13 -14
- Postner M, Kramer B (1995) Electrosensory thresholds in larvae of the weakly electric fish *Pollimyrus isidori* (Mormyridae, Teleostei) during ontogeny. J. Exp. Biol. 198: 783 - 791
- Price PB, Sowers T (2004) Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. Proc Natl Acad Sci U S A. 101(13): 4631 - 4636
- Quinn P, Howard PE (1996) Earth electrodes. IEE Conf. Publ. 22, HDVC Transmission, Manchester, Paper No. 83: 419 - 421
- Schreiber Umweltplanung (2004), Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung negativer ökologischer Auswirkungen bei der Netzanbindung und -integration von Offshore-Windenergieparks, Abschlussbericht des BMU Forschungsvorhabens FKZ 327530, 44 - 50
- Shlimon AG, Friedrich MW, Niemann H, Ramsing NB, Finster K (2004) Methanobacterium aarhusense sp. nov., a novel methanogen isolated from a marine sediment (Aarhus Bay, Denmark). Int J Syst Evol Microbiol., 54(Pt 3): 759 - 763
- Sievert SM, Ziebis W, Kuever J, Sahm K. (2000) Relative abundance of Archaea and Bacteria along a thermal gradient of a shallow-water hydrothermal vent quantified by rRNA slot-blot hybridization. Microbiology. 146 (Pt 6): 1287-93.
- Uhlmann E (1975) Power transmission by direct current. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Wang JH, Cain SD, Lohmann KJ (2003) Identification of magnetically responsive neurons in the marine mollusc *Tritonia diomedea*. J. Exp. Biol.;206(Pt 2): 381-388.

Wang JH, Cain SD, Lohmann KJ (2004) Identifiable neurons inhibited by Earth-strength magnetic stimuli in the mollusc *Tritonia diomedea*. J. Exp. Biol. 207(Pt 6): 1043-1049.

Westerberg H & Begout-Anras ML (2000) Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field. Advances in Fish Telemetry. Proceedings of the Third Conference on Fish Telemetry in Europe, Norwich, England, June 1999. Moore A, Russel I (eds) CEFAS Lowestoft.

Westerberg H (2000) Effect of HVDC cables on eel orientation. In: Merck T, von Nordheim H (eds) Technische Eingriffe in marine Lebensräume, BfN-Skripten 29: 70 - 76

Wiltschko R & Wiltschko W (1995) Magnetic orientation in animals. (Zoophysiology Vol. 33). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York

Wiltschko R & Wiltschko W (1999) The orientation system of birds - II. Homing and navigation. J. Ornithol. 140: 129 - 164

7 Anhang: Grundlegende physikalische Aspekte

7.1 Magnetische Felder

Die Bewegung von Ladungsträger in stromdurchflossenen Leitern ist immer auch mit magnetischen Felder verbunden. Die Stärke der Felder wird in der Einheit der magnetischen Feldstärke \vec{H} in Ampere pro Meter (A/m) oder in der Einheit der magnetischen Flussdichte \vec{B} in Tesla (T), angegeben. Magnetische Feldstärke und Flussdichte sind über die Materialbeziehung $\vec{B} = \mu \vec{H}$ miteinander verknüpft, wobei $\mu = \mu_0 \mu_r$ die Permeabilität bezeichnet, die sich aus der Permeabilität des Vakuums $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am und der Permeabilitätszahl des Materials multiplikativ zusammensetzt. Im Zusammenhang mit der hier zur Diskussion stehenden Problematik sind insbesondere die Permeabilitätszahlen von Meerwasser und Meeresuntergrund von Bedeutung – beide können mit dem Wert 1,0 angegeben werden, da es sich um nicht magnetisierbare Stoffe handelt. Neben dem Betrag der Feldstärke ist häufig auch die Angabe der Richtung der Feldwirkung nötig, da magnetische Felder als Vektorfelder aufzufassen sind. Das magnetische Feld ist quellenfrei; seine Feldlinien sind daher stets geschlossen ($\text{div} \vec{B} = 0$). Die Stärke des sich um einen stromdurchflossenen Leiter ausbildenden Feldes ist proportional zum Leiterstrom I und umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Aufpunkt und Leiter. Der Betrag der Feldstärke entlang einer konzentrischen Feldlinie im Abstand r eines geraden, stromdurchflossenen Leiter (gemessen von der Symmetrieachse) ist konstant und kann außerhalb des Leiters mit der Formel $H = I / (2\pi r)$ abgeschätzt werden.

Magnetfelder entstehen sowohl bei Gleichstrom („Direct Current“, DC) als auch bei Wechselstrom („Alternating Current“, AC) und folglich auch bei dreiphasigem Wechselstrom. Die Abschirmung von magnetischen Feldern gestaltet sich schwierig. Neben konstruktiven Maßnahmen bei der Verlegung einzelner Leiter können hochpermeable Werkstoffe zur Reduzierung von Emissionen eingesetzt werden.

7.2 Elektrische Felder

Im Gegensatz zum magnetischen Feld existieren im elektrischen Feld sowohl geschlossene als auch nicht geschlossene Feldlinien. Die Quellen des Felds sind in diesem Fall die elektrischen Ladungsträger ($\text{div} \vec{D} = \rho$). Wirbelfelder hingegen entstehen durch elektromagnetische Induktion (siehe 7.3). Die Stärke des elektrischen Felds wird in der Einheit der elektrischen Feldstärke \vec{E} als Volt pro Meter (V/m) angegeben. Auch das elektrische Feld ist ein Vektorfeld, so dass die Richtung der Kraftwirkung in den Fällen wo dies von Belang ist zur Vollständigkeit mit angegeben werden muss. Elektrische Felder existieren - anders als magnetische - auch bereits ohne Stromfluss. In einer leitfähigen Umgebung wie dem Meerwasser sind sie mit einem Stromfluss $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ verbunden, wobei für die elektrische Leitfähigkeit σ von Meerwasser Werte im Bereich von 3 bis 5 Siemens pro Meter (S/m) angegeben werden (Kuchling, 1987).

7.3 Elektromagnetische Induktion

Der Begriff der elektromagnetischen Induktion beschreibt die Tatsache, dass mit einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld ein elektrisches Feld verknüpft ist. Die zeitliche Änderung des Magnetfelds kann durch die Umkehrung der Stromrichtung des

verursachenden Wechselstroms erfolgen oder durch die Bewegung eines durchflossenen Objekts relativ zum Feld. Die Berechnung des Zusammenhangs erfolgt über das Induktionsgesetz

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}.$$

Das induzierte elektrische Feld ist demnach umso größer, je schneller die Bewegung bzw. die Änderung des Flusses erfolgt. Bleiben alle anderen Randbedingungen konstant, so besteht zwischen der Größe des magnetischen und des induzierten elektrischen Feldes ein linearer Zusammenhang. Handelt es sich bei dem verursachenden Magnetfeld z.B. um ein Wechselfeld mit der Frequenz 50Hz, so ändert auch das elektrische Feld mit der Netzfrequenz seine Richtung.

Die elektromagnetische Induktion ist für die Entstehung von Wirbelströmen in Organismen verantwortlich, die einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt sind.